



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Instituto de Geología



Tesis

Para obtener el grado de:
Maestría en ciencias en geología aplicada

Presenta: Azalea Judith Ortiz Rodríguez

*Distribución espacial y análisis del riesgo relacionado a flujos
piroclásticos y lahares provenientes de la actividad eruptiva
del volcán de Colima*

Director de tesis: **Damiano Sarocchi**

Asesores: **Dr. Ricardo Saucedo Girón**

Dr. Lorenzo Borselli

San Luis Potosí, S.L.P.

Agosto 2012

Tabla de contenido

Agradecimientos	8
Resumen	10
Introducción	12
Capítulo 1. Actividad volcánica y riesgo: elementos, clasificación e interacción en el espacio geográfico	14
1.1. ACTIVIDAD VOLCÁNICA: ORIGEN Y CLASIFICACIÓN DEL PROCESO FÍSICO.....	14
1.1.1. <i>Clasificación y comportamiento reológico de los magmas</i>	16
1.1.2. <i>Tipos de erupciones</i>	18
1.1.2. <i>Flujos piroclásticos</i>	21
1.1.3. <i>Lahares</i>	24
1.2. EL RIESGO: RELACIÓN DE LOS GRUPOS SOCIALES CON LOS FENÓMENOS NATURALES Y CONSTRUCCIÓN DEL CONCEPTO.....	29
1.2.1. <i>Elementos y enfoques del concepto riesgo</i>	29
1.3. PROPUESTAS METODOLÓGICAS PARA EVALUAR EL RIESGO Y LA VULNERABILIDAD.....	33
1.3.1. <i>Valuación del riesgo</i>	33
1.3.2. <i>Valuación de la vulnerabilidad</i>	34
Capítulo 2. Volcán de Colima: Contexto y dinámica eruptiva	37
2.1 COMPLEJO VOLCÁNICO DE COLIMA.....	39
2.2 VOLCÁN DE COLIMA.....	41
2.2.1 <i>Contexto físico</i>	41
2.2.2 <i>Contexto socioeconómico</i>	44
2.2.3 <i>Actividad eruptiva</i>	53
2.2.4 <i>Erupción de 1913</i>	57
Capítulo 3. Metodología.....	68
3.1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	69
3.2. DETERMINACIÓN DE LAS UNIDADES ESPACIALES DE REFERENCIA (UER)	71
3.3. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD PREVALENTE (IVP)	73
3.3.1 <i>Índice de vulnerabilidad prevalente por exposición física (IVP_{EF})</i>	74
3.3.2 <i>Índice de vulnerabilidad prevalente por fragilidad socioeconómica (IVP_{FS})</i>	77
3.3.3. <i>Índice de vulnerabilidad prevalente por falta de resiliencia (IVP_{FR})</i>	82
3.3.4. <i>Normalización de los indicadores</i>	85
3.4. CÁLCULO DEL RIESGO ESPECÍFICO (RE).....	87
3.4.1. <i>Evaluación de inmuebles</i>	87
3.4.2. <i>Evaluación de vías de comunicación (carreteras y caminos) y puentes</i>	88
3.4.3. <i>Valuación de las líneas de transmisión eléctrica</i>	89

3.4.4. <i>Valuación de infraestructura educativa</i>	89
3.4.5. <i>Valuación de la producción en los sectores primario, secundario y terciario de la economía</i>	90
3.5. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO TOTAL (IRT)	93
3.7. DETERMINACIÓN DE LOS ALCANCES DEL EVENTO MÁXIMO ESPERADO	94
3.7. PLANEACIÓN Y EJECUCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.....	96
Capítulo 4. Resultados	100
4.1. ANÁLISIS GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	100
4.1.1. <i>Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente (IVP)</i>	100
4.1.2. <i>Distribución espacial del riesgo específico (RE)</i>	109
4.1.3. <i>Distribución espacial del índice de riesgo total (IRT)</i>	112
4.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS INDICADORES EN LOS ESPACIOS BAJO AMENAZA.....	114
4.2.1. <i>Indicadores de IVP, RE e IRT para UER dentro de alcances de flujos piroclásticos</i>	115
4.2.2. <i>Indicadores de IVP, RE e IRT para UER dentro de alcances de lahares</i>	121
4.2.3. <i>Indicadores de IVP, RE e IRT para UER en las cuales inciden flujos piroclásticos y lahares</i> ..	127
Discusión y conclusiones.....	133
DISCUSIÓN.....	133
CONCLUSIONES.....	138
Referencias	141

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación del vulcanismo con base en el ambiente tectónico en el cual se desarrolla	15
Figura 2. Estructura de un flujo piroclástico	22
Figura 3. Esquema de un depósito de flujo piroclástico	23
Figura 4. Clasificación de lahares	25
Figura 5. Secciones longitudinal y vertical de un flujo de lahar	27
Figura 6. Disposición espacial de la Faja Volcánica Transmexicana	37
Figura 7. Ubicación geográfica del graben de Colima	38
Figura 8 Volcanes que constituyen el Complejo Volcánico de Colima	40
Figura 9. Barrancas formadas alrededor del Volcán de Colima	42
Figura 10. Clasificación de los climas presentes en la zona de estudio	43
Figura 11. Dinámica poblacional por municipio de la zona de estudio. Datos 2000 a 2010	46
Figura 12. Nivel de urbanización, dispersión de la población rural y densidad vial, datos del 2010	49
Figura 13. PIB total por municipio, datos en miles de pesos para el año 2009	51
Figura 14. Fases que constituyen el ciclo explosivo de volcán de Colima.	55
Figura 15. Distribución espacial de los productos piroclásticos de la fase I propuesta por Saucedo (1997) y Saucedo <i>et al</i> (2010)	58
Figura 16. Distribución espacial de los productos piroclásticos de la fase II propuesta por Saucedo (1997)	60
Figura 17. Distribución espacial de los productos piroclásticos de la fase III propuesta por Saucedo (1997)	61
Figura 18. Distribución espacial de las áreas susceptibles a amenaza por flujos piroclásticos propuesta por Saucedo <i>et al</i> (2005)	63
Figura 19. Modelado de las áreas susceptibles a inundación propuesto por Gavilanes (2004)	66
Figura 20. Diagrama de la metodología utilizada	68
Figura 21. Delimitación de la zona de estudio	70
Figura 22. Distribución espacial de las unidades espaciales de referencia (UER) utilizadas en la presente investigación	72
Figura 23. Alcance de los peligros considerados para el análisis del riesgo correspondiente	94
Figura 24. Depósitos de flujos piroclásticos en la barranca el Cordobán y de lahar en la barranca la Lumbre	96
Figura 25. Huerta aguacatera ubicada en las faldas del volcán	97
Figura 26. Venta de lotes de terreno e inmuebles en espacios susceptibles de afectación	98
Figura 27. Uso comercial de la imagen de volcán de Colima	98
Figura 28. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente por exposición física	101
Figura 29. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente por fragilidad socioeconómica	103
Figura 30. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente por falta de resiliencia	105
Figura 31. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente (IVP)	107
Figura 32. Distribución espacial del riesgo específico (RE)	110
Figura 33. Distribución espacial del Índice de Riesgo Total (IRT)	112

Figura 34. Distribución espacial de UER comprendidas dentro de los alcances de las amenazas consideradas para el análisis del riesgo	114
Figura 35. Distribución espacial de las UER localizadas dentro de los alcances de flujos pirodásticos relacionados con las erupciones de 1913	115
Figura 36. Distribución espacial del IVP en las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos pirodásticos relacionados con la erupción de 1913	116
Figura 37. Distribución espacial del RE de las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos pirodásticos relacionados con la erupción de 1913	118
Figura 38. Distribución espacial del IRT de las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos pirodásticos relacionados con la erupción de 1913	120
Figura 39. Distribución espacial de UER localizadas dentro de los alcances de lahares	121
Figura 40. Distribución espacial del IVP en las UER que se encuentran dentro de los alcances de lahares relacionados con la erupción de 1913	122
Figura 41. Distribución espacial del RE de las UER que se encuentran dentro de los alcances de lahares relacionados con la erupción de 1913	124
Figura 42. Distribución espacial del IRT de las UER que se encuentran dentro de los alcances de lahares relacionados con la erupción de 1913	126
Figura 43. UER localizadas dentro de los alcances de flujos pirodásticos y lahares relacionados con la actividad eruptiva de 1913	127
Figura 44. Distribución espacial del IVP en las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos pirodásticos y lahares relacionados con la erupción de 1913	128
Figura 45. Distribución espacial del RE de las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos pirodásticos y lahares relacionados con la erupción de 1913	130
Figura 46. Distribución espacial del IRT de las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos pirodásticos y lahares relacionados con la erupción de 1913	132

Índice de tablas

Tabla 1. Elementos involucrados en el comportamiento reológico de los magmas y su variación con base en la clasificación química de éstos.....	17
Tabla 2. Diferentes acepciones del concepto riesgo.....	32
Tabla 3. Tipos de climas presentes en las inmediaciones del volcán de Colima	42
Tabla 4. Población total de los Estado de Colima y Jalisco	44
Tabla 5. Población de los municipios comprendidos dentro de la zona de estudio	45
Tabla 6. Distribución de la población total de los municipios considerados dentro de la zona de estudio con base en el tipo de asentamiento; datos de 2010	47
Tabla 7. Producto interno bruto estatal por sector de la economía, datos en miles de pesos para el año 2009	50
Tabla 8. Producto interno bruto municipal por sector de la economía, datos en miles de pesos para el año 2009.....	52
Tabla 9. Personal ocupado a nivel municipal por sector de la economía, datos para el año 2009.....	52
Tabla 10. PIB per cápita por municipio y sector de la economía. Datos en miles de pesos para el año 2009	53
Tabla 11. Total de remuneraciones al personal por municipio y sector de la economía. Datos en miles de pesos para el año 2009.....	53
Tabla 12. Procesos eruptivos generadores de flujos pirodásticos en volcán de Colima 1576 – 2001.....	54
Tabla 13. Fases que constituyen el comportamiento cíclico del Volcán de Colima. Modificado de Luhr <i>et al</i> (1990) y Luhr (2002)	56
Tabla 14. Alcances máximos de los flujos pirodásticos generados durante la fase II propuesta por Saucedo (1997)	59
Tabla 15. Volúmenes de material depositados por flujos pirodásticos en cada una de las barrancas calculados por Saucedo <i>et al</i> (2010)	64
Tabla 16. Rangos, dasificación cualitativa y colores utilizados para representar el IVP	86
Tabla 17. Valores unitarios de terreno y construcción por municipio (valores promedio)	87
Tabla 18. Valores catastrales por inmueble por municipio (valores promedio)	88
Tabla 19. Inversión nacional en infraestructura vial de 2002 a 2009 (valores promedio)	89
Tabla 20. Inversión nacional en infraestructura eléctrica de 2006 a 2010 (valores promedio).....	89
Tabla 21. Estadísticas de producción agrícola para el año 2010	90
Tabla 22. Promedio de producción por unidad económica, municipio y sector de la economía, datos para 2009 (Fuente: Directorio estadístico nacional de unidades económicas (INEGI, 2010b)	91
Tabla 23. Rangos, dasificación cualitativa y colores utilizados para representar el RE.....	92
Tabla 24. Rangos, dasificación cualitativa y colores utilizados para representar el IRT	93
Tabla 25. Resumen de alcances de avalanchas basales y ash cloud asociados a flujos pirodásticos	95
Tabla 26. UER con mayor valor de IVP_{EF}	102
Tabla 27. UER con mayor valor de IVP_{FS}	104
Tabla 28. UER con mayor valor de IVP_{FR}	106
Tabla 29. UER con mayor valor de IVP.....	108

Tabla 30. Evaluación de elementos emplazados en la zona de estudio	109
Tabla 31. UER con mayor valor de RE dentro de la zona de estudio	111
Tabla 32. UER con mayor valor de IRT dentro de la zona de estudio.....	113
Tabla 33. UER con mayor valor de IVP ubicadas dentro de los alcances de flujos piroclásticos	117
Tabla 34. Evaluación de elementos bajo amenaza por flujos piroclásticos en la zona de estudio	117
Tabla 35. UER dentro de los alcances de flujos piroclásticos con mayor valor de RE	119
Tabla 36. UER dentro de los alcances de flujos piroclásticos con mayor valor de IRT	120
Tabla 37. UER con mayor valor de IVP ubicadas dentro de los alcances de lahares	123
Tabla 38. Evaluación de elementos bajo amenaza de lahares en la zona de estudio	123
Tabla 39. UER dentro de los alcances de lahares con mayor valor de RE	125
Tabla 40. UER dentro de los alcances de lahares con mayor valor de IRT	126
Tabla 41. UER con mayor valor de IVP ubicadas dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares	129
Tabla 42. Evaluación de elementos bajo amenaza de lahares en la zona de estudio	129
Tabla 43. UER dentro de los alcances de lahares con mayor valor de RE	131
Tabla 44. UER dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares con mayor valor de IRT	132

Agradecimientos

Es tanta la gente que me apoyó para llevar a buen fin esta tesis que considero que el espacio disponible para externar mi agradecimiento es demasiado reducido, no obstante, espero que las palabras me alcancen para hacer extensivo mi enorme gratitud a las personas que con su presencia o ausencia me ayudaron a lograr esta meta.

En primer lugar, deseo agradecer a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí** por brindarme el espacio necesario para llevar a cabo esta investigación, por proporcionarme los insumos necesarios así como un lugar donde pudiese trabajar de forma cómoda, sin dejar de lado los apoyos brindados para poder salir de mi país y dar a conocer en el extranjero parte de los resultados obtenidos.

Al **Dr. Damiano Sarocchi**, por darme la oportunidad de trabajar con él, brindarme el apoyo necesario y la libertad para que avanzara a mi ritmo, pero sobre todo por tener la certeza de que no defraudaría su confianza y que trabajaría de manera intensa para lograr el objetivo. Sé que tenemos diferentes puntos de vista como consecuencia de nuestra formación académica, pero en esa diferencia hemos crecido como seres humanos e investigadores. Muchas gracias por ser mi amigo y guía en este proceso, gracias a su apoyo la conclusión de mi maestría han sido eficiente y espero que el resultado obtenido se encuentre a la altura de su calidad como persona y maestro. Mil gracias por todo.

Quiero agradecer al **Dr. Ricardo Saucedo** por estar al pendiente de mis avances, por enseñarme con gran paciencia y sobre todo por desafiar mis capacidades; gracias a esos retos soy consciente de que siempre hay formas de hacer bien las cosas, que nunca dejamos de aprender y que el camino puede ser difícil, pero la recompensa siempre vale la pena.

Al **Dr. Lorenzo Borselli** porque sin importar cuán ocupado se encuentre, siempre tuvo tiempo para escuchar mis dudas y sobre todo ayudarme a encontrar soluciones que lleven a mejor puerto mi trabajo; gracias por apoyarme e indicarme el camino para resolver los problemas que se presentaron a lo largo de la elaboración de esta tesis.

A la **Dra. Lucia Capra** que con su apoyo y comentarios me permitió delimitar los alcances de la tesis, gracias por enseñarme con paciencia el uso de herramientas que permitieron enriquecer los resultados obtenidos.

Al **Dr. Margarito Tristán**, a quien admiro profundamente y de quien nunca dejo de aprender, gracias por brindarme su apoyo en el ámbito personal y académico. Soy consciente de que siempre me ha deseado lo mejor y espero que con mi trabajo presente y futuro llegue a estar tan orgulloso de mí como lo estoy de saberle en mi vida. Me faltan las palabras para expresar el valor que doy a sus consejos y apoyo.

A la **Dra. Patricia Julio**, cuyo apoyo siempre ha ido más allá de la obligación. Agradezco que me haya enseñado el valor de la disciplina y constancia en la elaboración de un trabajo como este, asimismo gracias por sembrar en mí el deseo de continuar por estos caminos tan difíciles pero que a la larga nos llenan de regocijo. Es mi más grande deseo que sigamos trabajando en conjunto porque gracias a esas experiencias he crecido y espero que mi trabajo le llene de orgullo y felicidad. Un enorme abrazo y quiero que sepa que ha cambiado mi vida para siempre y para bien.

Al **Dr. Gerardo Palacio** con quien sólo he vivido lindas experiencias; gracias por escucharme en los momentos álgidos de indecisión y hacerme reír cuando era necesario; gracias a su apoyo he comprendido que mis metas pueden ser tan grandes o pequeñas como lo sean mis sueños y sobre todo por apoyarme cuando lo he necesitado.

A mis queridos amigos, **Yazmin Temblador, Anahid Cruz, Sonia Rivera, Gabriela Peralta, Guadalupe Rodríguez, Israel Huerta, Ismael Cardona, Edgar Ávila, Claudia González, Susana Padrón, Rodrigo González, Israel Rodríguez, Fabián Hernández, Juan Antonio Camarillo, Maricarmen Zapata, Marco Costilla, Edgar Gregorio Leija** y tantos más que sería imposible mencionarlos a todos; les agradezco su apoyo y aliento, pero sobre todo la paciencia para comprender mis ausencias y a pesar de las cuales seguir siendo tan amigos como siempre. Con ustedes he comprendido que una de las formas más puras de amor es la amistad.

Como olvidar a **Daniel Cortés** quien ha sido mi compañero durante este proceso, sin tu apoyo no lo hubiera logrado, gracias por ser mi amigo y brindarme la certeza de que puedo contar contigo de forma incondicional. Tu compañía me permitió hacer a un lado la soledad que me acompaña, gracias por comprender mis cambios y a pesar de ellos persistir a mi lado, te quiero profundamente y deseo que tu vida sea tan buena como ha sido tu presencia en la mía. Recuerda que nadie tenemos el destino manifiesto, que nosotros lo construimos con nuestras acciones u omisiones, es sólo cuestión de trabajar para lograr nuestros objetivos; el mundo es tan grande o tan pequeño como los sueños que tengas por realizar.

Para finalizar, agradezco a mi mamá por hacer de mí una persona persistente y sobre todo exigente con mi trabajo; te quiero y extraño mucho.

Gracias a todos, sin ustedes simple y sencillamente sería nada. Con todo mi cariño y respeto

Azalea Ortiz

Resumen

El volcán de Colima es considerado por diversos autores como el más activo del país con ~52 eventos eruptivos – de diferente magnitud – a lo largo de 400 años de registro histórico (Luhr *et al.*, 1990, Komorowski *et al.*, 1997, Bretón *et al.*, 2002, Saucedo *et al.*, 2005). A lo largo del ciclo eruptivo descrito por Luhr *et al.* (1980, 1990) y Robin *et al.* (1987, 1991) entre otros, la actividad que presenta mayor amenaza para la población asentada en las inmediaciones es sin duda la actividad explosiva; de ésta, la erupción de 1913 se considera la más severa, razón por la cual sus alcances son considerados como parámetro de referencia en estudios de riesgo y vulnerabilidad asociados al volcán (Saucedo *et al.*, 2010).

El análisis del riesgo, implica el estudio de la relación entre el alcance de los fenómenos naturales – amenaza – las características sociales – vulnerabilidad – y la magnitud de pérdidas económicas potenciales – riesgo específico – que al confluir en un área determinada adquieren una dimensión espacial que puede ser identificada y tipificada con base en las características que emanan de dicha relación.

El área de estudio se delimitó con base en los alcances de los fenómenos volcánicos relacionados con la erupción de 1913 y la caracterización de este espacio se realizó por medio del cálculo del Índice de Riesgo Total (IRT) que se compone de dos elementos principales: La vulnerabilidad, expresada por medio del Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP) que refiere las características socioeconómicas de la población y el Riesgo Específico (RE) que engloba las pérdidas monetarias potenciales de los espacios bajo amenaza. Ambos elementos se conjugan bajo la siguiente expresión matemática:

$$IRT = RE_N * (1 + IVP)$$

La fórmula previa se aplicó al área de estudio que fue dividida en hexágonos regulares, denominados unidades espaciales de referencia (UER), cuya dimensión areal se definió en 1 km². El teselado en polígonos regulares se realizó en atención a que los datos disponibles para el análisis físico, social y económico se encontraban en diferentes formatos vectoriales (puntos, líneas y polígonos) que por separado no permitían el análisis espacial. Del teselado resultaron 1,124 UER que funcionaron como celdas en donde se contabilizaron las características específicas como población, vivienda, edificaciones, espacios productivos, escuelas, etc.

Se realizaron dos tipos de análisis; el primero con el total de las UER, el segundo sólo de aquellas ubicadas en los alcances de las amenazas: flujos piroclásticos, lahares y donde confluyen ambos. Los resultados obtenidos indicaron que el importe del RE asciende a \$30,050 millones de pesos en el caso del análisis general; \$9,790 millones de pesos para los espacios bajo amenaza de flujos piroclásticos, \$2,340 millones de pesos en zonas con amenaza de lahar y \$1,680 millones de pesos en áreas donde confluyen ambos fenómenos volcánicos.

Con respecto al IVP, se identificaron los espacios rurales como Tlajomulco y Rancho Santa Rosa, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco; La Yerbabuena, El Jabalí y La Becerrera, Comala, Colima, como aquellos espacios donde las características socioeconómicas como pobreza y marginación pueden exacerbar los efectos de los fenómenos naturales con potencial peligroso.

La combinación de ambos elementos da como resultado el IRT que permitió señalar a las áreas circunscritas en las UER228, UER480 y UER569 como aquellos con mayor valor de índice relacionado con la infraestructura, producción económica y población dispuestas en ellas.

El análisis de los procesos volcánicos desde la perspectiva que se propone en la presente investigación permite involucrar a la sociedad como un ente activo cuya dinámica y procesos históricos y económicos modifican los efectos de fenómenos peligrosos que inciden en el territorio; esta manera holística de incluir diversos elementos (físicos, sociales y económicos) coadyuva al traslado de la visión del riesgo: de una perspectiva en la cual fenómenos extraordinarios inciden en sociedades pasivas y una donde sociedades en diversos estadios de crisis que enfrentan fenómenos naturales que no son afectadas por eventos previsibles y “normales”.

Introducción

La relación sistémica entre sociedad y naturaleza se desarrolla en espacios geográficos con particularidades específicas; entre las diversas características emergentes que resultan de dicha relación surge el concepto de riesgo. Este concepto ha tenido diferentes acepciones a lo largo de las investigaciones sobre el particular, desde aquellas que igualan el riesgo a la amenaza hasta aquellas que involucran las características sociales como un elemento primordial dentro de los modelos conceptuales del riesgo y generación de desastres.

La investigación que a continuación se presenta tiene como objetivo primordial calcular el índice de riesgo total asociado a lahares y flujos piroclásticos ocasionados por un evento similar al ocurrido en 1913 – evento utilizado como referencia – en volcán de Colima a través de la estimación del índice de vulnerabilidad prevalente y riesgo específico vigente en los espacios con potencial de afectación. A través del cálculo de estos indicadores fue posible señalar aquellos espacios donde confluye infraestructura susceptible a sufrir daños, características sociales que incrementan la vulnerabilidad y los alcances de fenómenos peligrosos provenientes del volcán.

El objetivo general se logró por medio del cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar estudios previos que versan sobre la actividad del volcán de Colima y evaluación de riesgo y vulnerabilidad.
2. Identificar y caracterizar los espacios con potencial de afectación por flujos piroclásticos y lahares ocasionados por un evento eruptivo similar al de 1913 considerando tanto los aspectos físicos como sociales y la relación entre sí.
3. Calcular el Riesgo específico (RE), Índice de vulnerabilidad prevalente (IVP) e Índice de riesgo total (RT) para cada uno de los espacios identificados en el objetivo anterior.
4. Caracterizar las zonas bajo amenaza con base en los indicadores estimados y calcular el monto de las afectaciones.

A lo largo de los cinco capítulos que constituyen la tesis, se realizó el análisis holístico de las características sociales y pérdidas económicas dentro de los espacios susceptibles de amenaza. El IVP, RE e IRT, que emanan de la metodología propuesta por Cardona (2005), fueron

calculados para cada una de las unidades espaciales de referencia en las cuales se dividió la zona de estudio. El uso de las unidades espaciales de referencia coadyuvó a la homogenización del espacio y por tanto el análisis comparativo; gracias a ello se pudo calcular un estimado de pérdidas por daño a infraestructura así como espacios con mayor vulnerabilidad.

La importancia del presente trabajo radica en el uso de técnicas de análisis espacial geográfico para calcular y señalar espacios donde coinciden tanto características sociales como pérdidas económicas generadas por alcances de fenómenos naturales, en este caso, volcánicos. De hecho, el presente trabajo es pionero en el manejo y aplicación de las metodologías propuestas, porque si bien, se han generado trabajos sobre amenaza y riesgo en otros volcanes hasta el momento no se han considerado las características socioeconómicas para identificar la distribución espacial de la vulnerabilidad y por tanto riesgo.

Por mencionar un ejemplo, el volcán Popocatepetl desde su reactivación en 1994 ha sido estudiado por Marcial (1996), De la Cruz, López *et al* (2008), López (2008, 2009), Martín del Pozzo *et al* (2008), Muñoz *et al* (2010), Tobin *et al* (2010), por mencionar sólo algunos, quienes abordan la problemática del riesgo y amenaza volcánica desde diversas perspectivas pero ninguna con un análisis holístico de las características socioeconómicas de las poblaciones asentadas en los espacios aledaños.

La existencia de mapas de riesgos para volcanes como el Chichón publicado por Macías *et al* (2008), muestra la distribución espacial de los fenómenos volcánicos ocurridos durante la erupción, no obstante deja de lado el análisis de las características sociales que pueden y exacerbaban los efectos de dichos fenómenos.

Con base en lo anterior, la presente investigación busca que el concepto de riesgo trascienda el enfoque de los procesos y mecanismos naturales y considere los factores económicos y sociales que construyen la vulnerabilidad e incluir las capacidades de los grupos sociales de enfrentar y reponerse a las afectaciones de una amenaza, en este caso de origen volcánico.

Capítulo 1. Actividad volcánica y riesgo: elementos, clasificación e interacción en el espacio geográfico

1.1. Actividad volcánica: origen y clasificación del proceso físico

La Tierra es un sistema dinámico que muestra de forma continua su desarrollo y evolución a través de diversos procesos endógenos y exógenos los cuales modifican y modelan la superficie terrestre. A través de estos procesos se forman valles, montañas, llanuras, océanos e islas que cambian a lo largo del tiempo geológico.

El vulcanismo es uno de los procesos endógenos que es definido como la manifestación en la superficie del planeta de los procesos térmicos internos a través de la emisión de productos sólidos, líquidos y gaseosos (Francis *et al*, 2004); por medio de este proceso es posible apreciar el flujo de materia y energía del interior a la superficie del planeta; los volcanes son estructuras geológicas por medio de las cuales emerge magma y gases provenientes de las capas internas del planeta y, según Schmincke (2004), constituyen la prueba de nuestra estancia en un planeta vivo.

El proceso volcánico guarda una estrecha relación con la dinámica de las placas tectónicas, de hecho, el mayor número de volcanes se ubica a lo largo de los bordes formando arcos volcánicos continentales u oceánicos, como el denominado “Cinturón de Fuego” localizado alrededor del océano Pacífico (Perfit *et al*, 2000).

Con base en la teoría de la Tectónica de Placas, que constituyó el cambio más importante dentro del paradigma geológico, Williams *et al* (1979) han clasificado el vulcanismo a partir del ambiente tectónico en que se desarrolla; agrupan así la actividad volcánica del planeta en los ocho contextos (Figura 1), los cuales presentan características de producción lítica, origen, morfología y estratigrafía particular que permiten diferenciarlos entre sí:

Ambiente tectónico regional	Tipo de vulcanismo
Divergente	1. Vulcanismo de dorsales mediooceánicas donde se produce expansión del fondo marino
	2. Vulcanismo en las cuencas tras-arco, inter-arco y en los mares marginales que separan a los arcos de islas de los continentes
	3. Vulcanismo de rift continental
Pasivo	4. Vulcanismo intra-placa oceánica
	5. Vulcanismo intra-placa continental
Convergente	6. Vulcanismo en islas oceánicas jóvenes asociado a procesos de subducción
	7. Vulcanismo de micro-arcos continentales asociados a procesos de subducción
	8. Vulcanismo de arcos continentales asociados a procesos de subducción

Fuente: Williams *et al* (1979)

Figura 1. Clasificación del vulcanismo con base en el ambiente tectónico en el cual se desarrolla

Si bien el marco tectónico permite agrupar los procesos volcánicos en las ocho categorías dispuestas con antelación, el comportamiento eruptivo, que está determinado por los procesos de generación, fuente y composición química del magma que es extruido (Schmincke, 2004) es más difícil de clasificar. Los procesos eruptivos se presenta en una diversa gama de comportamientos que van desde eventos efusivos a explosivos, el periodo de tiempo de la erupción puede ser de días o meses y un mismo volcán puede presentar erupciones con características diferentes; es por ello que son procesos complejos (Francis *et al*, 2004).

1.1.1. Clasificación y comportamiento reológico de los magmas

Previo a la descripción de los tipos de erupción, es necesario realizar un breve recuento de las características de los magmas involucrados y cómo determinan el comportamiento de un volcán.

La efusividad y explosividad de una erupción se encuentra relacionado de manera directa con las propiedades físicas y químicas del magma (Cas *et al*, 1987). Con base en estas características, el comportamiento reológico del magma puede variar de fluir como un cuerpo coherente de roca a ser expulsado de forma violenta y explosiva (Francis *et al*, 2004). Entre los elementos que determinan el comportamiento reológico de los magmas Cas *et al* (1987) mencionan los siguientes: temperatura, densidad, viscosidad y resistencia a fluir.

Para realizar un resumen del comportamiento reológico de los magmas, en primer término es necesario presentar una tipificación de éstos. Una de las clasificaciones se hace con base en la presencia porcentual de SiO₂ en el peso total del magma o la roca resultante como a continuación se muestra (Le Maitre, 2002):

- Magmas ácidos: con porcentajes de SiO₂ superiores al 63%; las rocas resultantes pueden ser riolitas o dacitas.
- Magmas intermedios: con porcentajes de SiO₂ entre 52% y 63%; este tipo de magma conforma las rocas andesíticas y basáltico andesíticas.
- Magmas básicos: con porcentajes de SiO₂ 45% y 52 %; los basaltos corresponden a este grupo.
- Magmas ultra básicos: con porcentajes de SiO₂ inferiores al 45%; este tipo de magmas conforman las rocas picrobasálticas.

Con base en la clasificación anterior, en la tabla 1 se presentan los principales elementos que determinan el comportamiento reológico y cómo éstos varían con dependencia del tipo de magma involucrado en el proceso volcánico (Cas *et al*, 1987).

Tabla 1. Elementos involucrados en el comportamiento reológico de los magmas y su variación con base en la clasificación química de éstos.

Elemento	<i>Magmas de tipo</i>			
	Ultra básico <i>(Picrobasaltos)</i>	Básico <i>(Basaltos)</i>	Intermedios <i>(Andesitas)</i>	Ácidos <i>(Riolitas y Dacitas)</i>
1. Temperatura del magma al ser expulsado ●	Alta (~1000° a 1200°C)			Baja (~700° a 900°C)
2. Densidad ●	Alta (~2.8 $\frac{g}{cm^3}$)			Baja (~2.2 $\frac{g}{cm^3}$)
3. Viscosidad ●	Baja ~10 ³ poise			Alta ~10 ¹⁵ poise
3.1 Contenido de volátiles ●	Baja			Alta
3.2 Contenido de cristales ●	Baja			Alta
3.3 Contenido de burbujas ●	Baja			Alta
4. Resistencia a fluir ●	Baja			Alta
Tipo de erupción	Efusiva			Explosiva

A continuación se describirán los diferentes tipos de erupciones, las cuales comenzarán con las más efusivas hasta llegar a las más explosivas.

1.1.2. Tipos de erupciones

Cas *et al* (1987), Francis *et al* (2004), Sato *et al* (1992) y Schmincke (2004) describen los diferentes tipos de erupciones; esta clasificación se basa en elementos cualitativos y cuantitativos de registros históricos con desarrollo puntual; las características de cada una de las clasificaciones se observaron por primera vez en un volcán tipo que sirve como parámetro para identificar las particularidades.

1. ***Fumarólica y difusión de gases:*** emisión difusa de gas (SO₂, CO₂, Radón, etc) a través de un área; no involucra la emisión de lava, pero se supone que el calor y el gas provienen de cuerpos magmáticos profundos que aportan los elementos exhalados en este tipo de actividad.
2. ***Actividad Hawaiana:*** Toma en nombre de los volcanes emplazados en las islas Hawaianas y se caracteriza por erupciones efusivas de magma a muy altas temperaturas (más de 1000°C) de composición basáltica y con muy poca cantidad de volátiles disueltos.
3. ***Lagos de lava:*** Consiste en la acumulación de lava muy fluida a altas temperaturas en una depresión o cráter. A pesar de estar relacionada con la actividad Hawaiana, no sólo en el volcán Kilauea se presenta este tipo de actividad; en Etiopía se localiza en Erta Ale, en la Antártida en el cráter del Monte Erebus y en el corazón de África el Nyiragongo acumula en ocasiones un lago de lava.
4. ***Actividad Estromboliana:*** consiste en una actividad intermitente de explosiones discretas y eyección de piroclastos balísticos a pocas decenas de metros por el aire; las erupciones se presentan a intervalos regulares, son más sonora que la actividad Hawaiana y los fragmentos líticos que forman la columna eruptiva son tan finos que se dispersan de forma rápida; la lava de composición basáltica presenta valores aproximados en densidad de 2.8 g/cm³, viscosidad de 10³ Pa s y contenido de H₂O no mayor al 1wt%; la principal característica que diferencia este tipo de actividad de la Hawaiana es la velocidad de ascenso del magma y la relación de esta velocidad con la formación de burbujas de gas; cuando la velocidad de ascenso es lenta, se facilita la generación de burbujas que al descompensarse y reventar aportan la energía necesaria para eyectar piroclastos; la velocidad de ascenso del magma en este tipo de erupción no sobrepasa los 0.5 m/s; cuando la velocidad se incrementa

(0.05 a 1.00 m/s) se forman las fuentes de lava. La actividad Stromboliana toma su nombre de un volcán emplazado en la isla italiana del mismo nombre ubicada entre la parte continental de Italia y la isla de Sicilia. Este tipo de actividad es común en los volcanes alrededor del planeta; se presenta en el Etna, en Italia, el Pacaya en Guatemala y el Monte Erebus en la Antártida, entre otros.

5. **Actividad Vulcaniana:** consiste en una actividad explosiva causada por la súbita descompresión de un cuerpo magmático; es de corta duración y poca magnitud (eyección inferior a 10^6 m^3) e involucra la destrucción de un domo de lava emplazado en el cráter; este tipo de actividad genera una columna eruptiva no sostenida inferior a 20 km la cual contiene poco material juvenil.

La explosividad de este tipo de erupción es superior a la estromboliana y llega a destruir de forma parcial el edificio volcánico; al involucrar más energía explosiva envía proyectiles de mayor tamaño a más distancia los cuales presentan la clásica “corteza de pan”. El tipo de lava más común es de composición intermedia (basalto andesitas, andesitas y dacitas), viscosa y con una mayor cantidad de volátiles disueltos que los presentes en tipos de erupción efusivas. También se asocia con actividad de tipo freatomagmático.

6. **Actividad Soufriere:** al igual que en el caso del tipo vulcaniano, este tipo de erupción involucra la destrucción total de un domo de lava emplazado, no obstante, el domo no es antiguo por ello la presencia de material juvenil es superior. La destrucción del domo obedece a la diferencia entre la presión del poro y la tensión superficial en donde la primera excede a la segunda en todo el cuerpo magmático originando una explosión vertical (Sato *et al.*, 1992).

La columna eruptiva no es sostenida y colapsa por las vertientes del volcán en forma de flujos piroclásticos de bloques y cenizas que rellenan las depresiones topográficas.

7. **Actividad Peléana:** al igual que en el caso anterior, este tipo de erupción se produce por la destrucción de un domo de lava que aporta el material juvenil; la diferencia radica en que la destrucción del domo de lava es parcial, es decir, la presión de poro excede a la tensión superficial en una parte del domo, esto genera

explosiones dirigidas de forma lateral que generan flujos piroclásticos inmediatos (Sato *et al.*, 1992)

8. **Actividad Merapi:** consiste en el colapso gravitacional del domo de lava emplazado en el cráter; en este caso, la tensión superficial es superior a la presión de poro, por ello partes del domo fluyen como cuerpos coherentes de roca pendiente abajo. Durante el descenso, la lava comienzan a fragmentarse y facilita la desgasificación que genera los flujos de bloques y ceniza que descienden por las laderas del volcán (Sato *et al.*, 1992).
9. **Actividad Pliniana:** consiste en eventos sostenidos de alta energía en los cuales un flujo turbulento de magma fragmentado y gas es liberado a través del conducto abierto a la atmósfera. La energía de este tipo de actividad depende de diversos factores como la viscosidad y presencia de agua en el magma. La composición de los magmas involucrados oscila entre dacitas y riolitas cuyos valores promedio son: temperatura de 850°C, densidad 2.3 g/cm³, contenido de H₂O superior a 5wt% y viscosidad de 10⁵ Pa s.

La magnitud es superior a 4 (eyectan masa por 10¹¹ – 10¹³ Kg; en la escala de magnitud (M) corresponde a un evento clase 4 a 6) y la velocidad con la cual eyecta los fragmentos puede llegar a 600 m/s. El volumen de los depósitos asociados oscila en el rango de 0.1 a más de 50 km³; producen poderosas columnas eruptivas que presentan procesos de convección dentro de sí y alcanzan más de 35 km de altura que penetran en la estratósfera.

El colapso de la columna eruptiva genera flujos piroclásticos y depósitos asociados a éstos; no obstante, al ser una actividad sostenida, también produce depósitos de caída. La evacuación del reservorio magmático genera procesos de subsidencia en el terreno que forma calderas de varios kilómetros de diámetro.

La actividad pliniana cuenta con dos sub-tipos diferenciados con base en la energía involucrada:

- **Actividad Sub-Pliniana o Vesubiana:** es de menor energía que la pliniana pero los mecanismos y la dinámica es similar; Las columnas eruptivas alcanzan una altura inferior a los 30 km, son sostenidas y los productos se dispersan en espacios no superiores a los 500 km².

La cantidad del material arrojado es de 10^{11} Kg ($M=4$) aproximadamente y las velocidades a las cuales es eyectado el material piroclástico no superan los 400 m/s.

- **Actividad Ultra-Pliniana:** este concepto abarca aquellas erupciones de mayor magnitud que la pliniana en *sensu stricto*. Este tipo de proceso eruptivo genera columnas superiores a los 45 km y no se han presentado en tiempo histórico; no obstante, se han realizado estudios en el área de Taupo al norte de Nueva Zelanda donde se presentó actividad eruptiva que desarrolló una columna superior a los 50 km y cubrió con ceniza un área de más de 15,000 km².

Toda actividad eruptiva, sin importar las características en su comportamiento, genera una diversidad de productos entre los cuales cabe destacar los flujos piroclásticos y lahares (Cas *et al*, 1987); se hace énfasis en estos productos volcánicos porque constituyen el peligro a analizar en la presente investigación, no obstante existen muchos otros como las coladas de lava, avalanchas de detritos y caídas de ceniza entre otros.

1.1.2. Flujos piroclásticos

El flujo piroclástico es una mezcla caliente de gas y partículas volcánicas que fluyen ladera abajo y están constituidos por fragmentos de pómez, líticos, lava y material vítreo; el flujo es controlado por la topografía y tiende a rellenar las depresiones (Schmincke, 2004).

Schmincke (2004) y Cas *et al* (1987) definen las tres partes que componen el flujo piroclásticos (Figura 2):

- A. Una oleada que precede al flujo, el cual es de baja concentración y se mueven de forma rápida y turbulenta
- B. Una compacta avalancha basal de bloques grandes

C. Una nube ondulante de gases calientes y partículas finas de ceniza que son extraídas del cuerpo basal por elutriación y se puede elevar decenas de kilómetros en la atmósfera

La parte basal (B) tiende a fluir por las partes bajas de la topografía en

tanto la onda expansiva (A) que antecede el flujo y el material que se encuentra sobre la avalancha (C) pueden ampliar su volumen de forma tal que cubren los altos

topográficos con vientos ardientes que superan los 300 km por hora (Schmincke, 2004)

Cas *et al* (1987) establecen que los flujos piroclásticos se originan por dos mecanismos: colapso gravitacional de un frente de lava o domo y colapso de la columna eruptiva. En el primer caso, una parte del domo o flujo de lava se vuelve inestable debido al crecimiento o avance y ocasiona que parte del material se desprenda de forma explosiva o por gravedad; en el segundo caso, la densidad de la columna eruptiva es superior a la atmósfera que le rodea lo que ocasiona que la columna se desplome y forme un flujo piroclástico.

Las altas temperaturas y las velocidades que distinguen el comportamiento de este fenómeno lo convierte en uno de los objetivos primordiales en las investigaciones científicas ya que constituye uno de los mayores peligros volcánicos (Schmincke, 2004)

1.1.2.1. Características de los depósitos

Existen diversos modelos que explican las características de los depósitos generados por un flujo piroclástico; uno de ellos, propuesto por Sparks *et al* (1973) divide los depósitos en unidades de flujo diferenciadas por las capas que se forman al emplazarse de un flujo piroclástico; otro, propuesto por Branney *et al* (1992) que evoca el proceso de agradación o

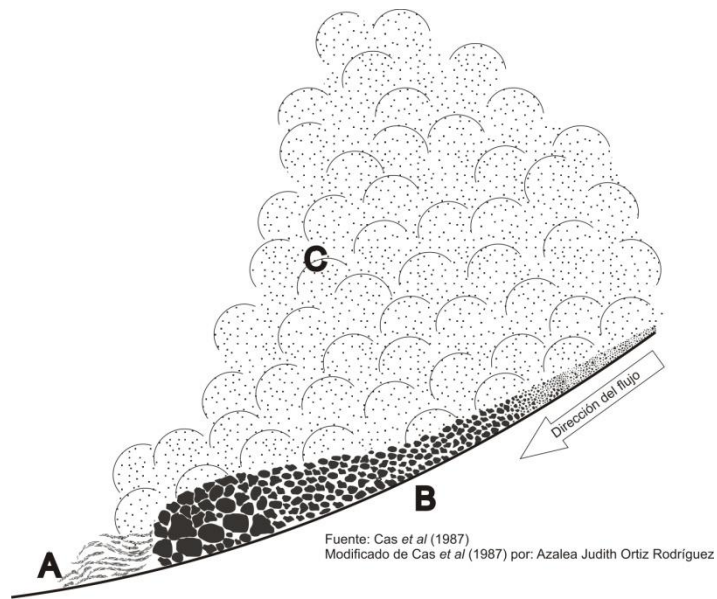


Figura 2. Estructura de un flujo piroclástico

El diagrama muestra los tres elementos que componen un flujo piroclástico: La oleada de fragmentos finos diluidos que antecede el flujo (A), la avalancha compacta de bloques grandes que constituye la unidad de flujo (B) y la nube de fragmentos finos de pómez que tiende a viajar sobre la avalancha (C)

depósito continuo. Ambos modelos presentan ventajas y desventajas al momento de explicar en campo los depósitos resultantes.

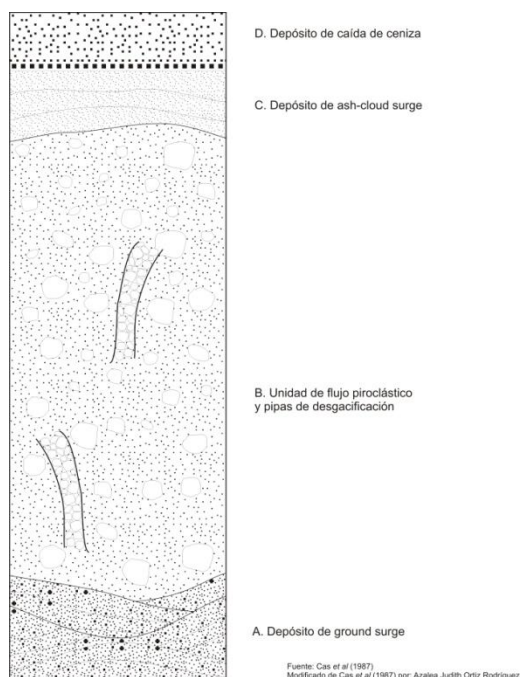


Figura 3. Esquema de un depósito de flujo piroclástico

El depósito de un flujo piroclástico se divide en cuatro horizontes cuyo origen corresponde a cada uno de los tres elementos de un flujo piroclástico mostrados en la figura 2.

pómez y líticos de mayor tamaño embebidos en una matriz de ceniza, suele ser un depósito masivo y la selección de los clastos semi-angulosos es pobre. Otra característica importante, además de fragmentos vegetales carbonizados, es la presencia de pipas de desgasificación evidentes por la concentración de fragmentos gruesos soportados clasto a clasto; lo anterior obedece al arrastre de los fragmentos finos durante el escape de los gases del depósito (Cas *et al*, 1987).

Los horizontes C y D de la figura 3 corresponden al depósito de la nube de ceniza que se forma por elutriación de la unidad de flujo durante su desplazamiento (Figura 2, C). El primero está constituido por ceniza fina que se deposita clasto a clasto en una estratificación cruzada, al ser muy diluida, tiene también la capacidad de remontar barreras topográficas (Sparks, 1976); el segundo corresponde a un depósito de caída, los fragmentos son más finos que el horizonte C y se encuentran clasto soportados, presentan una gradación normal y los

En consideración con el modelo de unidades de flujo, los depósitos de un flujo piroclástico se componen de diversas unidades cuya división la constituye el depósito de ground surge (Figura 3, A) que subyace al conjunto (Sparks *et al*, 1973). El horizonte A es generado por la oleada que antecede al flujo piroclástico (Figura 2, A). Esta capa presenta unos pocos centímetros de espesor mismo que varía; es rica en fragmentos líticos con formas semi-angulosa e importantes diversidad de tamaño y selección; la estratificación es cruzada y los contactos son erosivos (Sparks *et al*, 1973). Al ser muy diluida y de gran movilidad, tiene la capacidad de remontar barreras topográficas (Sparks, 1976).

El horizonte B (Figura 3) constituye la unidad de flujo piroclástico (Figura 2, B); las características de este depósito es la riqueza en

contactos no son erosivos (Sparks *et al.*, 1973); ambos horizontes corresponden a lo denominado por Cas *et al.* (1987) como coignimbrita.

1.1.3. Lahares

Los procesos de erosión y transporte del material suelto en las laderas de un volcán, denominados procesos epiclásticos, constituyen la mayor fase de actividad en áreas volcánicas. Este tipo de procesos basan su importancia no sólo en la duración que tienen sino en el volumen de material que transportan (Cas *et al.*, 1987).

Entre los diversos procesos epiclásticos se encuentran los lahares (Cas *et al.*, 1987, Pierson *et al.*, 1987). Lahar es una palabra indonesia que se refiere a un flujo de agua mezclado con fragmentos de roca de origen volcánico de diferentes tamaños el cual fluye por acción de la gravedad en las laderas de un volcán. El término es utilizado para referirse al proceso físico y no al depósito (Smith *et al.*, 1989).

Los lahares se forman por una súbita liberación o precipitación de agua la cual se encarga de arrastrar los sedimentos poco consolidados en las laderas de un volcán; con base en el momento en que ocurren se clasifican en: primarios (sin-eruptivos) cuando suceden a la par de una erupción volcánica o en periodos cercanos a ésta, o en secundarios (post-eruptivos) cuando ocurren tiempo después de una erupción (Sarocchi, 2006, Vallance *et al.*, 1997, Vallance, 2000).

Sólo se le denomina lahar a la removilización de material de origen volcánico; a los procesos de remoción de sedimentos fuera de un volcán se les denomina de formas diferentes. Por tanto, se forma un lahar cuando capas de sedimentos poco consolidados se saturan por la lluvia y de esta manera se propicia su movilización pendiente abajo o cuando material piroclástico funden los glaciares emplazados en el edificio volcánico y el agua liberada asimila el material suelto durante su flujo (Schmincke, 2004).

Para que un lahar se genere es necesario una adecuada fuente de agua, abundantes sedimentos poco consolidados, pendientes y un mecanismo de disparo (Vallance *et al.*, 1997, Francis *et al.*, 2004). Entre los mecanismos de disparo más comunes están: precipitaciones pluviales intensas, sismos, erupciones volcánicas o eventos antropogénicos. Estos sencillos elementos pueden conjugarse en cualquier momento y formar ríos de lodo que viajan a decenas de kilómetros de la fuente por los cauces de corrientes existentes (Tarbuck *et al.*, 2005)

Un lahar puede llegar a producirse aun si el volcán no se encuentra en una fase eruptiva (Tarbuck *et al*, 2005), este comportamiento hace que los lahares sean considerados, junto con los flujos piroclásticos, uno de los fenómenos volcánicos que más fatalidades humanas ha generado a lo largo de la historia (Schmincke, 2004). De acuerdo a Pierson *et al* (1987) los lahares se tipifican con base en la proporción entre el sedimento y agua según se muestra en la figura 4.



Figura 4. Clasificación de lahares

La clasificación de los lahares se realiza con base en la proporción de sedimentos arrastrados relacionados con el volumen total del flujo así como la presencia de arcillas; las características de los materiales removilizados da como resultado depósitos con particularidades de origen y tamaño (Iverson, 1997, Bovis and Jakob, 1999, De Riso et al., 1999, Gabet and Dunne, 2002, Vallance, 2005).

Los flujos de escombros son una mezcla de sedimentos mal clasificados y agua que deben su energía cinética a la fuerza de gravedad que los mueve pendiente abajo a través de la cual fluye con una consistencia similar a una mezcla de concreto (Sarocchi, 2006). Presentan una proporción de sedimentos con respecto al volumen total del flujo entre 47% y 77% y a su vez se caracterizan en cohesivos y no cohesivos con base en la cantidad de arcilla presente; para el primer caso, el contenido de arcilla es superior al 3% - 5% del volumen total del flujo; para los flujos no cohesivos, el volumen de arcilla es inferior al mencionado (Pierson *et al*, 1987, Costa, 1988, Smith *et al*, 1989, Kurdin, 1973, Pierson *et al*, 1985)

Por otro lado, los flujos hiperconcentrados presentan una concentración inferior de sedimentos (20% - 47%) y su régimen de flujo es turbulento, es decir son más diluidos que los flujos de escombros referidos con antelación (Hungry, 2005). Pueden formarse a partir de flujos normales de agua que asimilan sedimentos del cauce o cuando en los flujos de escombros disminuye su capacidad de carga y comienza a perder sedimentos gruesos (Pierson *et al*, 1985, Pierson, 1986, Cronin *et al*, 1999, Cronin *et al*, 2000). Un flujo hiperconcentrado puede derivarse de un flujo de escombros siempre y cuando el flujo recorra una distancia suficiente para que la transformación ocurra y que la presencia de arcilla sea pobre (Pierson *et al*, 1985)

Un flujo ideal puede dividirse en componentes horizontales y verticales. En la primera disposición, Pierson (1986) identifica tres partes básicas (Figura 5a):

1. **Cabeza:** alta concentración de material grueso que se acumula al frente y a los márgenes lo cual proporciona resistencia al movimiento y depósito
2. **Cuerpo:** flujo de escombros en *sensu stricto*
3. **Cola:** concentración de sedimentos inferior y puede generar un flujo hiper concentrado

En la componente vertical, Sarocchi (2006) refiere tres capas del flujo ideal (Figura 5b):

1. **Carpeta de tracción:** elevada concentración de clastos sometidos a importantes esfuerzos de cizalla, abrasión y rompimiento; en este nivel el tipo de flujo se comporta de forma laminar.
2. **Zona de arrastre:** presenta una concentración intermedia de sedimento entre la carpeta de tracción y la zona superior. En esta sección tiene la capacidad de acarrear grandes fragmentos de roca los cuales empuja hacia el frente del flujo debido a que se desplaza a una mayor velocidad que la capa inferior.
3. **Suspensión de baja densidad:** corresponde al nivel más superficial y es una capa diluida que a lo largo del transporte alimenta a la carpeta de tracción de clastos gruesos como consecuencia de la fuerza de gravedad.

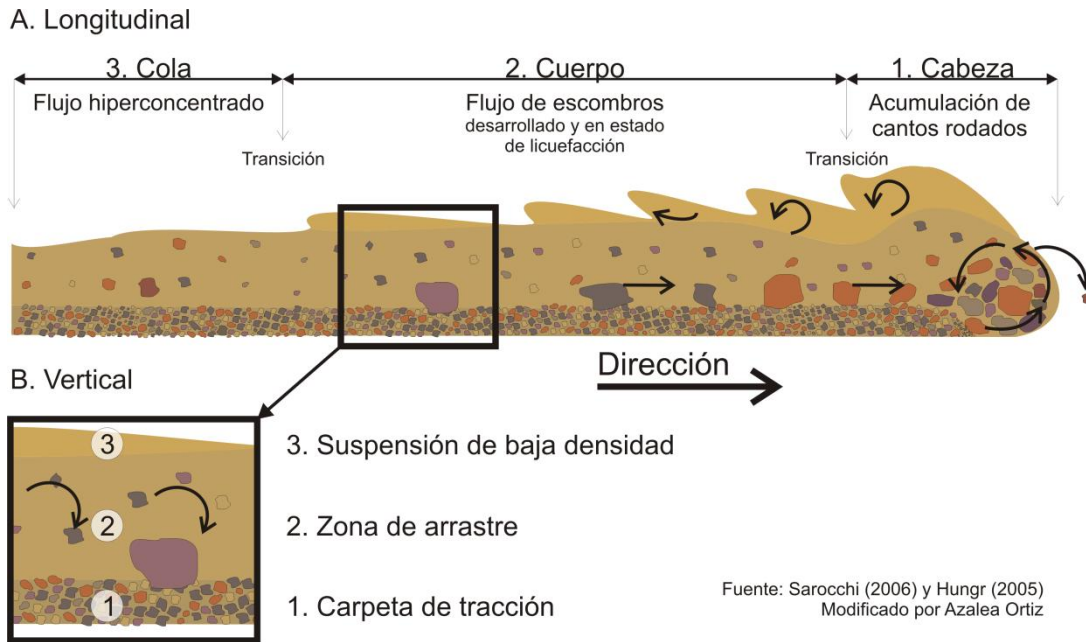


Figura 5. Secciones longitudinal y vertical de un flujo de lahar

Un flujo de lahar ideal consta de tres unidades básicas en la componente horizontal (Pierson, 1986): Cola, cuerpo y cabeza mismos que se movilizan pendiente abajo como respuesta a la fuerza de gravedad. Muchos flujos de escombros se originan a partir de la incorporación de material suelto de los cauces de los ríos (Vallance, 2005). Las secciones en la componente vertical son: 1) carpeta de tracción, 2) zona de arrastre que se moviliza con mayor velocidad y arrastra fragmentos de roca concentrándolos en la cabeza o empujándolos hacia los bordes, de esta forma se generan los levees laterales y 3) Suspensión de baja densidad

1.1.3.1. Características de los depósitos

En el caso de los flujos hiperconcentrados, los depósitos se caracterizan por ser masivos o con visos de estratificación horizontal que presenta continuidad lateral a lo largo de varios metros (Costa, 1988). La gradación puede ser normal o inversa según la concentración de sedimento (Costa, 1988, Pierson *et al*, 1998). En la parte superior se concentran partículas finas que son arrastradas por la compactación; el diámetro de éstas varía entre arena media o gruesa a grava fina (Pierson *et al*, 1998). Los depósitos de flujos hiperconcentrados son más compactos que los resultantes del transporte fluvial, pero menos que aquellos que corresponden a los flujos de escombros (Pierson *et al*, 1998).

Por su parte, los flujos de escombros presentan depósitos compactos o no dependiendo si se trata de un flujo cohesivo o no cohesivo (Pierson *et al*, 1998). Se identifican pipas de drenaje y capas superficiales de limo y arcilla (Vallance, 2000). Los depósitos remanentes presentan Levees – al igual que los flujos piroclásticos y de lava – material grueso depositado en las márgenes y clúster que resultan de la acumulación de fragmentos gruesos a lo

largo del cauce. Los patrones de estratificación y contactos pueden ser diferentes según las características dinámicas del flujo y la topografía (Vallance, 2005).

El depósito puede ser masivo, cuando la velocidad del flujo es rápida; con gradación normal cuando la fuerza de gravedad genera la precipitación de los clastos grandes y la sedimentación de cada una de las partes del flujo (Vallance *et al*, 1997) y con gradación inversa cuando el flujo es de inicio diluido y con sedimentos finos y de forma progresiva asimila fragmentos más gruesos (Pierson *et al*, 1985). El contacto basal puede ser erosivo si el flujo presenta velocidad, o no erosivo si el flujo fue lento y el depósito gradual.

Los depósitos de flujo de escombros se encuentran soportados por una matriz o clasto a clasto; la selección es mala; no obstante ésta puede mejorar con la distancia o de la base a la parte superior del depósito; lo anterior obedece a la incorporación de material del sustrato, como arena y grava, cuya selección es buena (Vallance *et al*, 1997).

1.2. El riesgo: Relación de los grupos sociales con los fenómenos naturales y construcción del concepto

Si bien la actividad eruptiva representa un peligro para la sociedad, los beneficios que ésta obtiene de los procesos volcánicos han favorecido la ocupación persistente de zonas donde dichos procesos tienen injerencia (Schmincke, 2004). Sumado a lo anterior, el incremento poblacional fuerza el desplazamiento de personas hacia terrenos volcánicos donde los suelos fértiles favorecen la productividad agrícola y por tanto garantizan la provisión de alimentos (Grattan *et al*, 2007)

Esta ocupación continua de espacios con actividad volcánica ha generado una impronta cultural expresada a través de respuestas creativas como los procesos de recolonización; la creación de material cultural (historias, mitos y tradiciones orales); el intercambio social con otras poblaciones; la concepción del espacio y los diversos patrones de uso de suelo (Chester *et al*, 2007, Torrence *et al*, 2007). Asimismo, la relación sistémica entre los fenómenos naturales, en este caso los volcánicos, y los procesos sociales de ocupación del territorio coadyuvaron a la construcción del concepto de riesgo, cuyos elementos interactúan en un espacio geográfico (Palacio, 1995).

1.2.1. Elementos y enfoques del concepto riesgo

El riesgo es considerado un concepto holístico que concentra toda la problemática de la gestión de los desastres. Este concepto ha tenido diferentes acepciones a lo largo del tiempo (Sanahuja, 1999), no obstante mantiene en común dos elementos básicos: *amenaza y vulnerabilidad*.

1.2.1.1. Definición de los elementos

La amenaza hace referencia al fenómeno natural y su probabilidad de ocurrencia, este concepto se ha mantenido hasta cierto grado sin cambios significativos; por el contrario, el concepto de vulnerabilidad ha pasado de ser un elemento inexistente a sinónimo de nivel o grado de afectación y en tiempos recientes es considerado como un complejo constructo social e histórico que refleja las competencias de la población para hacer frente y sobreponerse a un disturbio generado por la amenaza (Wilches, 1993)

La evolución de los conceptos de riesgo, amenaza y vulnerabilidad es evidente si se analizan los enfoques que han orientado las diversas investigaciones sobre el riesgo; estos enfoques pueden resumirse en tres grandes apartados: El enfoque de las ciencias naturales, el enfoque de las ciencias aplicadas y el enfoque de las ciencias sociales (Maskrey, 1998).

1.2.1.2 Enfoque de las ciencias naturales

Engloba las investigaciones que hacen énfasis de la ubicación, frecuencia, magnitud, intensidad, espacialidad y temporalidad de un fenómeno natural que de forma potencial puede ser desastroso (Maskrey, 1998). Este enfoque elude cuestiones de responsabilidad social y política del riesgo debido a que los desastres se consideran como productos inevitables de la naturaleza ante las cuales el ser humano es un elemento pasivo (Romero *et al*, 1993).

Al considerar los desastres y riesgos como eventos inconexos de los grupos sociales, la investigación tiene como objetivo la exacta predicción de la ocurrencia de los fenómenos naturales que constituyen la amenaza (Maskrey, 1998). Es decir, el riesgo se equipara a la amenaza en sí y las investigaciones buscan calcular la probabilidad de ocurrencia de un evento físico extremo en un lugar y un periodo determinado (Sanahuja, 1999).

1.2.1.3 Enfoque de las ciencias aplicadas

Se origina cuando las investigaciones de riesgos comienzan a estudiar las pérdidas y daños asociados a las amenazas; la vulnerabilidad se introduce como un grado de pérdida que permite desligar el concepto de riesgo de la magnitud del fenómeno natural, núcleo del enfoque anterior. Como resultado de este cambio, se busca la presentación cuantitativa del riesgo cuyo valor está en función de la amenaza y la vulnerabilidad (Maskrey, 1998).

La introducción de la vulnerabilidad como un grado de pérdida en los modelos conceptuales del riesgo, enfatiza la heterogeneidad de los impactos asociados a las amenazas, los cuales presentan irregularidades en el tiempo y el espacio. En este punto, el análisis del riesgo da un salto importante y el concepto mismo pasa de ser sinónimo de amenaza a tener una estrecha vinculación con los impactos producidos por eventos naturales que son los catalizadores para transformar una situación vulnerable en un desastre (Maskrey, 1998).

El riesgo es visto como una pérdida que puede ser calculada a través de la expresión matemática propuesta en 1980 por la Oficina de las Naciones Unidas para Desastres (Sanahuja, 1999):

$$R = Re * El$$

$$Re = A * V$$

Donde:

A = amenaza natural. Probabilidad de ocurrencia o magnitud de un fenómeno natural potencialmente peligroso, dentro de un periodo determinado en un área dada.

V = vulnerabilidad. Grado de pérdidas experimentado por un elemento o grupo de elementos en riesgo debido a la ocurrencia de un fenómeno natural de una determinada magnitud expresado en una escala de 0 (sin daños) a 1 (destrucción total)

El = elementos en riesgo. Población, costo o número edificaciones, obras civiles, actividades económicas, servicios públicos, utilidades, infraestructura y otros elementos en riesgo en un área determinada.

Re = riesgo específico. Refiere el grado de pérdida esperado por la ocurrencia de un fenómeno natural particular, como un producto de la amenaza y la vulnerabilidad.

R = riesgo. Número de vidas perdidas, personas heridas, daños a propiedades y interrupción de actividades económicas, esperado a raíz de un fenómeno natural determinado.

A pesar del avance conceptual; los estudios continúan sin señalar la importancia que las características socioeconómicas tienen en la magnificación de las afectaciones al considerar la vulnerabilidad como un elemento pasivo en tanto se utiliza sólo para explicar la magnitud del daño y pérdidas (Sanahuja, 1999)

1.2.1.4 Enfoque de las ciencias sociales

Implica un cambio de énfasis en el análisis del riesgo que da como resultado investigaciones sobre la modificación de los patrones de interacción social a varias escalas que los fenómenos naturales ocasionan (Maskrey, 1998).

El concepto de vulnerabilidad es considerado como un valor subjetivo que refiere la resiliencia de un grupo social (Lavell *et al.*, 2003). Lo anterior significa que el riesgo no puede calcularse ni la vulnerabilidad definirse sin hacer referencia a la capacidad de la población para absorber, responder y recuperarse de un fenómeno natural (Maskrey, 1998).

La vulnerabilidad se convierte en un concepto construido y determinado de manera histórica y social que centra la responsabilidad de ocurrencia de un desastre en los ámbitos político, económico y social (Maskrey, 1998). En este sentido, el riesgo se encuentra en función de la capacidad de absorber y recuperarse de las pérdidas y la vulnerabilidad deja de ser un

elemento pasivo para convertirse en un elemento dinámico que refiere, como se ha mencionado con antelación, las capacidades sociales.

Maskrey (1998) menciona que este enfoque significó un cambio radical de la idea que las amenazas afectan a sociedades “normales” para ser sustituida por la idea de sociedades en crisis que son afectadas por eventos previsibles y “normales”. No obstante, el cálculo formal del riesgo, como producto de la amenaza por la vulnerabilidad, se enfrentó a la complejidad de hacer cuantificable el concepto cualitativo de la vulnerabilidad (Sanahuja, 1999).

En síntesis, el concepto de riesgo y sus elementos han presentado diversas acepciones que han orientado el énfasis de las diversas investigaciones. La tabla 2 resume estas diferencias.

Tabla 2. Diferentes acepciones del concepto riesgo

<i>Enfoque</i>	<i>El riesgo es:</i>	<i>Énfasis del enfoque</i>
<i>Ciencias naturales</i>	<i>Probabilidad de ocurrencia</i> <i>Riesgo = Amenaza</i>	<i>Fenómeno natural</i>
<i>Ciencias aplicadas</i>	<i>Grado de pérdida</i> $R = A * V$ <i>V = valor de 0 a 1 donde 0 es sin afectación y 1 es afectación total</i>	<i>Impacto y efecto de las amenazas</i>
<i>Ciencias sociales</i>	<i>La capacidad de absorber y recuperarse de la pérdida</i> <i>Riesgo = Valor subjetivo</i> <i>V = Capacidades sociales</i>	<i>El impacto social de los procesos naturales que modifican los patrones de interacción social a diversas escalas</i>

El análisis de los diversos enfoques evidencian que los conceptos de riesgo, amenaza y vulnerabilidad presentan una estrecha relación entre sí, ya que, por definición, un fenómeno natural – amenaza – sólo puede adquirir una condición de riesgo en tanto su ocurrencia se presente en un espacio ocupado por una comunidad que sea vulnerable a dicho fenómeno (Wilches, 1993).

1.3. Propuestas metodológicas para evaluar el riesgo y la vulnerabilidad

1.3.1. Valuación del riesgo

A la par del desarrollo del enfoque social, diversos autores se han dado a la tarea de generar un cuerpo metodológico que permita trasladar las características cualitativas de un grupo social a productos cuantitativos que reflejen la magnitud del riesgo y la vulnerabilidad.

En este orden de ideas, Cardona (2005) ofrece metodologías para dimensionar el riesgo con base en el cálculo de índices que lo caracterizan en las esferas económica y social. Valuar el riesgo a través de la metodología del Índice de Riesgo Total (IRT) propuesta por Cardona (2005) permite realizar estimaciones al interior de zonas urbanas y rurales que pueden presentar niveles de riesgo diferente; es calculado con base en dos elementos: *Riesgo físico* y *Factor de impacto* para un evento máximo considerado (EMC). De esta manera, es posible expresar de forma cuantitativa los daños o efectos directos potenciales para coadyuvar en la toma de decisiones tendientes a reducir el daño potencial.

El *riesgo físico* (R_f) constituye el factor “duro” de la ecuación; en este rubro se agrupan todos aquellos indicadores que hacen referencia a los elementos expuestos que caracterizan a la ciudad, como edificaciones, infraestructuras, instalaciones, etc. Entre los indicadores propuestos por el autor se incluyen (Cardona, 2005):

- a. Área destruida
- b. Muertos
- c. Heridos
- d. Roturas red de acueductos
- e. Roturas red de gas
- f. Longitud de redes eléctricas
- g. Vulnerabilidad de centrales telefónicas
- h. Longitud de redes eléctricas caídas
- i. Vulnerabilidad subestaciones eléctricas

Por otro lado, el *factor de impacto* (F) constituye el factor “blando” de la ecuación ya que refiere variables asociadas a la fragilidad social y falta de resiliencia de la población expuesta; entre los indicadores propuestos por el autor se incluyen:

- j. Área de barrios marginales
- k. Tasa de mortalidad
- l. Tasa de delincuencia
- m. Índice de disparidad social
- n. Densidad de población
- o. Camas hospitalarias
- p. Recurso humano en salud
- q. Espacios públicos
- r. Nivel de desarrollo de la localidad
- s. Operatividad en emergencias

La relación entre R_f y F se muestra en la siguiente ecuación matemática:

$$R_T = R_f * (1 + F)$$

Esta relación matemática establece que un valor de riesgo físico determinado puede incrementarse en función de las características socioeconómicas que constituyen el concepto de vulnerabilidad.

Otra metodología para el cálculo del riesgo es la propuesta por Blong (2003), quien plantea que el riesgo es posible de calcularse a través del concepto Riesgo Específico (RE), el cual refiere la magnitud de pérdida expresada como una proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos bajo amenaza con base en el daño o posible afectación que éstos pueden presentar; el autor aplica esta metodología en la valuación de inmuebles; no obstante, se puede trasladar a otros elementos económicos como infraestructura carretera, monto de la producción agrícola y pecuaria, monto de la inversión en la red eléctrica y telefónica, etc.

1.3.2. Valuación de la vulnerabilidad

Con respecto al cálculo de la vulnerabilidad; Cardona (2005) propone la conformación del Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP) definido como un indicador compuesto que caracteriza las condiciones predominantes de vulnerabilidad de un espacio determinado en términos de exposición en áreas propensas, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia social en general.

Por medio de este indicador, el autor busca exponer cómo las condiciones de vulnerabilidad que subyacen en el riesgo corresponden a problemas ocasionados por un crecimiento social y económico inadecuado (Cardona, 2005). El IVP es el promedio de tres indicadores:

$$IVP = \frac{IVP_{Exposición} + IVP_{Fragilidad} + IVP_{Resiliencia}}{3}$$

El $IVP_{Exposición}$ (IVP_{EF}) refleja procesos de densificación, crecimiento poblacional, expansión de la frontera agrícola, crecimiento urbano y todos aquellos indicadores que reflejen un incremento de los bienes y personas expuestas y susceptibles a una amenaza (Cardona, 2005).

El $IVP_{Fragilidad}$ (IVP_{FS}) refleja las debilidades relativas o condiciones de deterioro que magnifican los efectos directos causados por un fenómeno peligroso; los indicadores utilizados para tal efecto hacen referencia a la pobreza, inseguridad humana, dependencia, analfabetismo, disparidad social, desempleo, inflación, deuda y degradación ambiental (Cardona, 2005).

El $IVP_{Resiliencia}$ (IVP_{FR}) refieren la incapacidad de recuperarse o absorber el impacto de los fenómenos peligrosos, cualquiera que sea la naturaleza y severidad de las amenazas; se calcula por medio de un tratamiento complementario o invertido de indicadores que reflejen el nivel de desarrollo humano, el capital humano, la redistribución económica, la gobernabilidad, la protección financiera, la percepción colectiva, la preparación para enfrentar situaciones de crisis y la protección ambiental (Cardona, 2005).

Para el cálculo final del IVP el autor propone un manejo previo de los datos en aras de comparar indicadores cuyos resultados se expresan en diferentes unidades de medida (% de población por año, % de viviendas anuales, % de hectáreas arables, etc). Este proceso, denominado normalización (Cardona, 2005), traslada los totales de cada indicador en valores que van de 0 a 1, donde 0 se aplica al valor del indicador mínimo y 1 al valor máximo; la expresión matemática aplicada depende si un valor mayor del indicador significa mayor vulnerabilidad (indicadores directos) o disminución de la misma (indicadores inversos); el autor propone las siguientes expresiones matemáticas:

A: Indicadores directos:

$$\frac{X_{Reg} - X_{Min}}{X_{Max} - X_{Min}}$$

B: Indicadores inversos:

$$\frac{X_{Max} - X_{Reg}}{X_{Max} - X_{Min}}$$

Donde:

X_{Max} : valor máximo del indicador a normalizar

X_{Min} : valor mínimo del indicador a normalizar

X_{Reg} : valor del indicador para el registro correspondiente

Con el cálculo normalizado de cada uno de los IVP es posible trasladarlos a una expresión espacial y analizar su relación intrínseca que conforma la distribución de la magnitud total de la vulnerabilidad en zonas susceptibles a los procesos naturales que de forma potencial pueden generar afectaciones.

Capítulo 2. Volcán de Colima: Contexto y dinámica eruptiva

En nuestro país, parte del vulcanismo activo se relaciona con el proceso de subducción a lo largo de la trinchera de Mesoamérica cuyas tasas de convergencia oscilan entre los 6 y 7 cm por año (Luhr *et al.*, 1985, Mooser *et al.*, 1987); este proceso de destrucción de corteza oceánica dio origen a la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), que corre desde el Estado de Veracruz al oriente hasta el Estado de Nayarit al occidente (Demant *et al.*, 1975) y presenta la mayor concentración de volcanes de diversos tipos (Macías, 2005). La FVTM (Figura 6) es el resultado de uno de los sistemas tectónicos convergentes más complejos del planeta y sus características tectónicas, geológicas, geoquímicas, petrogenéticas y paleomagnéticas han sido ampliamente analizadas por autores como Mooser *et al.* (1987), Ferrari (2000), Rossotti *et al.* (2002), Ruíz (2003), Gómez *et al.* (2005) y Macías (2005) entre otros.

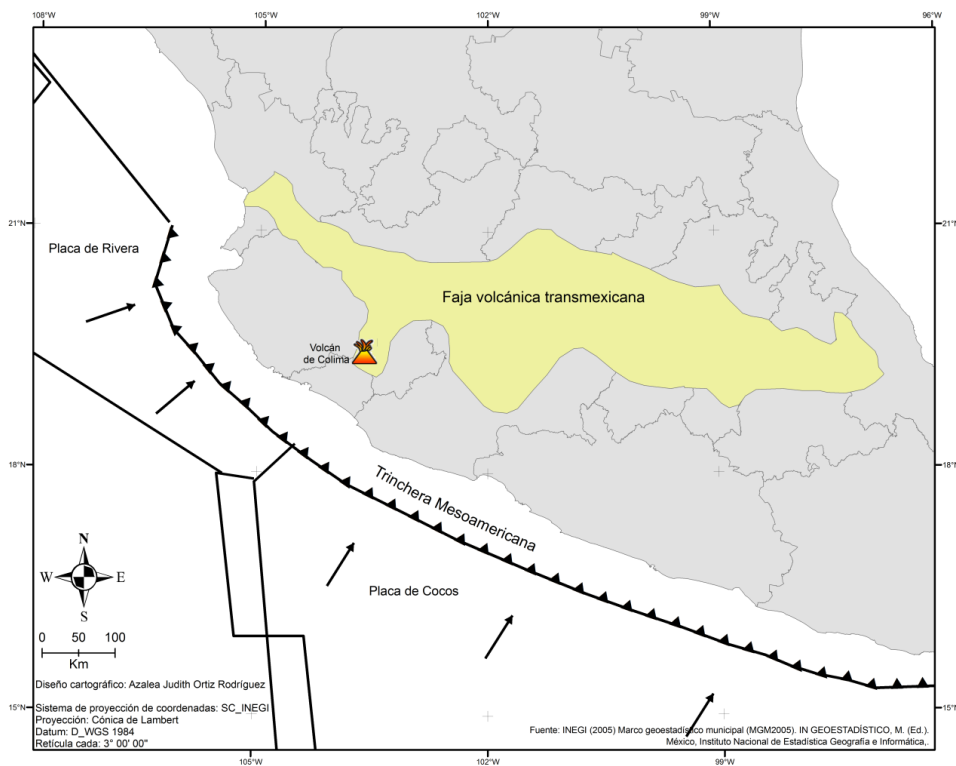


Figura 6. Disposición espacial de la Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana obedece al proceso de subducción de la placa de Cocos y Rivera a lo largo de la Trinchera Mesoamericana; la falta de paralelismo con la zona de trinchera es el reflejo superficial de variación en la velocidad de subducción y en consecuencia los ángulos de inclinación de la placa subducente.

En la porción occidental de este arco volcánico se localiza un punto de triple unión compuesto por los graben de Zacoalco-Tepic, Chapala y Colima (Figura 7), en este último se emplaza el Complejo Volcánico de Colima (CVC). El graben de Colima es una compleja estructura con una disposición S desde el punto de intersección con una anchura irregular que varía de 20 a 60 km y cuyas paredes se elevan hasta 1700 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Luhr *et al.*, 1985); esta estructura constituye el límite oriental del Bloque de Jalisco (Garduño *et al.*, 1998).

La formación del graben de Colima obedece a la reactivación parcial de los límites continentales del bloque de Jalisco con movimientos extensionales durante el Plioceno-Cuaternario como consecuencia del cizalleo oblicuo izquierdo generado por el vector de esfuerzo resultante de la subducción hacia el NE de la placa de Cocos y el avance hacia el SW de la placa Norteamericana; dicho vector presenta una dirección NE con una ligera oblicuidad hacia las costas del sur de México lo cual produce el cizalleo y desplazamiento hacia el E de la parte sur del país (Mooser *et al.*, 1987, Gómez *et al.*, 2005). La tectónica extensional del bloque de Jalisco se ha superpuesto a la tectónica de compresión generada por la subducción de la placa Rivera por debajo de la Norteamericana, a un ritmo de 2.4 cm al año (Komorowski *et al.*, 1997).

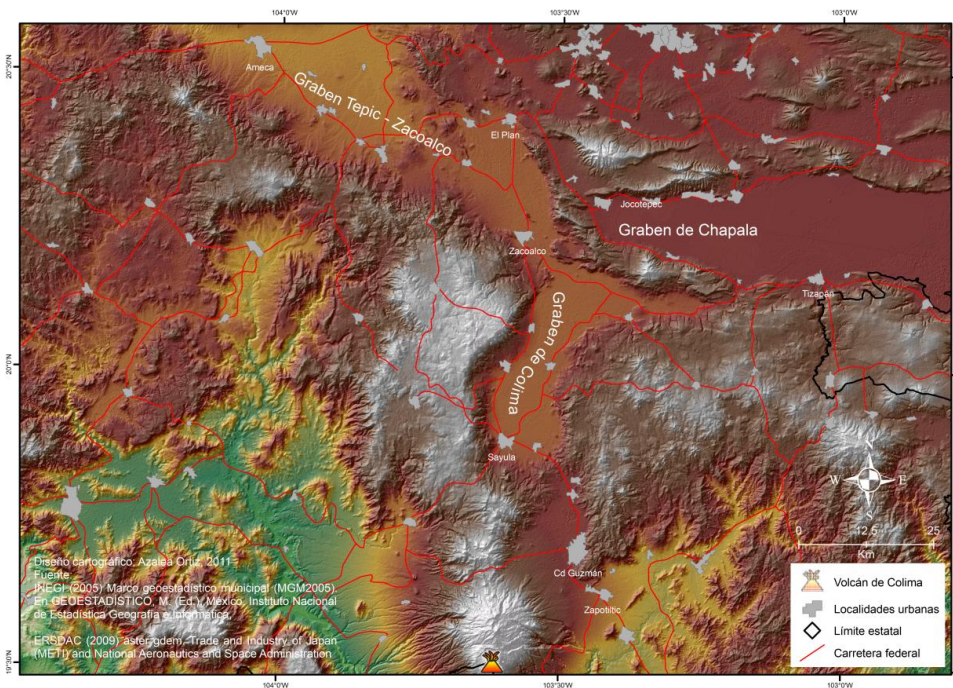


Figura 7. Ubicación geográfica del graben de Colima

2.1 Complejo volcánico de Colima

El CVC (Figura 8) se compone de tres estratovolcanes: El Cántaro, El Nevado de Colima y Volcán de Colima, cuyas edades se vuelven más jóvenes de norte a sur (Rodríguez-Elizarrarás, 1995, Saucedo *et al.*, 2010). El basamento está compuesto por de andesitas y volcánicas del Cretácico Inferior, denominado Tecalitlán; areniscas y lutitas correspondientes a la formación Encino; Calizas masivas de la Formación Tepames, lechos rojos de la Formación Coquimatlán, intrusivos cretácicos y derrames de basaltos, andesitas, brechas volcánicas dacíticas e ignimbríticas del Terciario (Rodríguez-Elizarrarás, 1995, Macías, 2005).

El CVC presenta actividad volcánica calcoalcalina, relacionada con el proceso de subducción, no obstante en las paredes del graben este tipo de rocas se encuentran intercaladas con rocas alcalinas, relacionadas con el proceso de extensión, de ahí que se refiera a una actividad volcánica bimodal en diversos artículos (Luhr *et al.*, 1985, Ferrari, 2000, Gómez *et al.*, 2005). Durante el último millón de años la actividad volcánica calcoalcalina ha estado confinada a la parte sur del graben construyendo la cadena de volcanes mencionado en el párrafo anterior (Luhr *et al.*, 1985).

El volcán el Cántaro cuenta con una edad aproximada de 1.6 Ma y se compone por derrames de lava andesítica y domos de composición dacítica, según Macías (2005) su actividad cesó hace 1.0 Ma. Con el tiempo, la actividad volcánica migró ~15 km al sur y dio pie al volcán Nevado de Colima, el cual presentó actividad eruptiva muy compleja que involucró la destrucción del edificio volcánico en repetidas ocasiones, de las cuales queda como evidencia el *somma* que le rodea al NW y S del volcán (Luhr *et al.*, 1980, Robin *et al.*, 1987, Macías, 2005).

A la par que cesaba la actividad en Nevado de Colima, se construyó el cono anterior del Volcán de Colima, denominado Paleofuego cuya actividad eruptiva, al igual que en Nevado de Colima, es muy compleja e involucra la destrucción del edificio volcánico en al menos cinco ocasiones (Macías, 2005). Después del último colapso del Paleofuego, hace 2500 años AP (Macías, 2005), la actividad migró al sur y dio origen al actual Volcán de Colima (Luhr *et al.*, 1980, Macías, 2005).

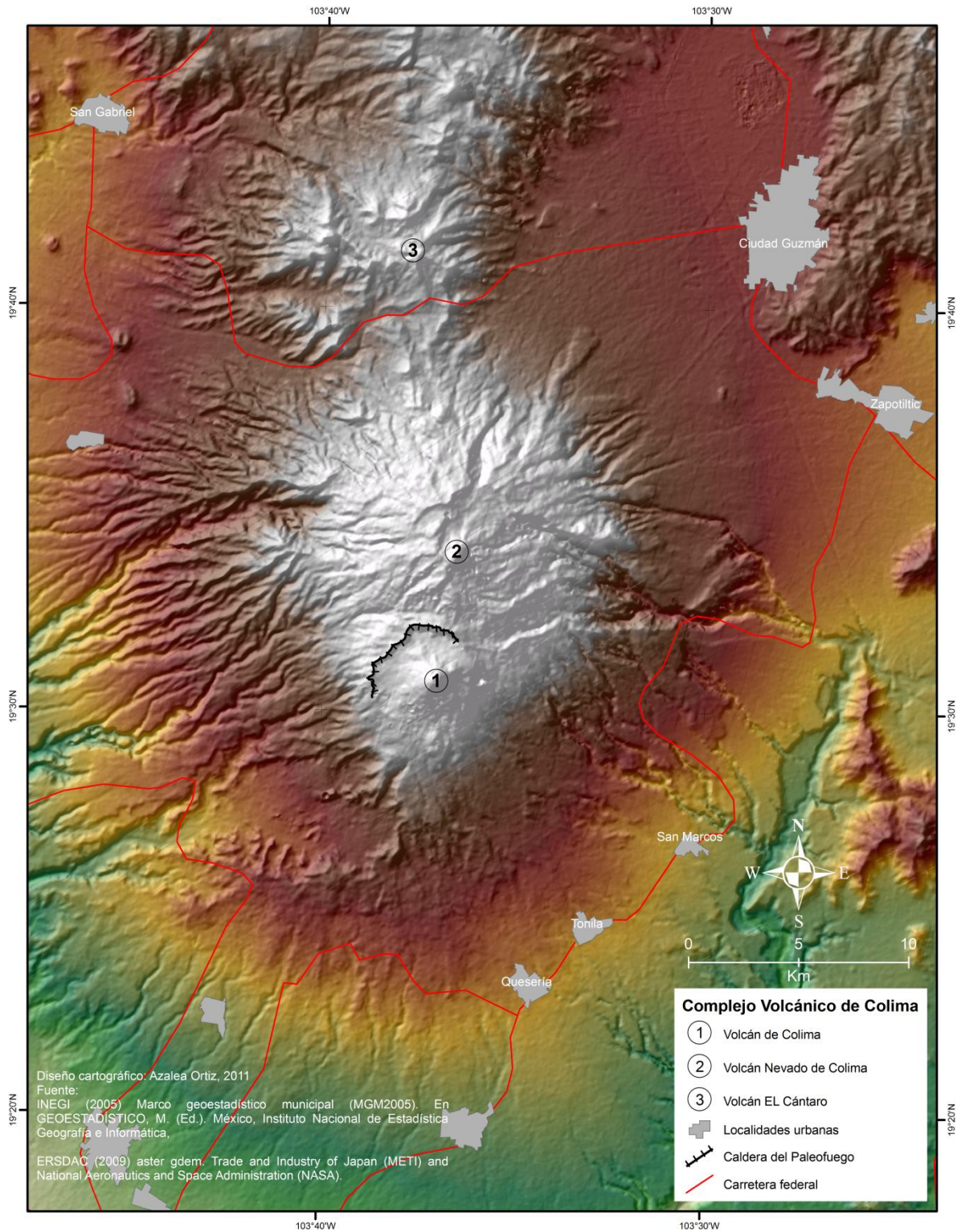


Figura 8 Volcanes que constituyen el Complejo Volcánico de Colima

2.2 Volcán de Colima

2.2.1 Contexto físico

Ubicado en el extremo sur del CVC a los 19° 30' 44.8" N 103° 37' 01.6" W, es considerado por diversos autores como el volcán más activo del país (Luhr *et al.*, 1980, Luhr *et al.*, 1985, Martín Del Pozzo *et al.*, 1987, Rodríguez-Elizarrarás, 1995, Taran *et al.*, 2000, Saucedo *et al.*, 2010), con ~52 eventos eruptivos desde 1560 (Komorowski *et al.*, 1997, Bretón *et al.*, 2002, Saucedo *et al.*, 2005).

Con base en su estructura, es clasificado como un volcán compuesto o estratovolcán característico de las márgenes continentales adyacentes a las zonas de subducción (Rodríguez-Elizarrarás, 1995). Está constituido por intercalación de lavas andesíticas y depósitos de flujos piroclásticos y de caída que en conjunto alcanzan una altura de ~3860 msnm las cuales se emplazan dentro de la caldera de avalancha producida por el colapso gravitacional del antiguo Paleofuego (Luhr *et al.*, 1980, Robin *et al.*, 1987, Macías, 2005, Saucedo *et al.*, 2010). Al igual que los otros volcanes del CVC su dinámica eruptiva está íntimamente relacionada con los procesos de subducción de la placa de Cocos y placa de Rivera por debajo de la placa Norteamericana (Taran *et al.*, 2000).

Robin *et al.* (1987) lo definen como un cono asimétrico con fuertes pendientes hacia la parte norte que contrastan con las pendientes más suaves presentes en la cara sur. Presenta, además, numerosas barrancas que encausan los escurrimientos hacia el río Tuxpan o Armería (Figura 9); ambos ríos constituyen los límites oriental y occidental respectivamente y son los rasgos hidrológicos más importantes de la zona ya que conducen las aguas captadas hasta el océano pacífico (Rodríguez-Elizarrarás, 1995, Saucedo, 1997)

Sumado al contexto morfológico e hidrográfico, las condiciones climáticas son importantes debido a que el elemento principal en la formación de lahares es el agua de lluvia que precipita. Las inmediaciones del Volcán de Colima presenta una diversidad de climas que van del cálido al frío cuya disposición y gradiente se relaciona directamente con las variaciones de altitud así como la dirección de viento dominante proveniente del S – E (Gobierno del Estado de Colima, 2012).

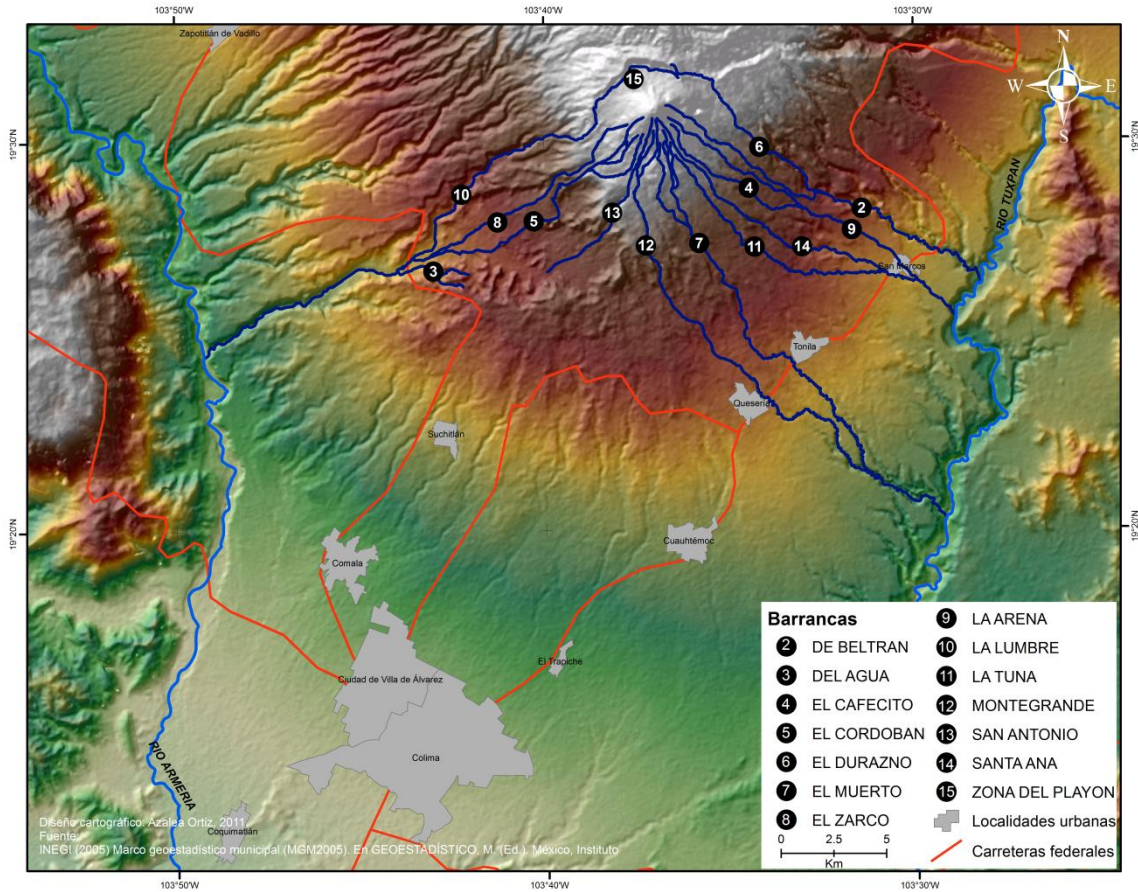


Figura 9. Barrancas formadas alrededor del Volcán de Colima

La importancia de las barrancas alrededor del volcán radica en que a través de estos cauces desciende la precipitación pluvial, los flujos piroclásticos y los lahares que pueden afectar infraestructura y asentamientos humanos. La figura muestra como las principales carreteras federales atraviesan las barrancas que discurren en las cercanías de asentamiento urbanos como Quisería y Tonilá.

En la tabla 3 se desglosan las características climáticas de la zona de estudio con base en la clasificación propuesta por García (1987, 1998).

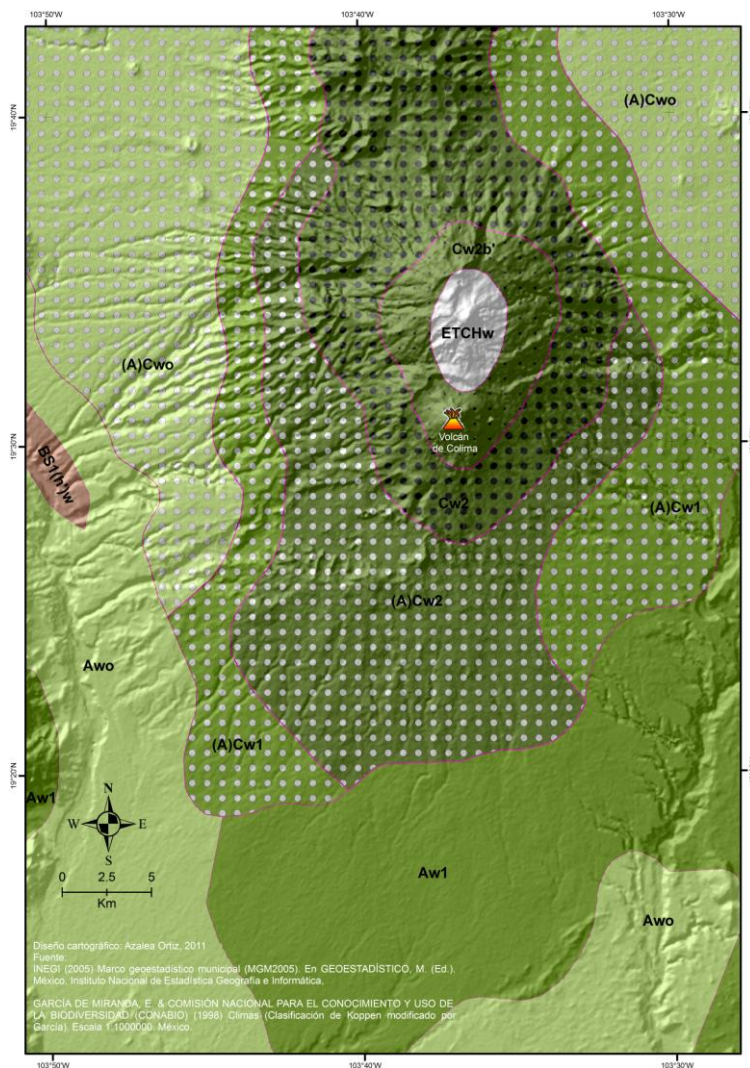
Tabla 3. Tipos de climas presentes en las inmediaciones del volcán de Colima

Descripción	CVE	TMA ¹	TMF ²	TMC ³	P/T ⁴	PMS ⁵ (mm)	% PI ⁶
Cálido subhúmedo con presencia de verano cálido	Aw ₁	>22°C	> 18°C		~43.2 y 55.3	< 60	~ 5 al 10.2
Cálido subhúmedo con presencia de verano cálido	Aw ₀	>22°C	> 18°C		< 43.2	~ 0 y 60	~ 5 al 10.2
Semiárido cálido con presencia de verano cálido	BS ₁ (h ¹)w	>22°C	> 18°C				~ 5 al 10.2
Semicálido subhúmedo del grupo C con presencia de verano cálido	(A)Cw ₁	>18°C	< 18°C	>22°C	~43.2 y 55	< 40	~ 5 al 10.2
Semicálido subhúmedo del grupo C con presencia de verano cálido	(A)Cw ₂	>18°C	< 18°C	>22°C	< 55	< 40	~ 5 al 10.2

Semicálido subhúmedo del grupo C con presencia de verano cálido	(A)Cw ₀	>18°C	< 18°C	>22°C	>43.2	< 40	~ 5 al 10.2
Templado subhúmedo con presencia de verano cálido	Cw ₂	~ 12° y 18°C	~ -3° y 18°C	<22°C	>55	< 40	~ 5 al 10.2
Semifrío subhúmedo con verano fresco largo	Cw ₂ b'	~ 5° y 12°C	~ -3° y 18°C	<22°C		< 40	~ 5 al 10.2
Frío	ETCHw	~ 2° y 5°C	> 0°C	~ 0° y 6.5°C			

1. Temperatura Media Anual
2. Temperatura del mes más frío
3. Temperatura del mes más cálido
4. Índice Precipitación/Temperatura
5. Precipitación del mes más seco
6. Porcentaje de precipitación invernal con respecto al total anual

Los climas fríos (ETCHw) se localiza en la cima de los volcanes y se caracterizan por la presencia de flora y fauna relacionada con la alta montaña; conforme el gradiente altitudinal desciende, la temperatura incrementa y permite la presencia de bosques de coníferas relacionadas con los climas templados (Cw₂, Cw₂b') y bosques de latifoliadas relacionadas con los climas semicálidos ((A)Cw₁, A)Cw₂, (A)Cw₀); estas agrupaciones vegetales se transforman



en bosques tropicales caducifolios característicos de los climas cálidos y semicálidos presentes en las partes más bajas (Aw_b, Aw₀). Por otro lado, condiciones de precipitación se encuentran relacionadas con la posición a barlovento o sotavento, como la pequeña franja de clima semiárido (BS₁(h')w) que discurre hacia el W de la zona de estudio y que refleja el fenómeno de sombra orográfica de la cadena de volcanes y la sierra de Manantlán (Figura 10).

En promedio, la precipitación medio anual asciende a 890 mm, equivalentes

Figura 10. Clasificación de los climas presentes en la zona de estudio

a 890 litros por metro cuadrado (SEMARNAT and CNA, 2002), las heladas y granizadas son casi imperceptibles y poco frecuentes (INEGI, 2011). La precipitación, el sustrato ígneo y la poca variabilidad climática crean condiciones favorables para la producción agrícola, entre la cual destaca la producción de limón que fue introducido en 1520 y por el cual ocupa el primer lugar en producción a nivel nacional (SAGARPA, 2009, Medina *et al*, 2010).

2.2.2 Contexto socioeconómico

Al igual que el contexto físico del volcán, las condiciones socioeconómicas en las poblaciones aledañas son variadas; éstas constituyen un elemento fundamental en la valoración del riesgo ante amenazas naturales ya que, por definición, un fenómeno natural es considerado como un riesgo siempre y cuando afecte a una población que sea vulnerable (Maskrey, 1998).

A continuación se presentan las características socioeconómicas relevantes de la zona de estudio que incluye los municipios de Colima, Comala, Cuauhtemoc y Villa de Álvarez, pertenecientes al Estado de Colima y Tonilá, Tuxpan y Zapotitlan de Vadillo, pertenecientes al Estado de Jalisco.

2.2.2.1 Población

El comportamiento de la población estatal muestra una clara tendencia de incremento entre los años 2000 a 2010; por un lado Colima presentó un incremento poblacional de 20% y Jalisco del 16%, ambos registros por arriba de la media nacional que corresponde a un 15% en el periodo referido (Tabla 4).

Tabla 4. Población total de los Estado de Colima y Jalisco

Estado	Población Total 2000	Población total 2010	Crecimiento poblacional	Tasa de crecimiento medio anual
COLIMA	542,627.00	650,555.00	19.89 %	1.83 %
JALISCO	6,322,002.00	7,350,682.00	16.27 %	1.52 %
PAIS	97,483,412.00	112,336,538.00	15.24 %	1.43 %

La población total por municipio se muestra en la tabla 5; destacan Colima y Villa Álvarez con un mayor número de habitantes que obedece al proceso de conurbación por proximidad entre los asentamientos urbanos que en conjunto son reconocidos por el Instituto Nacional de

Geografía Estadística e Informática (INEGI) como una de las 56 zonas metropolitanas¹ existentes en el país.

Tabla 5. Población de los municipios comprendidos dentro de la zona de estudio

Municipio	Población Total 2000	Población total 2010	Crecimiento poblacional	Tasa de crecimiento medio anual
Colima	129,958.00	146,904.00	13.04 %	1.23 %
Comala	19,384.00	20,888.00	7.76 %	0.75 %
Cuauhtemoc	26,771.00	27,107.00	1.26 %	0.12 %
Villa de Alvarez	80,808.00	119,956.00	48.45 %	4.03 %
Tonilá	7,374.00	7,256.00	-1.60 %	-0.16 %
Tuxpan	33,162.00	34,182.00	3.08 %	0.30 %
Zapotitlan de Vadillo	6,533.00	6,685.00	2.33 %	0.23 %

El mapa de la figura 11 muestra a Villa de Álvarez como el municipio con un crecimiento poblacional medio anual superior a la tendencia nacional (2.02%); caso contrario se presenta en el municipio de Tonilá cuya dinámica poblacional en el tiempo referido muestra una tendencia decreciente (SEDESOL *et al.*, 2005).

Desde la erupción de 1913, la estructura poblacional ha sufrido cambios significativos; el incremento y la concentración de la población en zonas urbanas ha sido la tendencia general. En los municipios correspondientes al estado de Colima, el 83% de la población se concentra en 7 localidades urbanas, en tanto que el 17% restante se encuentra dispersa en 429 localidades rurales; en caso de los municipios pertenecientes a Jalisco dista mucho de ser diferente; el 74% de la población se agrupa en 4 asentamientos en tanto que el 26% restante se disemina en 126 poblados (INEGI, 2000, INEGI, 2010a).

¹ Una zona metropolitana se define como el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica, planeación y políticas urbanas. Asimismo se induyen dentro de esta definición las ciudades de 1 millón o más habitantes y aquellas ciudades con más de 250 mil habitantes que comparten procesos de conurbación con ciudades de los Estados Unidos de Norteamérica. SEDESOL, CONAPO & INEGI (2005) Delimitación de las zonas metropolitanas de México. 2008 ed. México.

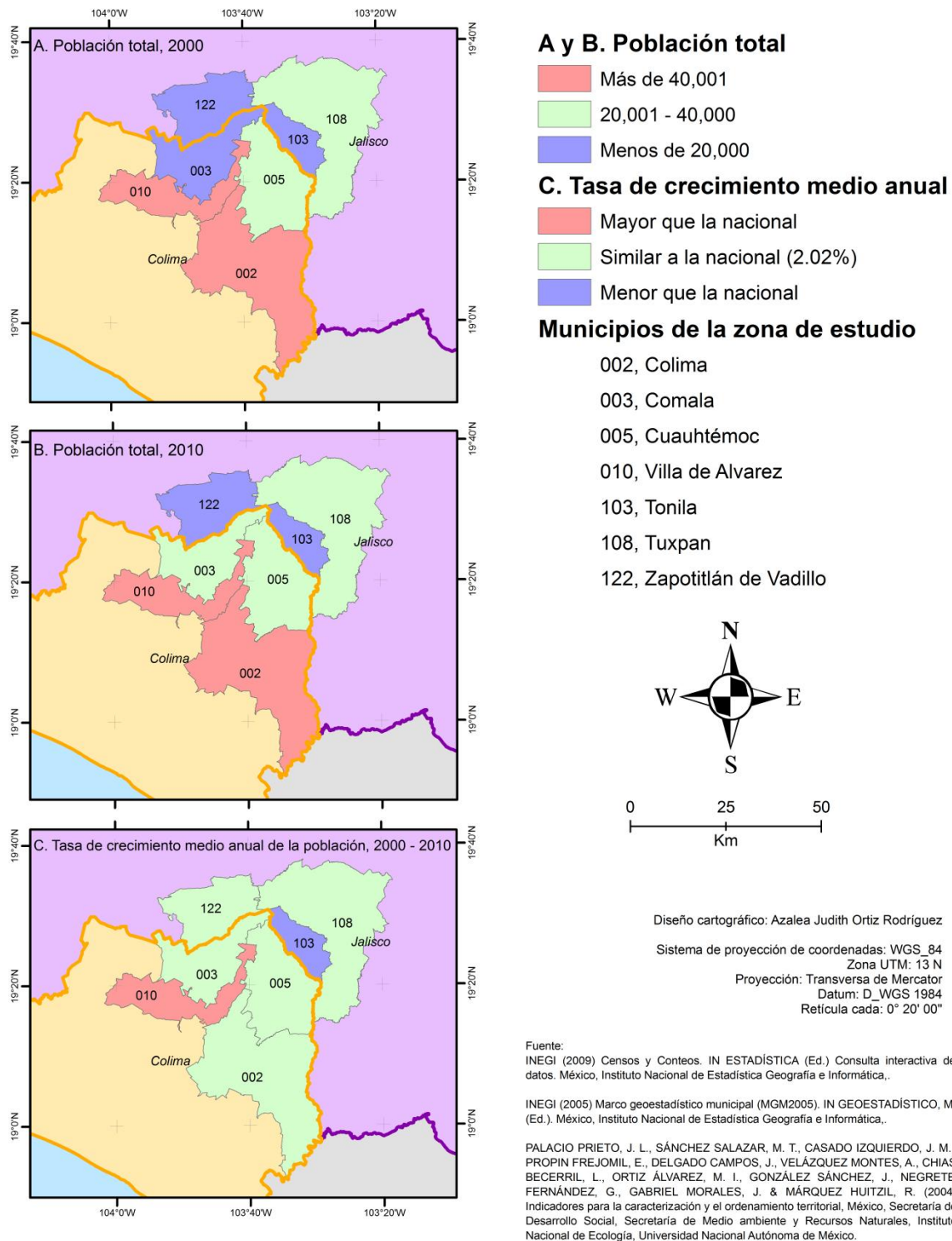


Figura 11. Dinámica poblacional por municipio de la zona de estudio. Datos 2000 a 2010

El proceso de conurbación han ocasionado que el municipio de Villa de Álvarez, perteneciente al estado de Colima cuente una tendencia de crecimiento superior a la estatal e incluso a la nacional, con un 4% de crecimiento anual y un acumulado de 48% en el periodo de tiempo referido.

Estas cifras muestran como en un siglo la población pasó de ser rural – con un 65% y 76% de la población total de 1910 asentadas en zonas rurales para Colima y Jalisco respectivamente – a presentar un carácter urbano (Tabla 6).

Tabla 6. Distribución de la población total de los municipios considerados dentro de la zona de estudio con base en el tipo de asentamiento; datos de 2010

Municipio	Zonas urbanas		Zonas rurales		Porcentaje de población en zonas urbanas
	Localidades	Población total	Localidades	Población total	
Colima	1	137,383	184	9,521	94%
Comala	2	13,892	95	6,996	67%
Cuauhtemoc	3	20,064	62	7,043	74%
Villa de Álvarez	1	117,600	88	2,356	98%
Tonilá	2	6,471	14	785	89%
Tuxpan	1	27,523	76	6,659	81%
Zapotitlan de Vadillo	1	3,530	36	3,155	53%

Esta concentración urbana de la población tiene sintonía con el devenir nacional. El crecimiento descontrolado de las áreas urbanas en el país ha obedecido a políticas gubernamentales vigentes desde 1940 mismas que dejaron en el olvido a poblaciones enteras de campesinos en aras de fomentar una industria nacional emplazada en los asentamientos urbanos (Hansen, 1993, Garza, 2002, Riding, 2004).

El abandono federal de las políticas agrarias ha originado la migración de la población rural a los principales núcleos urbanos. Entre las consecuencias que han presentado las urbes receptoras de migrantes cabe mencionar: la pérdida de la calidad de vida, inseguridad y una oferta de mano de obra infinitamente elástica que redundo en bajos salarios y en la continuidad del círculo vicioso que menoscaba la calidad de vida de los pobladores (Hansen, 1993). Asimismo, la dispersión poblacional en las zonas rurales dificulta el otorgamiento de servicios y la aplicación de políticas de planeación que incluyen aquellas tendientes a disminuir la vulnerabilidad.

Los asentamientos urbanos que concentran a la mayor parte de la población pueden ser clasificados para matizar el maniqueísmo establecido por INEGI que establece como urbanas todas las localidades con más de 2,500 personas (INEGI, 2010c); en este sentido Palacio *et al* (2004) ofrecen una tipificación de las localidades urbanas que permite identificar aquellas ciudades que aun conservan un vínculo importante con los espacios rurales.

Este punto intermedio es denominado urbano mixto o rururbano y muestra la transformación territorial y construcción de espacios imbricados dentro del contexto rural que presentan cierto carácter urbano-industrial que los diferencian de los espacios rurales en *sensu stricto* y facilitan el matiz territorial característico del *continuum* rural-urbano (Folch, 2011, Hidalgo *et al.*, 2007).

El mapa de la figura 12 muestra la distribución espacial del nivel de urbanización, que indica la proporción de la población urbana con respecto a la población total con base en un gradiente rural-urbano que permite clasificar los municipios más urbanizados de aquellos con urbanización intermedia y baja (Palacio *et al.*, 2004).

A pesar del incremento en la concentración poblacional en asentamientos urbanos; la cantidad de población dispersa en zonas rurales es considerable como para ignorar su existencia; en este sentido el índice de dispersión, cuya distribución espacial se expone en la figura 7 B, es una medida que complementa el nivel de urbanización; éste índice propuesto por Palacio *et al* (2004) permite identificar la coexistencia de localidades rurales dispersas y localidades urbanas, también denominadas lugares centrales.

A mayor índice de dispersión se asume que la población rural se encuentra más alejada de los lugares centrales y por tanto la aplicación de políticas de planeación, incluso las tendientes a disminuir la vulnerabilidad, se torna más complicado que en municipios cuya dispersión de población rural es menos ya que se asume una mejor vinculación de las localidades rurales a los centros urbanos y entre sí (Palacio *et al.*, 2004).

La infraestructura vial constituye un elemento básico en la articulación espacial y estructuración del territorio, sobre todo, en lo correspondiente a la relación entre zonas rurales y urbanas. La cantidad de vías de comunicación define distintos niveles de articulación territorial a cualquier escala; estas redes de flujo – personas y mercancías – permiten identificar la organización, funcionalidad y vínculos urbano-regionales en un territorio determinado (Palacio *et al.*, 2004)

Entre los efectos territoriales de mayor importancia esta la vectorización de las relaciones socioeconómicas a largo plazo; esta vectorización acrecienta los impactos sociales, económicos y ambientales de la infraestructura vial. Asimismo, la eficiencia de la infraestructura vial facilita la integración y por tanto la comunicación e intercambio entre los

sectores rurales y urbanos de un municipio. En este sentido; a través del índice de suficiencia vial, expuesto en el mapa 7 C, se muestra la tipificación de los municipios del área de estudio con base en el índice de Engel que representa la capacidad que tiene una red vial para garantizar los servicios de transporte en consideración con la población y la superficie de cada unidad territorial analizada (Palacio *et al.*, 2004)

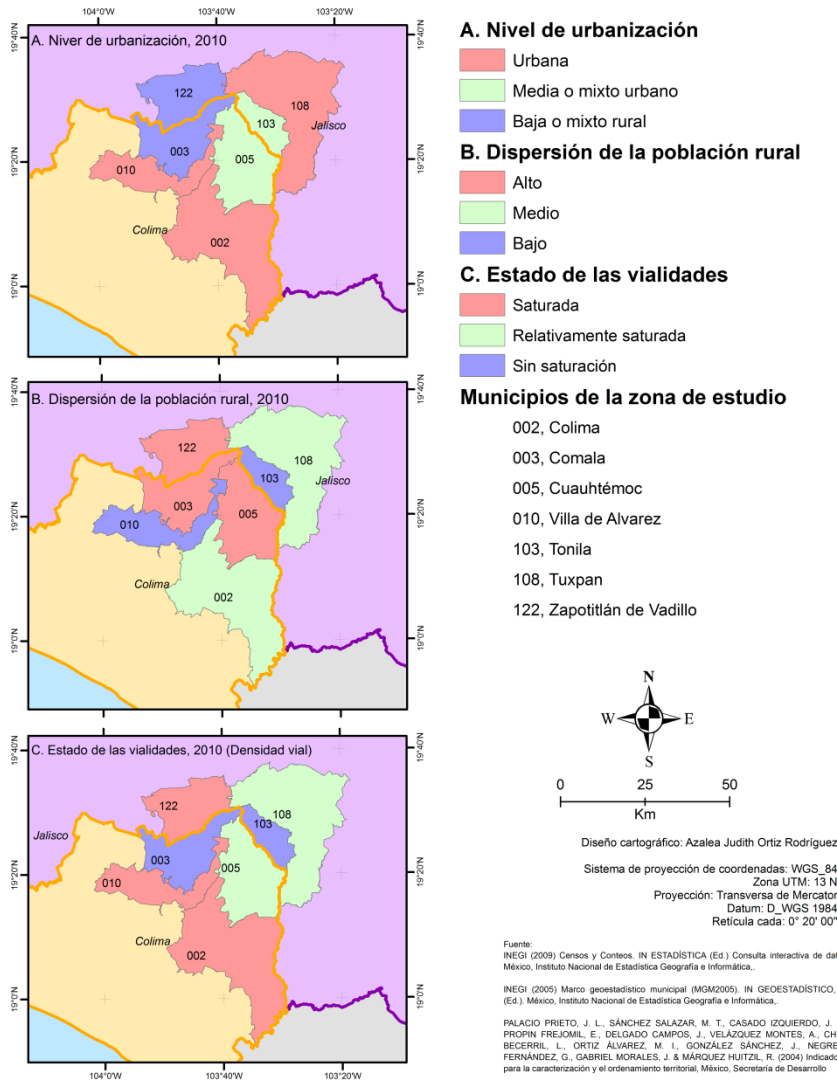


Figura 12. Nivel de urbanización, dispersión de la población rural y densidad vial, datos del 2010

El tipo de asentamientos urbanos demuestran la relación entre las zonas urbanas y los espacios rurales y cómo los últimos influyen en la generación de espacios humanizados; no todas las ciudades son “urbanas” es sensu stricto, por tanto es necesario identificar el matiz correspondiente al continuum rural-urbano. La dispersión de las poblaciones rurales y su vinculación con los lugares centrales facilita o dificulta la aplicación de políticas gubernamentales; en este sentido, el estado de las vías de comunicación constituyen un elemento fundamental en la comunicación entre las diversas poblaciones, por tanto redes viales sin saturación indican una mayor capacidad para garantizar la circulación e intercambio de bienes y personas en una jurisdicción territorial específica.

2.2.2.2 Economía

La economía es otro de los sistemas sociales que estructuran y organizan el territorio; mediante el análisis de los elementos que componen a dicho sistema se busca una comprensión global del funcionamiento del territorio asimismo permite detectar las potencialidades, limitantes y problemas para la evaluación integral de cualquier espacio humanizado (Palacio *et al.*, 2004).

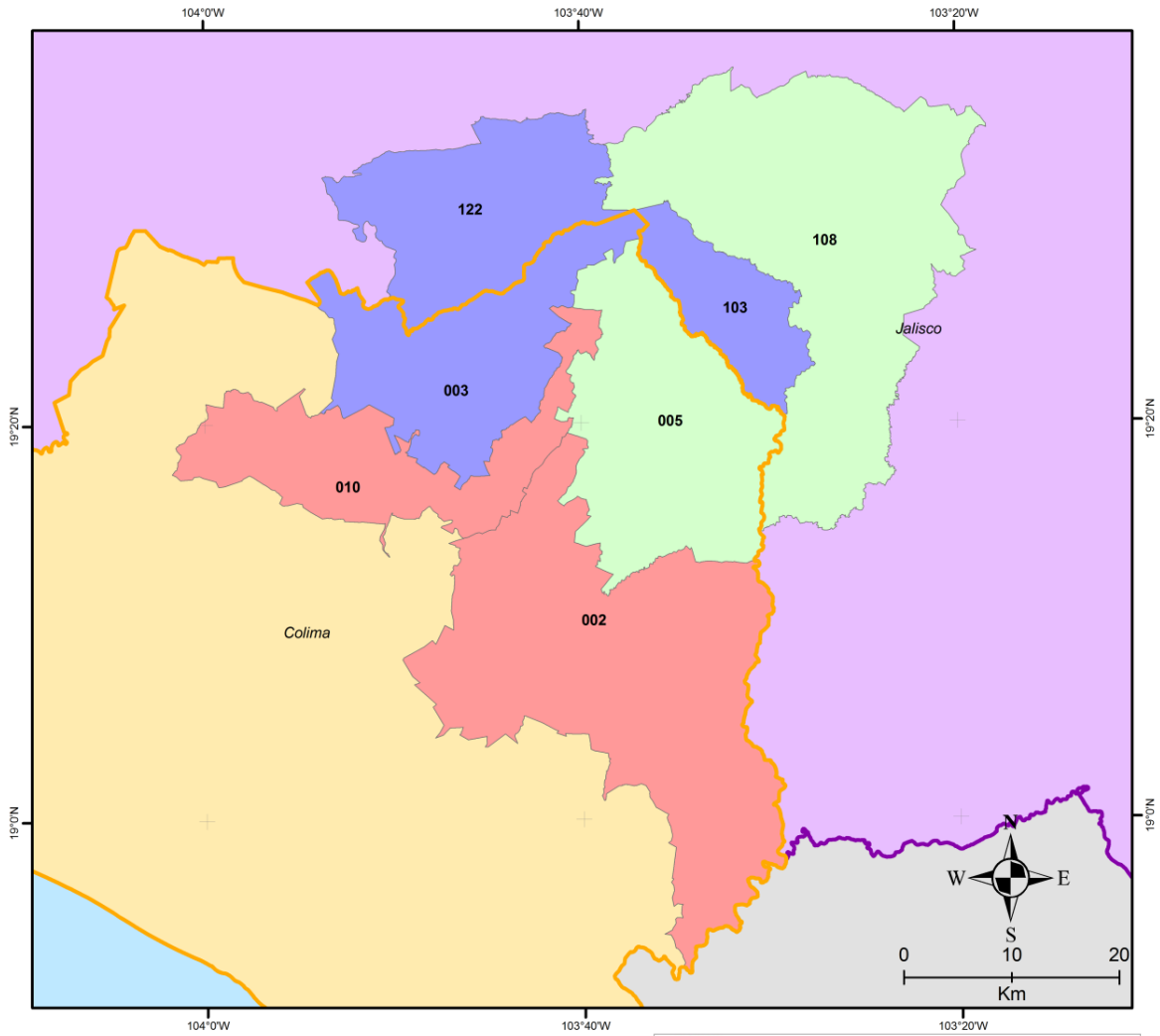
Entre las diversas variables económicas se encuentra el Producto Interno Bruto (PIB), definido como la suma de la producción total generada en una jurisdicción territorial en cierto periodo de tiempo (INEGI, 2005b). En este sentido, El PIB de los estados de Colima y Jalisco asciende a \$44,479,048,000.00 y \$546,507,519,000.00 respectivamente, lo cual significa una participación del 0.40% y 4.97% en el PIB nacional para cada una de las entidades; esta riqueza económica es producida por más de millón y medio de personal ocupado en las 290,407 unidades económicas (UEco) dispersas en los diferentes sectores de la economía (INEGI, 2009). La distribución de la producción total bruta estatal por sector se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Producto interno bruto estatal por sector de la economía, datos en miles de pesos para el año 2009

	PIB TOTAL (Miles de pesos)	Porcentaje de Participación (Nacional)	Sector PRIMARIO	%	Sector SECUNDARIO	%	Sector Terciario	%
TOTAL NACIONAL	10,998,426,457		18,649,362	0.17%	7,098,374,707	64.54%	3,881,402,388	35.29%
COLIMA	44,479,048	0.40%	390,439	0.87%	29,457,870	66.22%	14,630,739	32.89%
JALISCO	546,507,519	4.97%	669,821	0.12%	351,766,837	64.37%	194,070,861	35.51%

Según los datos expuestos; son las actividades del sector secundario y terciario las que aportan mayor cantidad del PIB de cada uno de los estados, situación similar a la tendencia nacional que ha favorecido el desarrollo industrial y de servicios en detrimento de las actividades primarias productoras de alimentos e insumos básicos; de ahí la tendencia al abandono de las zonas rurales y la concentración poblacional en las ciudades (INEGI, 2009).

Con respecto a los municipios de la zona de estudio; la situación no dista de ser diferente. Colima y Villa de Álvarez encabezan la lista con un PIB total combinado de \$27,725,807,000.00, cantidad que representa el 62% del PIB estatal; le siguen el municipio de Cuauhtemoc y Tuxpan con más de \$1,000,000,000.00 de producción total bruta para el 2009 (Figura 13).



Producto interno bruto (miles de pesos)

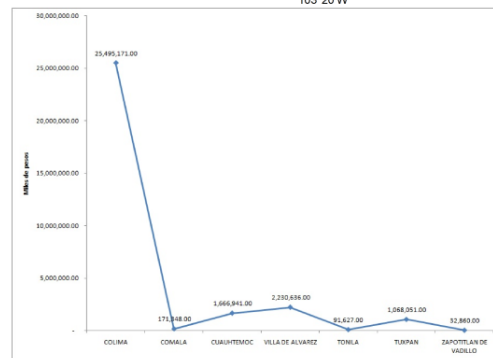
- > \$2,000,000.01
- \$1,000,000.01 - \$2,000,000.00
- < \$1,000,000.00

Municipios de la zona de estudio

002, Colima	010, Villa de Alvarez
003, Comala	103, Tonila
005, Cuauhtémoc	108, Tuxpan
	122, Zapotitlán de Vadillo

Diseño cartográfico: Azalea Judith Ortiz Rodríguez

Sistema de proyección de coordenadas: WGS_84
 Zona UTM: 13 N
 Proyección: Transversa de Mercator
 Datum: D_WGS 1984
 Retícula cada: 0° 20' 00"



Fuente: INEGI (2009) Censos y Censos. IN ESTADÍSTICA (Ed.) Consulta interactiva de datos. México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

INEGI (2005) Marco geoestadístico municipal (MGM2005). IN GEOESTADÍSTICO, M. (Ed.). México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

Figura 13. PIB total por municipio, datos en miles de pesos para el año 2009

El mapa muestra la distribución espacial del PIB para cada una de los municipios incluidos en la zona de estudio, la gráfica inferior agrupa los valores numéricos para cada jurisdicción municipal.

La distribución del PIB por sector de la economía es muy similar a la tendencia nacional y estatal; en la tabla 8 se concentran los datos por municipio y muestra como las actividades primarias en total sólo representan el 0.01% del PIB combinado de todos los municipios; caso contrario se presenta en el caso del sector secundario o manufacturero, el cual representa el 67.53% del PIB combinado de los municipios relacionados.

Tabla 8. Producto interno bruto municipal por sector de la economía, datos en miles de pesos para el año 2009

Municipio	PIB Total	Sector primario		Sector secundario		Sector terciario	
COLIMA	25,495,171	1,565	0.01%	17,178,087	67.38%	8,315,519	32.62%
COMALA	171,348	188	0.11%	60,254	35.16%	110,906	64.73%
CUAUHTEMOC	1,666,941	476	0.03%	1,492,960	89.56%	173,505	10.41%
VILLA DE ALVAREZ	2,230,636	1,011	0.05%	1,078,081	48.33%	1,151,544	51.62%
TONILA	91,627	-	0.00%	24,852	27.12%	66,775	72.88%
TUXPAN	1,068,051	-	0.00%	914,044	85.58%	154,007	14.42%
ZAPOTITLAN DE VADILLO	32,860	-	0.00%	21,864	66.54%	10,996	33.46%
Total	30,756,634	3,240.00	0.01%	20,770,142.00	67.53%	9,983,252.00	32.46%

Este monto de producción es generada por las más de 70 mil personas ocupadas, mismas que se distribuyen en cada uno de los sectores económicos tal como se muestra en la tabla 9. Los datos expuestos destacan al sector terciario o de servicio como el de mayor personal ocupado a pesar de no ser el de mayor producción para el año 2009.

Tabla 9. Personal ocupado a nivel municipal por sector de la economía, datos para el año 2009

Municipio	Total personal ocupado	Sector primario		Sector secundario		Sector terciario	
COLIMA	47,452	137	0.29%	9,089	19.15%	38,226	80.56%
COMALA	2,276	46	2.02%	416	18.28%	1,814	79.70%
CUAUHTEMOC	2,496	7	0.28%	667	26.72%	1,822	73.00%
VILLA DE ALVAREZ	13,800	16	0.12%	4,057	29.40%	9,727	70.49%
TONILA	746	-	0.00%	208	27.88%	538	72.12%
TUXPAN	4,799	-	0.00%	1,329	27.69%	3,470	72.31%
ZAPOTITLAN DE VADILLO	393	-	0.00%	60	15.27%	333	84.73%
Total	71,962.00	206.00	0.29%	15,826.00	21.99%	55,930.00	77.72%

El producto interno bruto per cápita, es decir el valor de la producción total por cada persona ocupada en los diversos sectores de la economía asciende a \$427,401.00 anuales; de los tres sectores, el secundario es el que presenta mayor PIB per cápita, con \$1,312,410.00 anuales por persona ocupada, los municipios que más destacan en este rubro son Cuauhtémoc y Colima tal como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. PIB per cápita por municipio y sector de la economía. Datos en miles de pesos para el año 2009

Municipio	PIB per cápita	Sector primario	Sector secundario	Sector terciario
COLIMA	537.28	11.42	1,889.99	217.54
COMALA	75.28	4.09	144.84	61.14
CUAUHTEMOC	667.84	68.00	2,238.32	95.23
VILLA DE ALVAREZ	161.64	63.19	265.73	118.39
TONILA	122.82	0.00	119.48	124.12
TUXPAN	222.56	0.00	687.77	44.38
ZAPOTITLAN DE VADILLO	83.61	0.00	364.40	33.02

El total de remuneraciones al personal ocupado asciende a \$2,767,217,000.00 anuales, tal como se muestra en la tabla 11; estas remuneraciones se concentran en el sector terciario, seguido del sector manufacturero o secundario y en último lugar el personal ocupado en actividades agrícolas o ganaderas, correspondientes al sector primario. Los municipios que mayor cantidad de remuneraciones pagan son Colima y Villa de Álvarez mismos que destacan en la producción y el personal ocupado.

Tabla 11. Total de remuneraciones al personal por municipio y sector de la economía. Datos en miles de pesos para el año 2009

Municipios	Total de remuneración	Sector primario	Sector secundario	Sector terciario	Rem. Percáp.
COLIMA	2,160,350.00	6,056.00 0.28%	614,151.00 28.43%	1,540,143.00 71.29%	76.10
COMALA	46,996.00	- 0.00%	9,833.00 20.92%	37,163.00 79.08%	52.63
CUAUHTEMOC	118,167.00	120.00 0.10%	83,520.00 70.68%	34,527.00 29.22%	101.43
VILLA DE ALVAREZ	392,239.00	185.00 0.05%	200,931.00 51.23%	191,123.00 48.73%	53.08
TONILA	9,926.00	- 0.00%	5,585.00 56.27%	4,341.00 43.73%	50.13
TUXPAN	35,547.00	- 0.00%	10,263.00 28.87%	25,284.00 71.13%	32.00
ZAPOTITLAN DE VADILLO	3,992.00	- 0.00%	950.00 23.80%	3,042.00 76.20%	35.33
Totales	2,767,217.00	6,361.00 0.23%	925,233.00 33.44%	1,835,623.00 66.33%	70.49

2.2.3 Actividad eruptiva

Bretón *et al* (2002) recopilaron información sobre la actividad del volcán de Colima; abarcaron una temporalidad que va de 1500 al año 2000. Los autores aclaran que previo al siglo XIX la información es ambigua por que refleja la interpretación de quien atestigua la actividad; es a partir de ese siglo que la información recopilada se encuentra mejor documentada y detallada.

El volcán de Colima ha experimentado al menos tres erupciones de tipo Pliniano en 1576, 1818 y 1913; 6 erupciones tipo Soufrière y últimamente eventos eruptivos clasificados como Merapi, consistentes en la caída por gravedad del domo de lava que se genera en su cráter (Bretón *et al*, 2002, Luhr, 2002). Saucedo *et al* (2005) enumeran 25 procesos eruptivos

generadores de flujos piroclásticos y bloques y cenizas (FBC), cuya temporalidad y características se muestran en la tabla 12:

Tabla 12. Procesos eruptivos generadores de flujos piroclásticos en volcán de Colima 1576 – 2001

Año (s)	Tipo de erupción	Observaciones
1576	Pliniana (posible)	Generación de flujos de bloques y cenizas (FBC)
1590	Explosión	Caída de ceniza y generación de FBC estilo Soufriere
1606	Pliniana (posible)	La caída de ceniza llega al Estado de Michoacán, generación de FBC tipo Soufriere
1611	Explosión	Caída de ceniza y FBC estilo Soufriere
1690	Pliniana (posible)	Posible generación de FBC
1771	Soufriere (posible)	La caída de ceniza llega hasta la ciudad de Guadalajara y posible generación de FBC estilo Soufriere
1818	Pliniana	FBC y caída de ceniza que llega hasta la ciudad de México
1869 – 1972	Creación de un cono adventicio	Flujos de lava, FBC estilo Merapi y caída de ceniza
1880	Merapi	Flujos de lava y bloques y ceniza estilo Merapi por el flanco SW del volcán
1885 – 1986	Flujos de lava en el flanco SW-W	Flujos de lava y bloques y ceniza estilo Merapi
1885 – 1986	Soufriere	FBC estilo Soufriere
1890	Explosión	Se reporta caída de ceniza en la ciudad de Guanajuato
1891 – 1992	Soufriere	Caída de ceniza en la ciudad de Colima y FBC estilo Soufriere
1903	Soufriere	Caída de ceniza y FBC estilo Soufriere
1908	Soufriere	Caída de ceniza y FBC estilo Soufriere
1909	Soufriere	Caída de ceniza y FBC estilo Soufriere
1913	Pliniana	FBC estilo Merapi y Soufriere proveniente de una columna Pliniana y caída de ceniza que se reporta a 725 km al NE del volcán
1961 – 1962	Merapi	FBC estilo Merapi, flujos de lava que en el flanco SE presentan un alcance de 4.5 km
1975 – 1979	Merapi	FBC estilo Merapi en el flanco S del volcán con un alcance de 1 km
1981 – 1982	Merapi	FBC estilo Merapi en el flanco N del volcán con un alcance de 2 km
1987	Soufriere	FBC estilo Soufriere
1991	Merapi	FBC estilo Merapi con un alcance de 4 km, flujos de lava que presentan recorrido de 2 km por el flanco SW del volcán
1994	Soufriere	FBC estilo Soufriere con un alcance de 3.5 km
1998 – 1999	Flujos de lava, Merapi y Soufriere	FBC Merapi con alcance de 4.5, Soufriere con alcance de 3.3 km y flujos de lava con alcances de 3 km
2001	Soufriere	FBC estilo Soufriere con un alcance aproximado de 3 km

En épocas recientes, el volcán ha presentado dos fases eruptivas: 1998-2002 y 2004-2005, que muestran un incremento en su actividad si es comparada con los episodios de 1981, 1987 y 1991 (Saucedo *et al.*, 2010). Su actividad está íntimamente relacionada con un complejo sistema magmático subvolcánico; donde el reservorio magmático recibe pulsos periódicos de magma básico proveniente de zonas más profundas; este magma aporta calor y agua, factores que incrementan la explosividad en la dinámica eruptiva (Martín Del Pozzo *et al.*, 1987, Robin *et al.*, 1991, Luhr *et al.*, 1980, Luhr *et al.*, 1982).

Existen estudios que sostienen la presencia de fases definidas que conforman un comportamiento cíclico con duración aproximada de 100 años (Figura 14), situación que aun sigue en debate. Luhr *et al* (1990) propone que las fases explosivas, que cierran el ciclo, son el resultado de un proceso de diferenciación muy largo durante el cual se reciben aportes periódicos de magma básico que generan una mezcla de magmas ácido-básico que sirve como detonante.

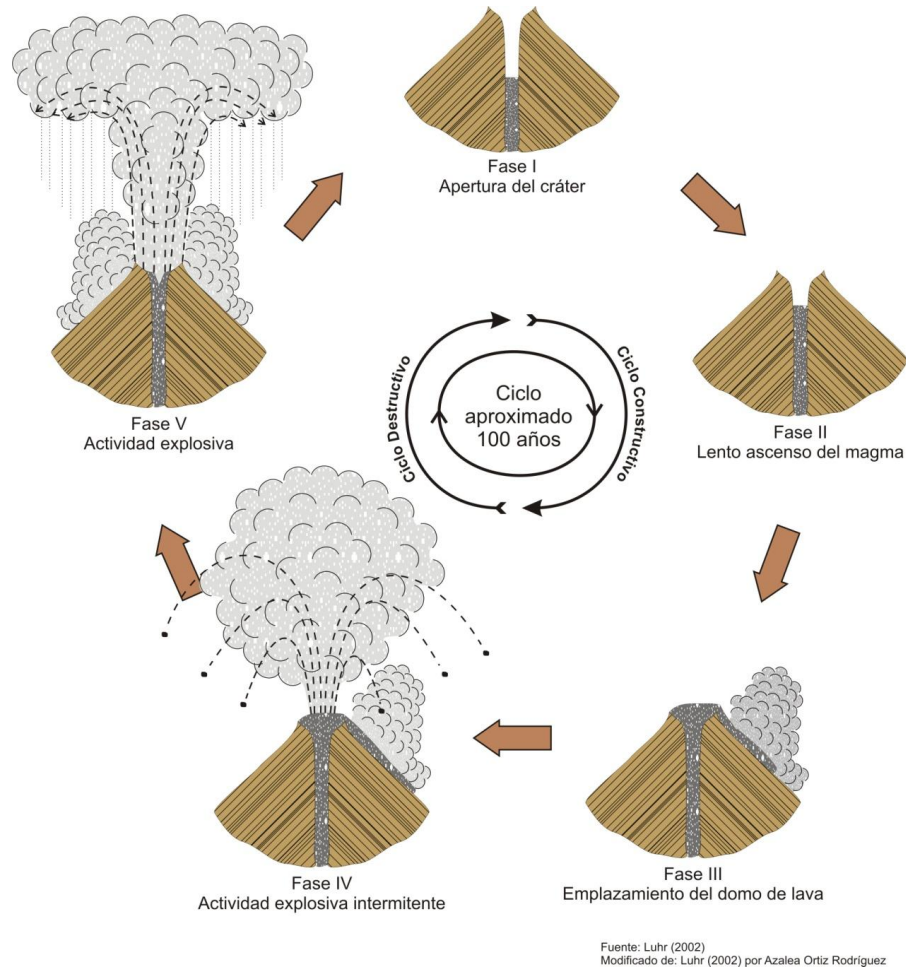


Figura 14. Fases que constituyen el ciclo explosivo de volcán de Colima.

El volcán de Colima, según diversos autores, entre los cuales destaca Luhr (2002) sostiene la presencia de fases definidas durante el proceso eruptivo del volcán; las fases I, II y III se consideran dentro del ciclo constructivo del volcán, incluso parte de la fase IV ya que presenta emisiones de lava junto con procesos explosivos; la fase IV y V se incluyen dentro del proceso destructivo debido a la destrucción parcial del cono volcánico durante las etapas paroxismales de las erupciones.

Por su parte, Robin *et al* (1991) sustentan el comportamiento cíclico, no obstante para ellos la actividad explosiva no cierra el ciclo, sino que lo inician. La explosividad es el resultado de la mezcla de magmas ácidos y básicos en un periodo de tiempo corto; los cuales a la larga se

homogenizan; por tanto definen el ciclo como una sucesión de fases explosivas de corta duración (periodos de mezcla de magmas) y fases efusivas de larga duración (periodos de diferenciación).

Entre los estudios que proponen un proceder cíclico cabe destacar el publicado por Luhr (2002) quien describe las fases según se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Fases que constituyen el comportamiento cíclico del Volcán de Colima. Modificado de Luhr *et al* (1990) y Luhr (2002)

Fase	Descripción	Eventos eruptivos	Tipo de lava
I. Apertura del cráter	Posterior a una erupción explosiva que marca el punto paroxismal y el final del ciclo eruptivo, el cráter se mantiene abierto	Fase final de las erupciones de 1818 y 1913	
II. Lento ascenso de magma	A través del cráter abierto asciende lentamente un domo de lava como resultado del crecimiento endógeno y la extrusión de material proveniente de la base del volcán	1818-1869 y 1913-1999	Se caracteriza por la emisión de lavas de composición homogénea que conforma rocas que van de Dacitas a Andesitas;
III. Emplazamiento del domo de lava en el cráter del volcán	El domo de lava continúa ascendiendo hasta que cubre en la totalidad el cráter del volcán. El ascenso genera que partes del domo comiencen a fluir ladera abajo o que se presenten colapsos gravitacionales con los consecuentes flujos de bloques y cenizas que pueden llegar hasta los 3 o 4 km de distancia. Los flujos de bloques y cenizas preceden y acompañan al emplazamiento de flujos de lava.	1869-1880 (?) 1961-1999	la composición de SiO ₂ es mayor que en el caso de las erupciones explosivas
IV. Actividad explosiva intermitente	La actividad volcánica es intermitente, se presenta en el cráter o a través de conos adventicios como en 1869, cuando se formó el cono el Volcancito. La intensidad se incrementa conforme pasa el tiempo y los índices de explosividad (VEI) se oscilan entre 2-4. La actividad explosiva se alterna con emisión de flujos de lava característicos de la etapa 3	1869-1909 1994, 1999, 2000, 2001	Durante esta fase las lavas emitidas son gradualmente más básicas, aunque en algunos momentos la presencia de SiO ₂ repunta, la tendencia general es a un empobrecimiento de este óxido; las rocas de esta etapa del ciclo muestran oscilaciones irregulares de lavas andesíticas a lavas más básicas lo cual augura una inminente erupción de tipo Peleano
V. Actividad explosiva	El volcán presenta la mayor actividad explosiva, con un VEI de 4 o superior; la actividad involucra la destrucción de los bordes del cráter, columnas eruptivas que permiten la caída de ceniza a centenares de kilómetros en dirección de los	1576, 1818 y 1913	Este tipo de manifestaciones involucran magmas con presencia de entre 57.2 a 60 wt% de SiO ₂ valores inferiores que

vientos dominantes y flujos piroclásticos que pueden llegar a más de 10 km del volcán por la vertiente sur. Esta fase pone fin al ciclo al dejar el cráter libre de material.

los presentes en otros eventos eruptivos.

Con base en lo anterior, los autores sostienen que el Volcán de Colima se encuentra dentro del cuarto ciclo eruptivo, cuya periodicidad permite suponer que el evento explosivo que ponga fin al cuarto ciclo tendrá lugar en el presente siglo (Luhr *et al.*, 1980, Robin *et al.*, 1987, Robin *et al.*, 1991, Luhr *et al.*, 1990).

La proximidad en el cierre de ciclo y el incremento de actividades humanas en las inmediaciones del volcán hacen pertinente la elaboración de estudios que evidencien la vulnerabilidad y el riesgo de los grupos sociales aledaños; máxime si de la variedad de fenómenos que se presentan en su dinámica eruptiva los más recurrentes involucran la producción de flujos piroclásticos y lahares considerados por varios autores como los procesos volcánicos más peligrosos (Gavilanes, 2004, Saucedo *et al.*, 2010).

2.2.4 Erupción de 1913

A lo largo del ciclo eruptivo, la actividad que representa una mayor amenaza es, sin lugar a dudas, la actividad explosiva. De ésta, la erupción de 1913 es considerada la más severa, razón por la cual sus alcances son utilizados como parámetro de referencia en estudios de riesgo y vulnerabilidad asociados con el volcán (Saucedo *et al.*, 2010). A este respecto, Saucedo (1997, 2005) reconstruyó el evento eruptivo 1913 por medio de un estudio exhaustivo de fuentes bibliográficas, testimonios orales, análisis de los depósitos en campo asociados con dicho evento y modelado de los flujos piroclásticos a través del software FLOW3D.

Saucedo (1997) establece que durante la erupción de 1913 la dinámica sufrió cambios temporales relacionados a factores físicos y químicos tales como condiciones morfológicas, grado de alteración de las rocas, presencia de fracturas o fallas, composición química del magma, contenido de volátiles y variaciones en el gasto durante la erupción. Estos cambios permitieron al autor diferenciar la actividad eruptiva en tres fases:

- **Fase I:** Explosiones iniciales en la cima del volcán a conducto cerrado.
- **Fase II:** Explosiones violentas que ocasionaron el destape del conducto y generaron la fase vulcaniana – souffriére.

- **Fase III:** Explosiones paroxísmicas con el conducto parcial o totalmente abierto y dieron lugar a la fase pliniana o subpliniana.

2.2.4.1 Fase I. Explosiones iniciales en la cima del volcán a conducto cerrado

El inicio de la erupción se presentó los días 18 o 19 de enero de 1913 sin actividad fumarólica que le antecediera. En un principio, la actividad consistió en una sucesión de explosiones de poca magnitud en la cima S-SW del volcán las cuales se extendieron al N-NW ocasionadas por la intrusión que el material juvenil hacía en el domo que tapaba el conducto. A raíz de estas explosiones, se formaron flujos piroclásticos que contenían material proveniente de las paredes del cráter, el domo preexistente y en menor medida de material juvenil (Saucedo, 1997).

La apertura del conducto volcánico generó oleadas cuyos depósitos fueron cubiertos por flujos piroclásticos de alta concentración de partículas sólidas con cierto grado de fluidización movilizadas por la fuerza de gravedad; estos flujos se encauzaron hacia el SW por la barranca el Cordobán y hacia el N-NW por la zona del Playón (Figura 15) con un alcance promedio de 4 km y una velocidad de entre 30 y 60 m/s (Saucedo, 1997, Saucedo *et al.*, 2005, Saucedo *et al.*, 2010).

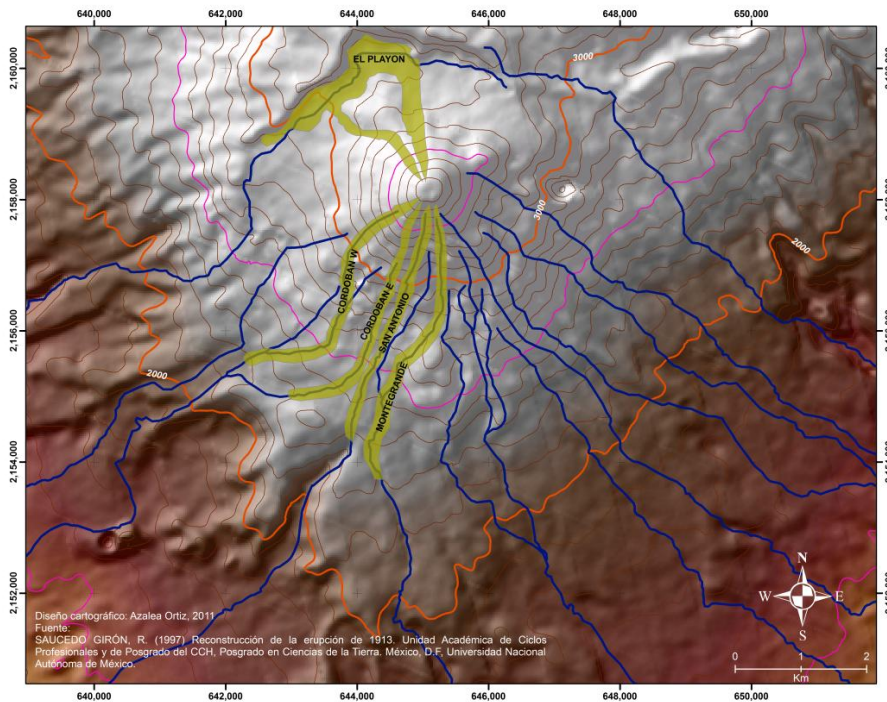


Figura 15. Distribución espacial de los productos piroclásticos de la fase I propuesta por Saucedo (1997) y Saucedo *et al* (2010)

2.2.4.2 Fase II. Explosiones violentas que ocasionaron el destape del conducto y generaron la fase vulcaniana

El paso de la fase I a la fase II fue marcada por un incremento en la intensidad y la violencia de la dinámica; pasó de una actividad tipo Merapi a una vulcaniana durante la madrugada del 20 de enero. El cambio fue ocasionado por un mayor aporte de material juvenil que agregó al sistema magmático una mayor cantidad de volátiles aumentando así la presión (Saucedo, 1997).

El domo que obstruía el conducto fue destruido de forma violenta; la apertura súbita del conducto despresurizó el magma, aumentando así la explosividad y fragmentación con lo cual se formaron de columnas eruptivas no sostenidas y flujos piroclásticos de mayor volumen y movilidad que los presentes en la fase I (Saucedo, 1997).

Los flujos de bloques y ceniza se encausaron por las barrancas ubicadas al SE, S, SW y N con los alcances que se muestran en la tabla 14 (Saucedo, 1997).

Tabla 14. Alcances máximos de los flujos piroclásticos generados durante la fase II propuesta por Saucedo (1997)

Barranca	Alcance máximo (km)
Beltrán	8.65
Arena	7.90
La Tuna	9.20
El Muerto	7.90
Monte Grande	4.60
San Antonio	9.00
Cordobán E	3.50
Cordobán W	3.20
El Zarco	9.50
La Lumbre	9.00
El Playón	2.6

En promedio estos flujos piroclásticos tuvieron un alcance de hasta 9 km y una velocidad de movimiento que osciló entre 55 y 100 m/s; incluyeron cantidades importantes de materia orgánica carbonizada así como depósitos de oleadas generadas por elutriación del flujo denso (Saucedo, 1997, Saucedo *et al.*, 2005). En tanto los flujos se encausaron por las barrancas (Figura 16), las columnas eruptivas generadas por la mayor fragmentación del magma fueron desviadas hacia el N-NE por el viento lo cual favoreció los depósitos de caída en esa dirección.

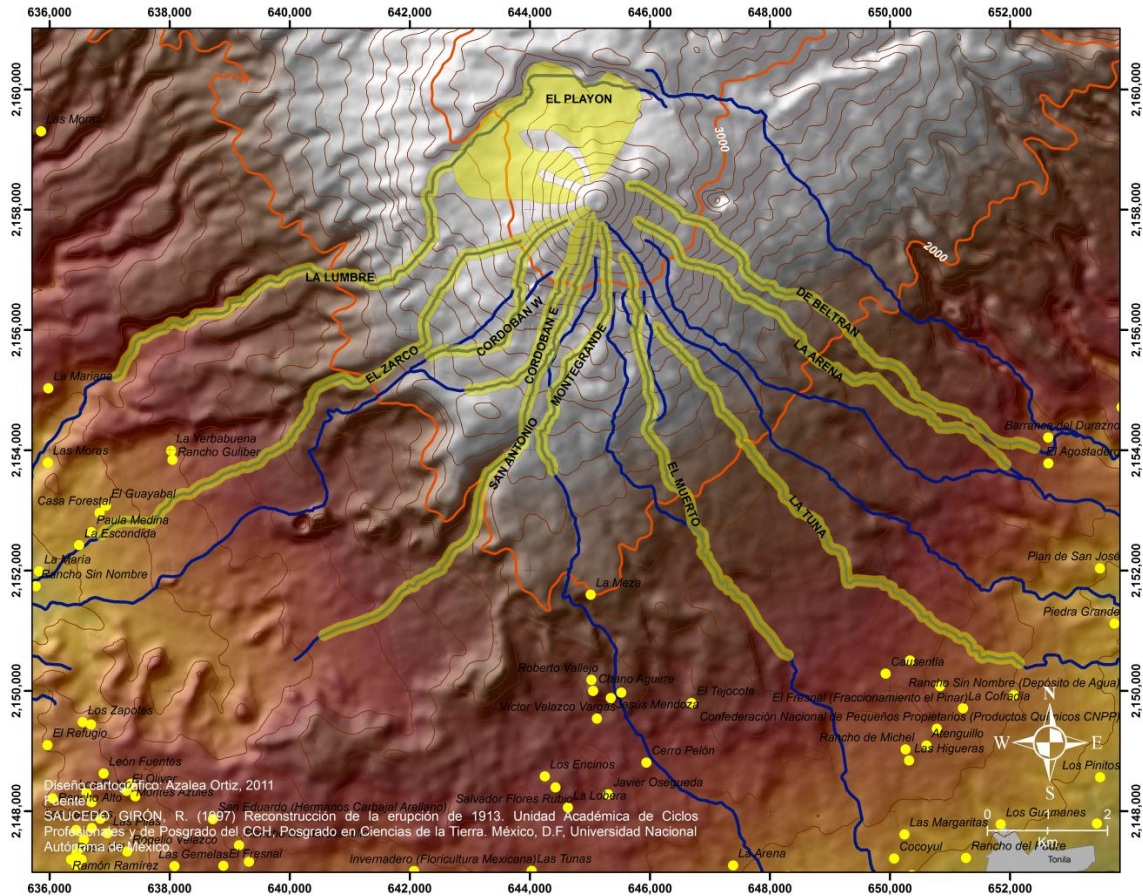


Figura 16. Distribución espacial de los productos piroclásticos de la fase II propuesta por Saucedo (1997)

2.2.4.3 Fase III. Explosiones paroxísmicas con el conducto parcial o totalmente abierto y dieron lugar a la fase pliniana o subpliniana.

La parte más violenta de la erupción duró aproximadamente 9 horas; inició alrededor del medio día y finalizó a las ~8:00 pm del día 20 de enero. Esta fase de la erupción se caracterizó por un incremento en la frecuencia de las explosiones, el desarrollo de una columna eruptiva sostenida de ~21 km de altura, depósitos de caída que viajaron más de 700 km al NE y flujos piroclásticos que descendían por las laderas N, S, SE y SW del volcán (Figura 17) los cuales tuvieron un alcance de hasta 15 km y una velocidad de movimiento de entre 60 y 110 m/s (Saucedo, 1997, Saucedo *et al.*, 2005).

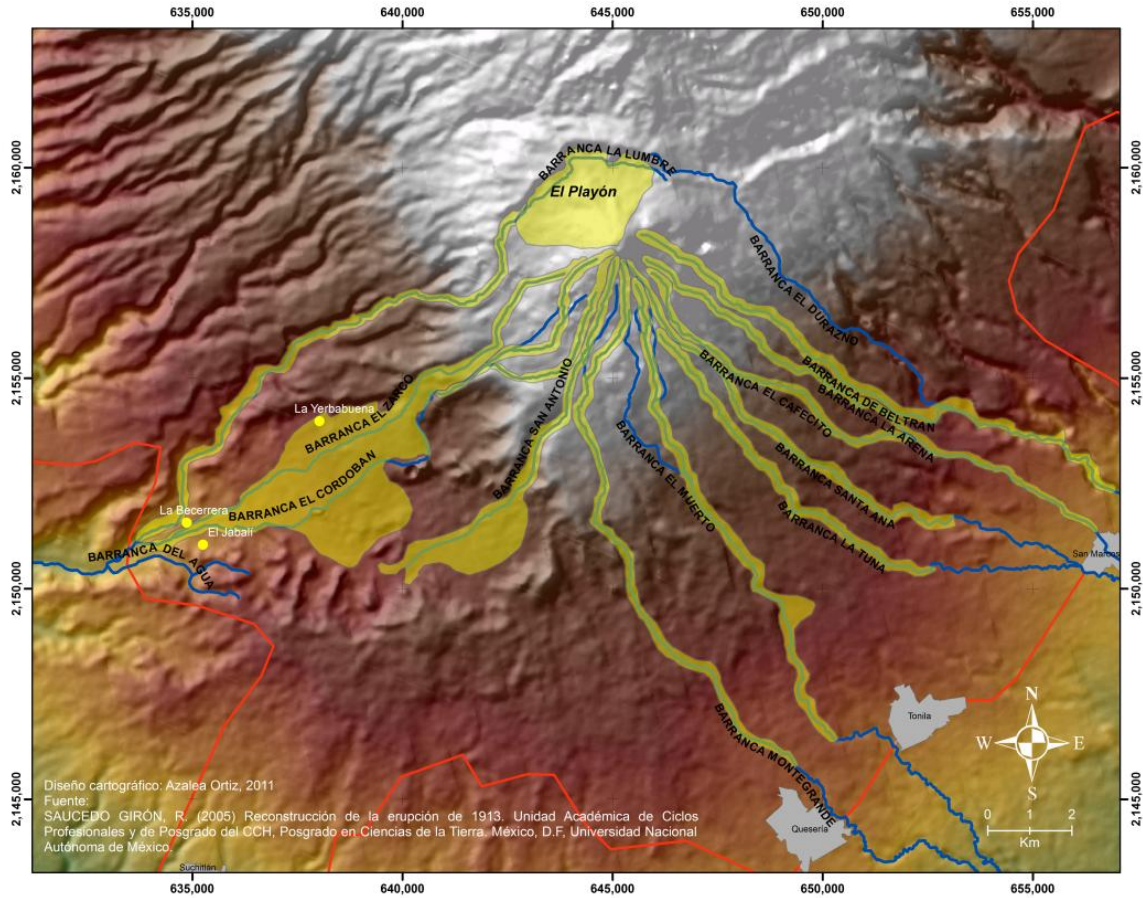


Figura 17. Distribución espacial de los productos piroclásticos de la fase III propuesta por Saucedo (1997)

Los flujos piroclásticos desarrollados durante esta fase estuvieron constituidos por ceniza y pómez, relacionados con la columna eruptiva de tipo pliniano o subpliniano desarrollada en la fase de mayor energía y flujos de ceniza y escoria generados por columnas eruptivas de tipo vulcaniano presentes en la parte final de la fase paroxísmica, cuando la energía iba en decremento (Saucedo, 1997)

La energía que extendió el alcance de los flujos piroclásticos durante la fase III provino del colapso de la columna eruptiva, lo cual incrementó el *momentum* y por tanto la ingestión de aire en el frente con la consecuente fluidización (Saucedo, 1997). Si bien, los flujos producidos se encauzaron por las barrancas, éstos remontaron los límites debido a que durante fases anteriores se emplazó material en los bajos topográficos que tendieron a rellenarlos de forma parcial o total, esta condición se presentó en las barrancas Monte Grande, El Muerto y La Tuna donde los flujos piroclásticos desbordaron los cauces y afectaron espacios que en la

actualidad ocupan los poblados de La Yerbabuena, Becerrera, Ranchos Jabalí, La Joya, El Fresnal, etc. Al remontar las barreras topográficas, los flujos piroclásticos se dispersaron y por tanto se redujo su alcance (Saucedo, 1997).

La etapa final de la fase III se caracterizó por un cambio de comportamiento que pasó de una fase pliniana o subpliniana a una fase vulcaniana, con flujos piroclásticos densos compuestos de ceniza, escoria y material juvenil generado por un magma más básico; este cambio en la composición química del magma generó el decaimiento de la energía y por tanto de la explosividad. El final de la erupción se presentó el 24 de enero con la formación de un flujo piroclástico que se limitó a la barranca La Lumbre, hacia el SW del volcán (Saucedo, 1997)

En resumen, la explosividad en la erupción de 1913 provino de una mezcla de magmas muy diferenciados en su composición, un mayor volumen de magma aportado en el sistema, aumento en la presión por el incremento de volátiles, la presencia de cuerpos de agua y un sistema hidrotermal así como la obstrucción del conducto por la presencia de un domo de lava preexistente (Saucedo, 1997)

Con base en la reconstrucción anterior, Saucedo *et al* (2005) generaron un mapa de peligros en el cual se zonificaron los espacios con base en los alcances de los flujos piroclásticos de cada una de las fases. Dicho mapa constituye un insumo primordial para la presente investigación y se muestra en la figura 18.

En ella se identifican tres zonas en colores rojo, naranja y amarillo; la primera corresponde a los flujos piroclásticos derivados de una erupción tipo Merapi, característica de la fase I de la erupción; esta zona cubre la totalidad del Playón y espacios hacia en SE, S y SW a una distancia máxima de 5 km a partir del cráter (Saucedo *et al.*, 2005).

El espacio señalado con el color naranja demuestra los alcances de una erupción tipo Vulcaniana - Soufrière con alcances de hasta 11 km hacia el SW por las barrancas La Lumbre, Zarco y Cordobán; de 9-10 km en el flanco S-SE que incluye las barrancas Montegrande, El Muerto, La Tuna, Santa Ana, Arena y Beltrán; hacia el N, se consideran de forma completa el espacio denominado El Playón (Saucedo *et al.*, 2005).

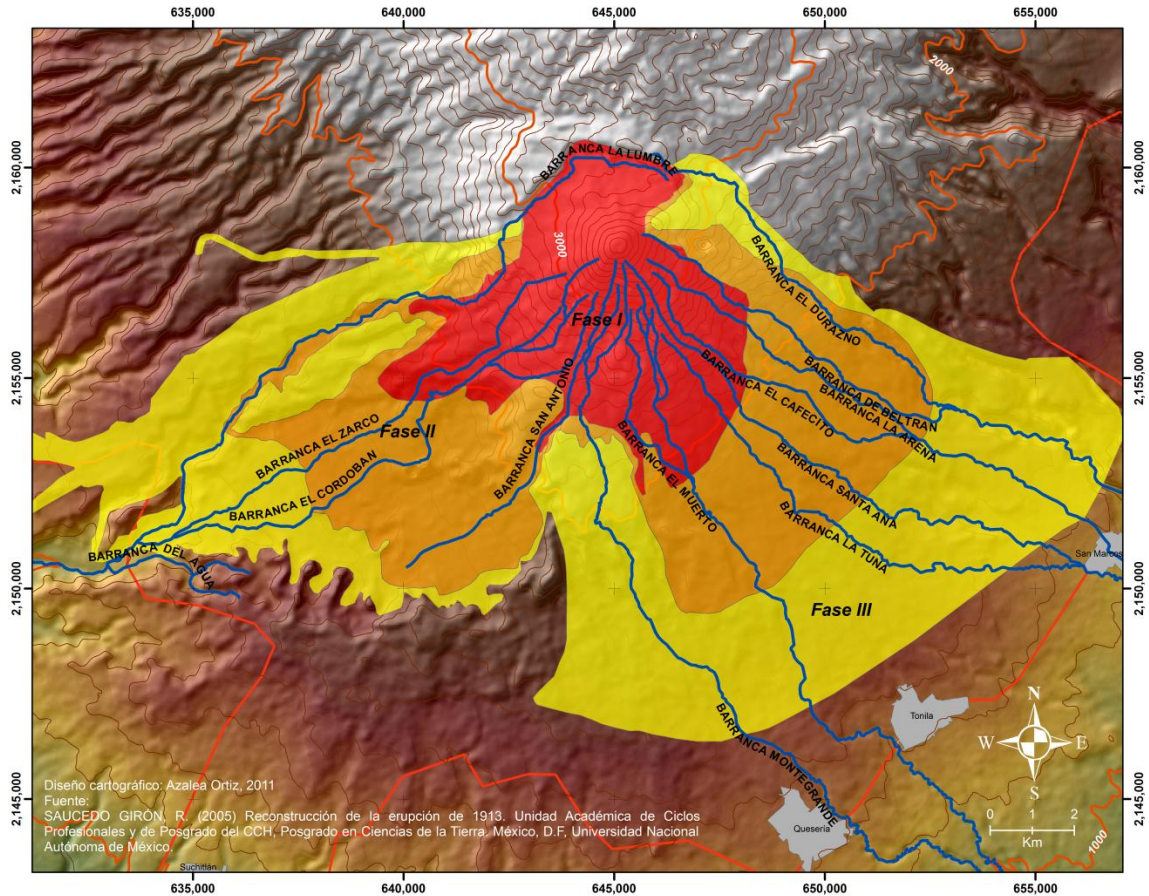


Figura 18. Distribución espacial de las áreas susceptibles a amenaza por flujos piroclásticos propuesta por Saucedo *et al* (2005)

Para finalizar, los espacios señalados con amarillo corresponden al alcance de los flujos piroclásticos derivados del colapso de la columna eruptiva relacionada con una actividad de tipo Pliniana, característica de la fase III, la cual presentó alcances de 12 a 17 km en la parte SW del volcán, 12 – 14 km en el flanco SE y 11 km hacia el W; se incluyen los espacios del Playón hacia el N del cráter.

Entre las limitantes de esta expresión cartográfica, los autores reconocen no haber considerado los alcances de las nubes y oleadas piroclásticas, que al ser mas diluidas que los flujos piroclásticos en *sensu stricto*, presentar alcances mayores a 1 km a partir de los límites establecidos y tienen la capacidad de remontar barreras topográficas; Saucedo *et al* (2010) identificaron depósitos provenientes de de este tipo de actividad en la cota de los 4,000 msnm del volcán Nevado de Colima. En este sentido, los asentamientos urbanos de Tonilá, Jalisco y

Quesería, Colima a pesar de encontrarse más allá de los límites establecidos para flujos piroclásticos, pudieran ser afectados por oleadas de material más diluido (Saucedo *et al.*, 2005).

El material depositado por los flujos piroclásticos de 1913 fue calculado por Saucedo *et al* (2010) en 0.26 km³ los cuales se distribuyeron en las barrancas según se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Volúmenes de material depositados por flujos piroclásticos en cada una de las barrancas calculados por Saucedo *et al* (2010)

BARRANCA	VOLUMEN (km³)
EL PLAYON	0.021000
CORDOBÁN E	0.000130
CORDOBÁN W	0.000100
MONTEGRANDE	0.029340
LA LUMBRE	0.029970
EL ZARCO	0.024210
CORDOBAN	0.024948
SAN ANTONIO	0.013320
EL MUERTO	0.030156
LA TUNA	0.018252
LA ARENA	0.025935
BELTRAN	0.025667
FRESNAL	0.005820
CAFECITO	0.013500

2.2.4.4 Generación y alcance de los lahares relacionados con la erupción de 1913

Los lahares constituyen el proceso volcánico que se presenta con mayor frecuencia; en la zona de volcán de Colima diversos autores han estudiado y analizado estos procesos, entre los cuales cabe destacar Saucedo (1997), Gavilanes (2004), Dávila *et al* (2007), Capra *et al* (2010) y Rodríguez (2010); no obstante el registro de los lahares relacionados con la erupción de 1913 es reducido (Gavilanes, 2004).

La primera referencia se encuentra en el trabajo de Saucedo (1997), quien recopiló relatos de testigos quienes afirmaron que, si bien el fenómeno no se presentó a la par que la erupción de 1913, fue en la temporada de lluvias siguiente que comenzaron a bajar crecientes de agua con material volcánico en suspensión. Estos eventos se repitieron por varios años después de que finalizara el evento eruptivo y trasladaron material hasta el río Tuxpan y Armería (Saucedo, 1997, Gavilanes, 2004).

Gavilanes (2004) realizó un análisis y modelado de lahares a través de la aplicación de software LAHARZ; por medio de dicho programa, el autor incluye cantidades variables de material: 500,000 m³, 1,500,000 m³, 3,000,000 m³ y 5,000,000 m³, e identifica las zonas susceptibles de inundación (Figuras 21A, 21B, 21C y 21D respectivamente). Con base en los resultados obtenidos, concluyó que los lahares relacionados con la erupción de 1913 y que se presentaron hasta 1916 han sido los de mayor magnitud, asimismo, identifica la relación directa entre la cantidad de depósitos piroclásticos emplazados y el alcance de los lahares (Gavilanes, 2004).

Según el estudio referido, los lahares relacionados con la erupción de 1913 transportaron hacia el poniente ~5,000,000 m³ de material por las barrancas La Lumbre, El Cordobán, El Zarco y San Antonio hasta el río Armería. Hacia el oriente se movilizaron ~4,500,000 m³ de material por las barrancas Monte Grande, El Muerto, La Tuna, Santa Ana, El Cafecito y Beltran hasta el río Tuxpan (Gavilanes, 2004).

Las áreas susceptibles de afectación por lahares relacionados con procesos eruptivos similares al de 1913 cubren un área de 5,386,003 m² hacia el SW, S y SE según los resultados del modelo aplicado por Gavilanes (2004). Con base en dicho modelo; hacia el Suroeste, los poblados de La Becerrera, La María y la Yerbabuena (Figura 19A y 19C) serían afectados por los lahares encauzados por las barrancas La Lumbre y el Zarco, con un alcances de 24.5 km y 12 km, respectivamente. El rancho El Jabalí sufriría afectación por los lahares conducidos a lo

largo de las barrancas El Cordobán y San Antonio, con alcances de 12.2 km y 11 km (Figura 19D) (Gavilanes, 2004).

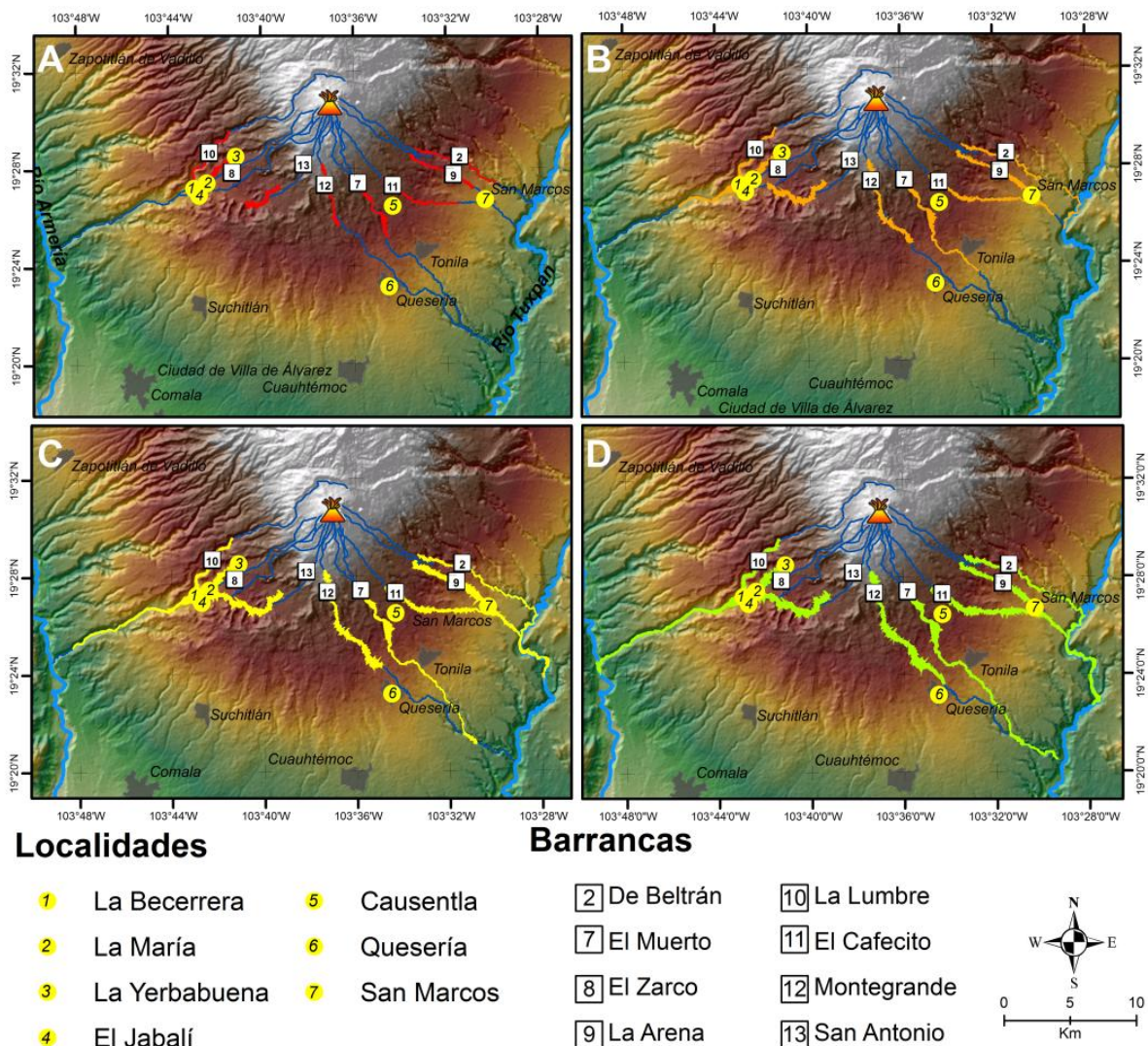


Figura 19. Modelado de las áreas susceptibles a inundación propuesto por Gavilanes (2004)

La figura muestra el modelado de los alcances y las zonas susceptibles de inundación como consecuencia de labares con diferentes volúmenes: 500,000 m³ (A), 1,500,000 m³ (B), 3,000,000 m³ (C) y 5,000,000 m³ (D); estas cantidades fueron propuestas por Gavilanes (2004) con base en testimonios orales de testigos de la erupción de 1913. Al igual que lo propuesto por Saucedo (1997), Gavilanes (2004) concluye que los labares relacionados con la erupción de 1913 y que se presentaron hasta 1916 fueron los de mayor magnitud registrados hasta el momento y movilizaron material hasta el río Tuxpan y Armería.

Hacia el sur y sureste, los lahares se encauzarían por la barranca Montegrande con un alcance de 24 km, en su recorrido pasarían por las inmediaciones de Quesería hasta confluir con el río El Muerto; por la barranca de éste último escurrimiento tendrían un alcance similar (24 km) y

discurriría por las inmediaciones del poblado de Causentla. A lo largo de la barranca La Tuna, La Arena y Beltrán, el alcance calculado sería de 22 km con afectaciones en el asentamiento de San Marcos. En todos los casos, los lahares producidos llegarían hasta el río Tuxpan (Gavilanes, 2004).

El periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos, al igual que la actividad explosiva es de ~ 100 años, como se ha expresado a lo largo del presente trabajo (Gavilanes, 2004); la movilización de ~ 5 millones m^3 de material sería considerado, en términos generales, como el evento máximo esperado y por tanto sus alcances y espacios susceptibles de inundación como aquellos a considerar dentro de la evaluación del riesgo.

Otro de los estudios que abordan procesos de lahares relacionados con la erupción de 1913 es el realizado por Rodríguez (2010) quien realiza un análisis granulométrico, sedimentológico, textural y de componentes de los depósitos de este proceso a lo largo de la barranca La Lumbre; según los resultados obtenidos, el afloramiento más distante de lahar se identificó a ~ 20 km del centro del volcán y cubrió un espacio de 0.7 km^2 .

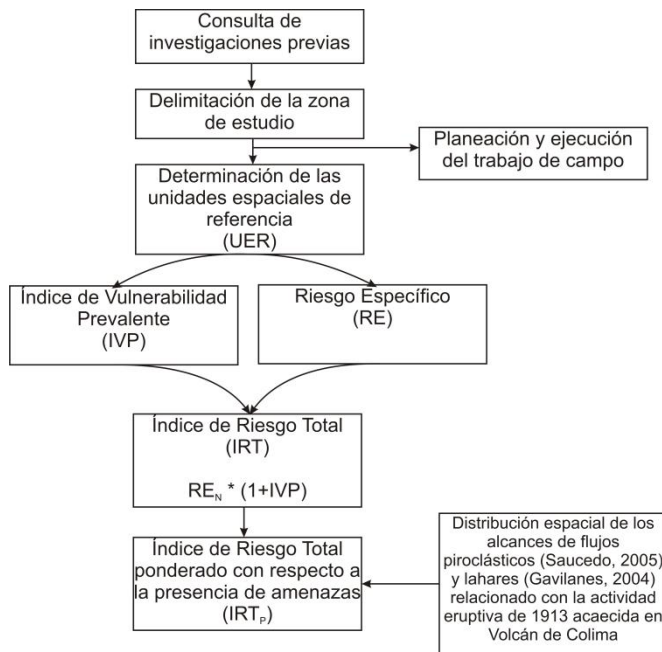
El afloramiento en su mayoría consta de tres unidades bien diferenciadas que permite el seguimiento del depósito a lo largo de la barranca; sólo las muestras más distales carecen de la unidad superior como consecuencia del corto alcance (Rodríguez, 2010).

Rodríguez (2010) identifica la unidad inferior como un flujo de escombros, la intermedia como un flujo hiperconcentrado que se transformó en escombros y la tercera como un flujo de escombros pero de menor alcance que los anteriores; en todos los casos el mecanismo de disparo fue la precipitación pluvial de la zona. El volumen total de material removilizado en los tres depósitos asciende a $2.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ y lo ubica en una magnitud similar al ocurrido en la barranca de Atenquique en 1955 ($3.2 \times 10^6 \text{ m}^3$) (Saucedo *et al.*, 2008) y superior al ocurrido en la barranca Montegrando en 1999 ($6.3 \times 10^5 \text{ m}^3$).

Capítulo 3. Metodología

La metodología utilizada en la presente investigación consistió en 8 etapas mostradas en la figura 20:

La consulta de investigaciones previas coadyuvó en la elaboración del protocolo de tesis así



Elaborado: Azalea Ortiz, 2012

Figura 20. Diagrama de la metodología utilizada

estadísticos y socioeconómicos de INEGI, imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y vectoriales obtenidos de programas de libre acceso y sobre todo el trabajo de campo.

Éste último fue planeado y organizado con base en los recursos disponibles; previo a cualquier salida se elaboró material de apoyo como cartografía, determinación de los sitios a visitar y visualización de éstos en ortofotos y programa Google earth, toda la información recabada fue enriquecida por medio del trabajo de gabinete a través del cual se complementó la información obtenida.

Se calcularon los valores de IVP, RE e IRT con base en procesos metodológicos que si bien fueron aplicados en contextos muy diferentes, fueron ajustados tanto a los datos obtenidos en campo como al detalle de la información que se logró conseguir en dependencias gubernamentales como el INEGI, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT),

como la creación de los marcos teórico, conceptual y de referencia correspondiente. Las fuentes consultadas fueron diversas, entre ellas: estudios previos sobre la génesis y comportamiento eruptivo del volcán de Colima así como aquellas que refiriesen el evento de 1913, que fue considerado como base para identificar los alcances máximos de procesos piroclásticos y lahares; también se consultó geoinformación proporcionada por institutos de investigación, publicaciones oficiales, datos

Secretaría de Energía (SE), Secretaría de la Contraloría, Consejo Nacional de Población (CONAPO), Secretaría de Educación Pública (SEP), Presidencia de la República, Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO) y otras de orden municipal y estatal.

Esta información fue procesada por medio de un sistema de información geográfica (SIG) que no sólo facilitó el manejo de las bases de datos y la expresión cartográfica correspondiente, sino que también fue una herramienta esencial en el análisis espacial y cruce de datos obtenidos para caracterizar las UER.

A continuación se describen a detalle las diferentes etapas en la metodología que permitió conocer la distribución espacial y análisis del riesgo asociado a los fenómenos volcánicos de flujos piroclásticos y lahares relacionados con volcán de Colima.

3.1. Delimitación de la zona de estudio

Para demarcar la zona de estudio fueron considerados los siguientes criterios:

1. Criterio geomorfológico, utilizado para delimitar la zona al N
2. Criterio hidrológico, utilizado para delimitar la zona al E y W
3. Criterio censal, utilizado para delimitar hacia el S

El criterio geomorfológico refiere el uso de las geoformas para discriminar la zona de volcán de Colima de la que corresponde al Nevado de Colima, volcán adyacente. En primer lugar se desplegó la carta topográfica en el SIG y se identificó el sistema de drenaje del volcán y la línea de inflexión de la pendiente entre el somma de Volcán de Colima y la ladera sur del Nevado de Colima; esta línea se proyectó hacia el E y W hasta encontrar un detalle geomorfológico que pudiera conectar los ríos principales de la zona: el Tuxpan al E y el Armería al W; hacia el E se encontró un escurrimiento sin nombre y hacia el W se identificó el escurrimiento de La Delgada. Una vez trazada la línea en el norte de la zona de estudio, se corroboró por medio de la sobreposición de ésta en el modelo digital de elevación (MDE).

El criterio hidrológico se utilizó para delimitar la zona hacia el E con el río Tuxpan y al W con el río Armería. Cabe mencionar que fueron utilizados ambos escurrimientos como límite ya que en la literatura analizada con antelación se refiere que los procesos de lahares relacionados con 1913 llegaron hasta ambos ríos (Saucedo, 1997, Gavilanes, 2004).

El criterio censal se utilizó para delimitar la zona hacia el S. Fue considerado el límite de las áreas geoestadísticas básicas (AGEB) con dimensión municipal demarcadas por el INEGI para los municipios de Comala y Cuauhtémoc. Para unir los límites de dichas AGEB se trazó una línea recta que segmentó parte del municipio de Villa Álvarez y Colima.

El uso de las AGEB permite la consistencia estadística ya que contienen información de población, vivienda y economía circunscripta a una dimensión espacial, con estos datos es posible calcular índices e indicadores que proporcionen las características de la población asentada en la zona de estudio. Una vez establecidos los límites, se aplicó una zona de influencia (buffer) de 1 km de distancia; la figura 21 muestra los criterios de delimitación mencionados.

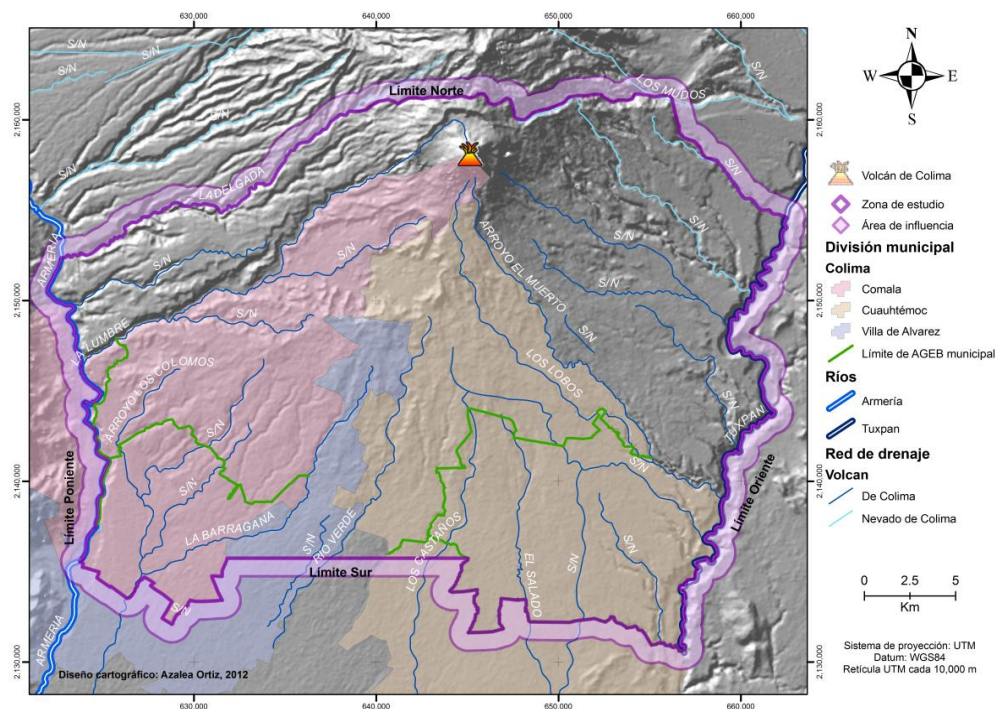


Figura 21. Delimitación de la zona de estudio

La delimitación de la zona de estudio se realizó con base en diferentes criterios, al norte los geomorfológicos, al oriente y poniente los ríos Armería y Tuxpan (hidrológicos) y al sur los límites de las AGEB municipales (censales), con base en ellos se buscó incluir todos los espacios que pudieran encontrarse dentro del área de influencia del volcán de Colima así como conservar la consistencia estadística de los datos de población, vivienda y economía que en conjunto constituyen la vulnerabilidad y el riesgo.

3.2. Determinación de las unidades espaciales de referencia (UER)

La división del territorio en espacios regulares es una metodología ampliamente utilizada para la determinación de áreas prioritarias de conservación (Holland *et al.*, 2007, Castañeda, 2009) así como en estudios sobre asimilación económica del territorio (Propin *et al.*, 1998, Propin *et al.*, 1999), etc.

Este procedimiento permite la creación de celdas con la misma dimensión que pueden ser contrastadas entre sí y definir la presencia o ausencia de un fenómeno. En la presente investigación se propuso la división de la zona de estudio en UER con la finalidad de mantener una consistencia estadística sobre todo porque la información obtenida para generar índices e indicadores así como determinar el inventario de los elementos bajo amenaza se encuentra disponible en diferentes formatos vectoriales: puntos, líneas y polígonos. Los datos de población con información estadística de población, vivienda y economía se despliegan en puntos y polígonos al igual que los espacios dedicados a las labores agropecuarias, por mencionar un ejemplo.

Las UER generadas fueron obtenidas por medio de hexágonos regulares con dimensión de 1 km²; el hexágono fue seleccionado ya que es la figura geométrica regular que cubre una superficie de forma completa, sin dejar espacios en blanco y abarcar una mayor área con el menor perímetro, por tanto fue menor el número de UER a manejar que aquellas que hubiesen resultado de manejar cuadros o triángulos (Miró, 2007). El área que abarcó cada UER fue decidida con base en la obtención de proporciones directas como población por kilómetro cuadrado o longitud de vías de comunicación en la misma dimensión espacial.

Las UER funcionaron como celdas en donde se agregaron características específicas, como población, vivienda, edificaciones, espacios agropecuarios, escuelas, etc. A través del teselado de la zona de estudio delimitada en el punto anterior se obtuvieron 1,124 UER que se muestran en la figura 22, mismas que abarcan tanto zonas rurales como urbanas, infraestructura vial y de energía entre otros elementos que fueron contabilizados dentro del análisis del riesgo y vulnerabilidad.

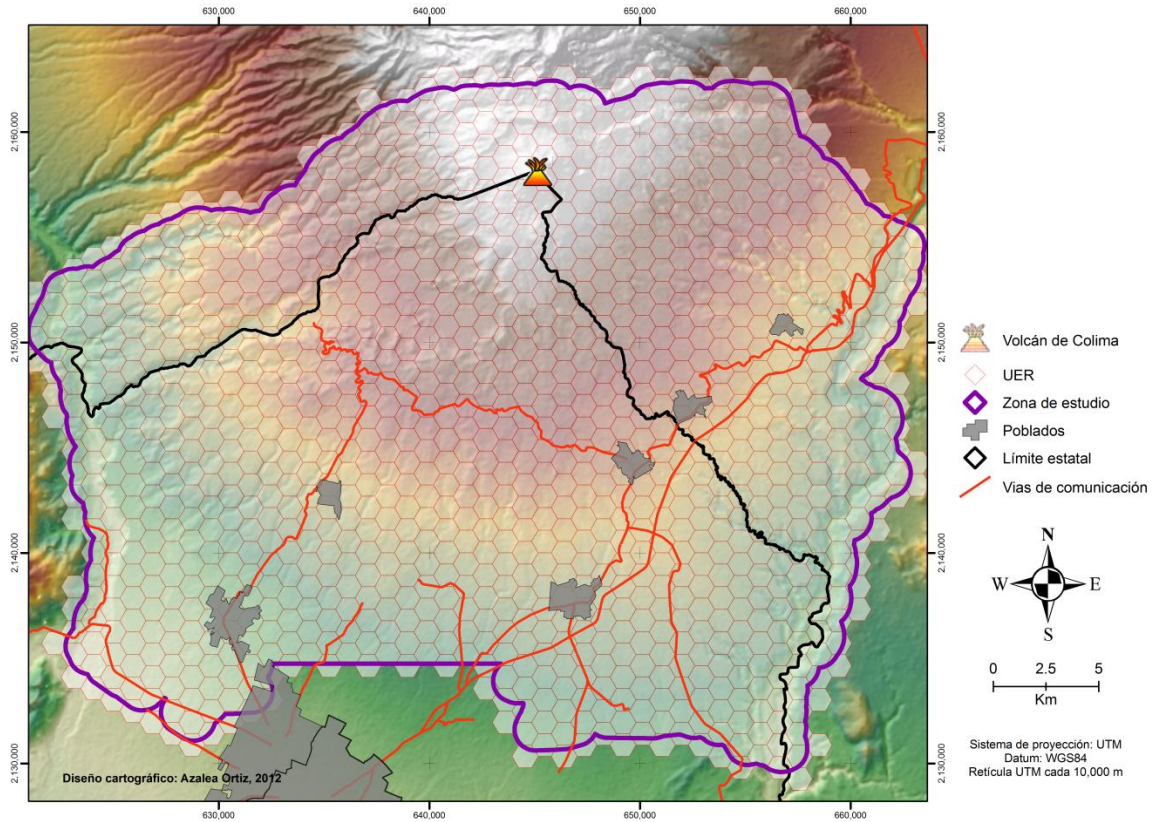


Figura 22. Distribución espacial de las unidades espaciales de referencia (UER) utilizadas en la presente investigación

La zona de estudio fue teselada en hexágonos regulares de 1 km² denominados unidades espaciales de referencia (UER), éstas fueron utilizadas como celdas en las cuales se contabilizaron características específicas que permitieran la generación de índices e indicadores para el cálculo del IVP, RE e IRT; el uso de esta retícula proporcionó la base para una consistencia estadística que permitiera caracterizar y comparar espacios entre sí.

3.3. Cálculo del índice de vulnerabilidad prevalente (IVP)

El IVP es un indicador compuesto que caracteriza las condiciones predominantes de vulnerabilidad en un espacio determinado en términos de exposición de áreas propensas, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia social en general (Cardona, 2005).

A través de estos cálculos se evidencia la distribución de los espacios donde los problemas ocasionados por un crecimiento social y económico inadecuado favorecen condiciones de vulnerabilidad que a la larga subyacen en los procesos de análisis de riesgo (Cardona, 2005).

Para el cálculo de este elemento, la cobertura de las UER fue cruzada con las siguientes capas temáticas:

- Datos vectoriales de las cartas E13B24, E13B25, E13B34 y E13B35, Marco geoestadístico municipal (INEGI, 2005a) e información vectorial del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2010b). De esta información se desprendieron las siguientes coberturas temáticas:
 - a. Asentamientos rurales y urbanos
 - b. Escuelas
 - c. Instalaciones diversas
 - d. Longitud de líneas de transmisión
 - e. Longitud de vías de comunicación (carreteras, caminos, vías férreas y puentes)
 - f. Rasgos hidrológicos puntuales
 - g. Subestaciones eléctricas
 - h. Áreas dedicadas a la producción agropecuaria.
 - i. Unidades económicas

A través de este procedimiento se determinó el número de asentamientos humanos, longitud de vías de comunicación y líneas de transmisión, escuelas y áreas con producción agropecuaria por cada UER. Obtenidos los datos por UER se consultaron los censos y conteos de población y vivienda para generar una base de datos que contuviese las características de la población y vivienda que permitiera el cálculo de indicadores.

Como se ha mencionado a lo largo de la presente investigación, el IVP es el promedio de tres indicadores:

$$IVP = \frac{IVP_{Exposición} + IVP_{Fragilidad} + IVP_{Resiliencia}}{3}$$

3.3.1 Índice de vulnerabilidad prevalente por exposición física (IVP_{EF})

Compuesto por todos aquellos indicadores que reflejen un incremento de los bienes y personas expuestas y susceptibles a una amenaza (Cardona, 2005). Para el cálculo de este elemento, se consideró el promedio de los siguientes indicadores normalizados:

1. **Población total y número de viviendas habitadas para los años 2000 y 2010.**
2. **Tasa de crecimiento poblacional y ocupación de vivienda entre 2000 y 2010.**

Estos indicadores muestran los espacios con mayor crecimiento y ocupación de viviendas dentro de la zona de estudio, el cálculo se lleva a cabo a través de la siguiente fórmula propuesta por Palacio *et al* (2004):

$$TCMA = \left(\sqrt[t]{t_1/t_2} - 1 \right) * 100$$

Donde:

t= periodo de tiempo entre el año inicial y el año final

t₁= cantidad de población o viviendas habitadas en el periodo de tiempo inicial

t₂= cantidad de población y viviendas habitadas en el periodo de tiempo final

3. **Metros de vías de comunicación por kilómetro cuadrado.** Este indicador muestra cual de las UER contiene en sí la cantidad de carreteras, caminos, puentes y vía férrea, se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$MVCkm2 = \frac{mvc}{UER}$$

Donde:

mvc= longitud de vías de comunicación expresado en metros

UER= dimensión areal de la unidad espacial de referencia

4. **Metros de puentes por kilómetro cuadrado.** Los puentes fueron considerados de vital importancia ya que permiten la comunicación a través de las profundas barrancas formadas en las laderas del volcán, por ello también se contabilizaron como un elemento aparte de las vías de comunicación. A través de este indicador se

pudo conocer cuantos metros de puentes existen en cada UER y se calculó a través de la siguiente relación:

$$MPkm2 = \frac{mp}{UER}$$

Donde:

mp= longitud de puentes expresado en metros

UER= dimensión areal de la unidad espacial de referencia

5. **Metros de líneas de trasmisión por kilómetro cuadrado.** al igual que las vías de comunicación, este indicador la proporción de líneas de trasmisión de energía se contienen en cada UER; las líneas de trasmisión se consideran estratégicas ya que el daño en una de sus secciones afecta a una cantidad de población importante, además la energía eléctrica es uno de los insumos básicos para que la población mantenga la continuidad en sus actividades. Se calculó a través de la siguiente relación:

$$MLTEkm2 = \frac{mlte}{UER}$$

Donde:

mlte= longitud de líneas de trasmisión eléctrica expresado en metros

UER= dimensión areal de la unidad espacial de referencia

6. **Rasgos hidrológicos puntuales por kilómetro cuadrado.** Entre estos elementos se consideraron manantiales, tanques elevados, pozos y demás infraestructura que abastece de agua potable a la población. Los daños generados a cualquiera de estos elementos resultaría en riesgos sanitarios y por tanto una interrupción en las actividades de la población, por tanto las UER con mayor cantidad de estos elementos sugiere una mayor vulnerabilidad. Se calculó a través de la siguiente relación:

$$RHPkm2 = \frac{rhp}{UER}$$

Donde:

rhp= rasgos hidrológicos puntuales, expresado en unidades

UER= dimensión areal de la unidad espacial de referencia

7. **Unidades económicas por kilómetro cuadrado.** las unidades económicas son definidas por el INEGI como aquellas entidades productora de bienes y servicios

dentro de una adscripción territorial (INEGI, 2010b), es decir, son negocios que, independientemente del tamaño, proporcionan empleos y por tanto contribuyen a la generación de riqueza de un lugar. Se asume que entre mayor número de unidades económicas dentro de un espacio es mayor la vulnerabilidad que éste presenta ya que si es afectado por cualquier fenómeno, la producción de bienes y servicios y por tanto el empleo de la población sería interrumpido. Se calculó a través de la siguiente relación:

$$Uecokm2 = \frac{Ueco}{UER}$$

Donde:

Ueco= Unidades económicas, expresado en unidades

UER= dimensión areal de la unidad espacial de referencia

8. **Instalaciones diversas (no viviendas) por kilómetro cuadrado.** las instalaciones diversas comprenden construcciones cuyo uso es orientado al servicio de la comunidad como son templos, subestaciones eléctricas, aeropuertos, instalaciones deportivas, escuelas, asistencia médica y otros aquellos que salen del rubro de la vivienda; la contabilización de estos elementos permite conocer cuantas construcciones, además de las viviendas, se concentran en una territorio, por tanto se asume que entre mayor sea la cantidad de instalaciones diversas, mayor es la vulnerabilidad del espacio. Se calculó a través de la siguiente relación:

$$IDVkm2 = \frac{idv}{UER}$$

Donde:

idv= Número de instalaciones diversas, expresado en unidades

UER= dimensión areal de la unidad espacial de referencia

9. **Proporción de área dedicada a las actividades agropecuarias en un kilómetro cuadrado.** las actividades agropecuarias presentan un patrón areal, es decir, van más allá de la ubicación puntual del establo o granja en donde se concentra la cosecha para su posterior distribución; la afectación a estos espacios radica en pérdidas económicas e interrupción en la producción de insumos alimenticios e industriales a la población. En este sentido se considera que una UER que dedica el 100% de su espacio a las actividades agropecuarias presenta una mayor

vulnerabilidad que aquellas que dedican menor proporción. El indicador se obtuvo a través de la siguiente fórmula:

$$Agropkm2 = \frac{agrop}{UER}$$

Donde:

agrop= espacio dedicado a las actividades agropecuarias expresado en m²

UER= dimensión areal de la unidad espacial de referencia

3.3.2 Índice de vulnerabilidad prevalente por fragilidad socioeconómica (IVP_{FS})

Compuesto por indicadores que reflejan las debilidades relativas o condiciones de deterioro que magnifican los efectos directos causados por un fenómeno peligroso (Cardona, 2005). Este elemento se obtuvo para cada UER a través del promedio de los siguientes indicadores e índices normalizados:

1. **Proporción de la población económicamente activa (PEA) con respecto del total, 2010.** La PEA comprende todos los individuos que, de manera independiente al género, conforman la fuerza de trabajo disponible para la producción de bienes materiales y servicios; el mínimo de edad para formar parte de la PEA son 12 años. Se asume que entre mayor sea la cantidad de personas que puedan ingresar a cualquier unidad económica, mayor será el desarrollo logrado por la población y en consecuencia el bienestar y la capacidad de enfrentar y recuperarse de cualquier agente perturbador. Se calculó a través de la siguiente relación:

$$PropPEA = \frac{PEA}{PT} * 100$$

Donde:

PEA= Población económicamente activa

PT= Población total

2. **Tasa de ocupación.** Indica cuantas personas que tiene la capacidad de producir bienes y servicios (PEA) cuentan con un empleo (Palacio *et al.*, 2004); entre mayor sea la población que cuenta con un empleo mayor es la capacidad de un grupo social de enfrentar y sobreponerse a un evento perturbador ya que han generado riqueza o cuentan con servicios de salud y previsión que permiten la transferencia del riesgo. Se calculó con la siguiente relación:

$$TO = \frac{PO_{PEA}}{PEA} * 100$$

Donde:

PO_{PEA} = Población económicamente activa ocupada

PEA = Población económicamente activa

3. **Tasa de desocupación.** Indica cual es la proporción de la PEA que no cuenta con un empleo u ocupación (Palacio *et al.*, 2004); entre mayor sea la proporción se asume que el grupo social cuenta con menos capacidad de enfrentar un evento que trastoque su cotidianidad por tanto cuenta con una mayor debilidad relativa; se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$TD = \frac{PD_{PEA}}{PEA} * 100$$

Donde:

PD_{PEA} = Población económicamente activa desocupada

PEA = Población económicamente activa

4. **Índice de envejecimiento.** Indica el número de personas de 60 o más años por cada 100 personas menores de esa edad; es uno de los indicadores de la estructura de los grupos quinquenales de una localidad que permite conocer si la población de un territorio se encuentra en proceso regresivo ya que esto incide en la demanda de servicios de salud y asistencia social (Palacio *et al.*, 2004). Se asume que a mayor índice de envejecimiento un espacio presenta mayor vulnerabilidad ya que sus pobladores presentan una debilidad inherente a los factores perturbadores que en ellos pueden incidir. Se calculó por medio de la siguiente fórmula:

$$IEnv = \frac{Pob\ 60\ y\ más}{Pob\ 59\ y\ menos} * 100$$

Donde:

Pob 60 y más = Población de 60 años y más

Pob 59 y menos = Población de 0 a 59 años

5. **Índice de juventud.** Indica la relación entre una población inferior a los 14 años y la población mayor a esa edad (Palacio *et al.*, 2004). Al igual que indicador anterior, éste forma parte del análisis estructural de la población y permite conocer si la población se encuentra en expansión o es estacionaria, lo anterior conlleva una

mayor demanda de servicios de salud, educativos y asistencia social que incrementa la vulnerabilidad de un espacio. Se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$I_{Juv} = \frac{Pob\ 0\ a\ 14}{Pob\ 15\ y\ más} * 100$$

Donde:

Pob 0 a 14 = Población de 0 a 14 años

Pob 15 y más = Población mayor de 15 años

6. **Tasa de dependencia.** Indica la relación entre la población económicamente inactiva (PEI) y la población económicamente activa, es decir, cuantos individuos de la PEI son sustentados por la PEA (Palacio *et al.*, 2004). Entre mayor sea el índice muestra que una mayor cantidad de población es soportada por una fracción de ésta, en consecuencia la dependencia es mayor al igual que la debilidad relativa ante los fenómenos peligrosos. Se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$I_{Juv} = \frac{Pob\ 0\ a\ 14 + Pob\ 65\ y\ mas}{Pob\ 15\ a\ 64} * 100$$

Donde:

Pob 0 a 14 = Población de 0 a 14 años

Pob 65 y más = Población mayor a 65 años

Pob 15 a 64 = Población de 15 a 64 años

7. **Tasa de actividad.** Indica el grado de participación de hombres y mujeres en la actividad económica (Palacio *et al.*, 2004), se asume que a mayor participación (índice mayor) mayores son las fortalezas de un grupo social. Se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$TA = \frac{PEA}{Pob\ 12\ y\ más} * 100$$

Donde:

PEA = Población económicamente activa

Pob 12 y más = Población mayor a 12 años

8. **Porcentaje de viviendas con piso de tierra.** Es la proporción de viviendas que no cuentan con material de recubrimiento en el suelo de su vivienda y el total de viviendas habitadas. La inexistencia de recubrimiento en el piso de los hogares implica una mayor exposición de los habitantes a agentes patógenos que merman el bienestar y la salud. Una población con este tipo de problemática indica escasos

recursos y por tanto una mayor vulnerabilidad. Se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$PVPT = \frac{VPT}{VIVocup} * 100$$

Donde:

VPT = Viviendas con piso de tierra

VIVocup = Total de viviendas ocupadas

9. **Porcentaje de viviendas sin electricidad.** La energía eléctrica constituye un insumo básico para los hogares; proporciona la energía para alumbrar, conservar alimentos, mantenerse comunicado, etc. La carencia de este bien implica una mayor vulnerabilidad, se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$PVSE = \frac{VSE}{VIVocup} * 100$$

Donde:

VSE = Viviendas sin servicio de electricidad

VIVocup = Total de viviendas ocupadas

10. **Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada.** Al igual que la energía eléctrica, la presencia de agua entubada implica un mayor bienestar a las poblaciones así como un menor riesgo de exposición agentes patógenos que pudiesen desarrollar en los reservorios de agua donde se proveen del vital líquido. La carencia de este bien incrementa, por tanto, la vulnerabilidad de la población y se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$PVSA = \frac{VSA}{VIVocup} * 100$$

Donde:

VSA = Viviendas sin agua entubada dentro del predio

VIVocup = Total de viviendas ocupadas

11. **Porcentaje de viviendas sin bienes.** La carencia de inmobiliario dentro de la vivienda implica un menoscabo en el bienestar familiar, por tanto es un indicador de debilidad social que pudiera exacerbar los efectos de fenómenos naturales potencialmente peligrosos, se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$PVSB = \frac{VSB}{VIVocup} * 100$$

Donde:

VSB = Viviendas sin bienes

VIVocup = Total de viviendas ocupadas

12. **Porcentaje de viviendas con refrigerador.** La presencia de este enser doméstico favorece la conservación de los alimentos y por tanto la menor probabilidad en el padecimiento de enfermedades gastrointestinales e intoxicaciones. Se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$PVCR = \frac{VCR}{VIVocup} * 100$$

Donde:

VCR = Viviendas con refrigerador

VIVocup = Total de viviendas ocupadas

13. **Grado promedio de escolaridad.** La educación formal si bien no garantiza la ausencia de fenómenos naturales que puedan perturbar la vida cotidiana de los pobladores si garantiza una toma de decisiones informada y consensuada. A mayor grado de escolaridad promedio se asume que la población presenta mayores fortalezas para enfrentar y tomar decisiones ante cualquier situación que amenazante. Se adquirió el dato de manera directa según lo establecido en los censos de población de INEGI 2000 y 2010 (INEGI, 2000, INEGI, 2010a)

14. **Porcentaje de población en edad escolar básica que no asiste a la primaria.** Es el cociente resultante de dividir la población de 6 a 11 años que no asiste a la escuela entre la población total dentro de ese rango de edad; esto indica el total de niños que teniendo edad para estudiar no lo hace por diversas circunstancias, en este sentido, a mayor es el porcentaje mayor es la vulnerabilidad de la población. Se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$PNP = \frac{P6a11NE}{P6a11} * 100$$

Donde:

P6A11NE = Población de 6 a 11 años que no asiste a la escuela primaria

P6A11 = Población total de 6 a 11 años

15. **Porcentaje de población en edad escolar básica que no asiste a la secundaria.** Al igual que el indicador anterior, éste refleja el porcentaje de población que cuenta con edad para matricularse dentro de los programas de

educación básica no logra hacerlo por diversas circunstancias. Sobra decir el impacto que la educación formal tiene en la población, basta decir que aquella proporciona las herramientas para el desarrollo personal y social de la población. Se calculó con base en la siguiente fórmula:

$$PNP = \frac{P12a14NE}{P12a14} * 100$$

Donde:

P12a14NE = Población de 12 a 14 años que no asiste a la escuela primaria

P12a14 = Población total de 12 a 14 años

16. **Tasa de analfabetismo.** Muestra el porcentaje de la población adulta que no sabe leer y escribir. La edad mínima para ser considerado dentro de este rubro de población es de 15 años. El analfabetismo interpone barreras de comunicación para la aplicación de planes y programas tendientes a disminuir el riesgo por medio de la prevención y las acciones proactivas de la población, por tanto, a mayor tasa de analfabetismo, mayor es la vulnerabilidad. Se obtuvo por medio de la siguiente fórmula:

$$PNP = \frac{P12a14NE}{P12a14} * 100$$

Donde:

P12a14NE = Población de 12 a 14 años que no asiste a la escuela primaria

P12a14 = Población total de 12 a 14 años

3.3.3. Índice de vulnerabilidad prevalente por falta de resiliencia (IVP_{FR})

Compuesto por todos aquellos indicadores que refieren la incapacidad de recuperarse o absorber el impacto de los fenómenos peligrosos, cualquiera que sea la naturaleza y severidad de las amenazas (Cardona, 2005). Se obtuvo calculando el promedio de los siguientes indicadores normalizados:

1. **Índice de marginación.** Medida desarrollada por el CONAPO que permite identificar la intensidad de privaciones y exclusión social de una población en un espacio geográfico como resultado de un deficiente acceso a la educación, residencia en viviendas inadecuadas, ingresos económicos insuficientes, entre otros elementos que intensifican las carencias y disminuyen la capacidad de

sobreponerse a sucesos adversos. La información fue recopilada de las bases de datos dispuestas por CONAPO a nivel de localidad (2006)

2. **Índice de suficiencia vial.** Representa la capacidad que tiene la red vial de una adscripción territorial para garantizar los servicios de transporte, en consideración a la población y la superficie territorial analizada, se calculó con base en la siguiente fórmula propuesta por Palacio *et al* (2004):

$$ISV = \frac{KmV}{\sqrt{P * A}} * 100$$

Donde:

KmV = Kilómetros de vías de comunicación

P = Población total

A = Superficie total del territorio analizado

3. **Porcentaje de población con derecho a servicios de salud.** es el cociente que resulta de dividir a la población perteneciente a cualquiera de los servicios de salud brindados por el Estado entre la población total del espacio analizado. Los servicios médicos ofertados por el Estado, de manera independiente a la calidad de éstos, permiten la transferencia del riesgo y proporcionan a la población la capacidad de sobrevivir a amenazas que menoscaban su bienestar. Se obtuvo a través de la siguiente fórmula:

$$PPDSS = \frac{PDSS}{PT} * 100$$

Donde:

PDSS = Población derechohabiente a servicios de salud

PT = Población total

4. **Porcentaje de viviendas con bienes receptores de medios de comunicación (radio, televisión, celular, teléfono e internet).** La presencia de estos medios de comunicación permite que la población reciba información oportuna para la toma de decisiones proactivas ante fenómenos naturales peligrosos. La incomunicación puede resultar fatal en momentos de contingencia. Se obtuvo por medio de la siguiente fórmula:

$$PVMC = \frac{VMC}{TVo} * 100$$

Donde:

VMC = Total de viviendas con aparatos receptores de medios de comunicación (radio, televisión, teléfono celular, teléfono fijo o internet)

TVo = Total de viviendas ocupadas

5. **Porcentaje de la población adulta con estudios básicos finalizados.** Refleja la proporción de población mayor de 18 años que cuenta con los estudios básicos – primarios y secundarios – terminados. La educación formal proporciona herramientas indispensables para el logro del bienestar personal y social de los pobladores, por tanto una mayor capacidad de sobreponerse a procesos naturales peligrosos. Se calculó con base en la siguiente propuesta matemática:

$$PPAEBF = \frac{P18ymásEBF}{P18ymas} * 100$$

Donde:

P18ymásEBF = Población de 18 años y más con estudios básicos finalizados

P18ymás = Población total mayor de 18 años

6. **Población adulta con educación pos básica.** Refiere a toda aquella población mayor de 18 años que cuenta con estudios de bachillerato y posteriores. Similar al indicador anterior, refleja las herramientas con las que cuenta una población para la toma de decisiones proactivas y eficientes para enfrentar y sobreponerse a procesos peligrosos. Se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$PPAEPB = \frac{P18ymasEPB}{P18Ymás} * 100$$

Donde:

P18ymasEPB = Población de 18 años y más con estudios post básicos

P18ymas = Población total mayor de 18 años

7. **Tipo y calidad de transporte de la localidad a la cabecera municipal.** la calidad en el servicio de transporte de la localidad hacia la cabecera municipal es un elemento indispensable en la evaluación de la vulnerabilidad. A mayor calidad y menor tiempo de transporte se asume que la población cuenta con mayor capacidad de desplazamiento en caso de una contingencia; este valor se calculó a través del promedio en la calificación de los siguientes conceptos referentes al transporte disponibles en el censo de 2010 publicado por INEGI (2010a):

- a. **Conexión a carretera (Pavimentada, terracería y no conexas)**
- b. **Distancia a la carretera (distancia en km)**

- c. **Tipo de transporte (micro, combi, camioneta, autobús, taxi, no hay transporte)**
- d. **Tiempo de traslado a la cabecera**
- e. **Frecuencia del transporte**
- f. **Costo del transporte**

A cada uno de los elementos se le asignó un valor numérico que partió de 0 para las características mejores y valores mayores en tanto la calidad decrecía; la calificación resultante se sumó para obtener el valor del indicador.

8. **Problemáticas sociales identificadas.** Una población con problemas sociales tiende a responder de manera poco eficiente ante un ambiente adverso; esta problemática se orientó hacia las siguientes vertientes:

- a. **Conflictos por la tierra**
- b. **Conflictos por preferencias religiosas**
- c. **Conflictos por preferencias electorales**
- d. **Conflictos por delincuencia**
- e. **Por alcoholismo o drogadicción**

La presencia de cualquiera de esta problemática consideró como 1 en tanto que la ausencia fue cuantificada como 0, al final se sumaron los conflictos presentes en la adscripción territorial correspondiente y con dicho valor se obtuvo el valor que se maneja para este indicador.

3.3.4. Normalización de los indicadores

Para el cálculo de cada uno de los componentes del IVP Cardona (2005) propone un manejo previo de los datos que permita comparar indicadores cuyos resultados se expresan en diferentes unidades de medida (% de población por año, % de viviendas anuales, % de hectáreas arables, etc). Este proceso, denominado normalización, traslada los totales de cada indicador a valores que van de 0 a 1, donde 0 se aplica al valor mínimo del indicador y 1 al valor máximo; la expresión matemática aplicada depende si el indicador significa un incremento en la vulnerabilidad o indicadores directos (índice de marginación, población total, analfabetismo) o una disminución de la misma también denominados indicadores inversos (Grado de ocupación de la población, tasa de actividad, población con educación post básica,

etc); el autor propone las siguientes expresiones matemáticas para la normalización de los datos:

A: Indicadores directos:

$$\frac{X_{Reg} - X_{Min}}{X_{Max} - X_{Min}}$$

B: Indicadores inversos:

$$\frac{X_{Max} - X_{Reg}}{X_{Max} - X_{Min}}$$

Donde:




X_{Max} : valor máximo del indicador a normalizar

X_{Min} : valor mínimo del indicador a normalizar

X_{Reg} : valor del indicador para el registro correspondiente

Con el cálculo normalizado es posible generar comparaciones espaciales y por tanto analizar la localización y relación entre las diversas UER que presentan algún valor de vulnerabilidad en zonas susceptibles a los procesos naturales que de forma potencial pueden generar afectaciones. Una vez obtenidos los datos para el IVP, éstos se agruparon en clases cualitativas según los rangos mostrados en la tabla 16.

Tabla 16. Rangos, dasificación cualitativa y colores utilizados para representar el IVP

Rango	Clase	Color en cartografía
Más de 0.39	Alto	
De 0.039 a 0.38	Medio	
Menos de 0.038	Bajo	

3.4. Cálculo del riesgo específico (RE)

El riesgo específico es definido como la magnitud de pérdida expresada por la proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos (inmuebles, infraestructura, producción) bajo amenaza (Blong, 2003). A diferencia del IVP, el cálculo del RE fue más complejo debido a la falta de información disponible sobre los valores o montos de inversión en infraestructura dispuesta en la zona de estudio. Por ello sólo se pudo calcular el costo de reemplazo de los siguientes elementos:

1. Inmuebles
2. Vías de comunicación (carreteras y caminos) y puentes
3. Líneas de transmisión y subestaciones eléctricas
4. Escuelas
5. Producción económica de los sectores primario, secundario y terciario

3.4.1. Evaluación de inmuebles

El costo de reemplazo de los inmuebles existentes en la zona de estudio se calculó con base en el valor catastral ya que este importe resulta del consenso en los cabildos municipales correspondientes; estos valores se publican de manera anual en el Periódico Oficial de la entidad federativa correspondiente bajo la denominación de “Tablas de valores unitarios de suelo y construcción” y son establecidos por metro cuadrado de construcción y terreno según se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Valores unitarios de terreno y construcción por municipio (valores promedio)

	Municipio	VUT (m²)	VUC (m²)	Fuente (s)
2	COLIMA	302.00	302.00	(Gobierno del Estado Libre y Soberano de Colima, 2010, Gobierno del Estado Libre y Soberano de Colima, 2002b)
3	COMALA	165.00	165.00	(Gobierno del Estado Libre y Soberano de Colima, 2002c)
5	CUAUHTEMOC	234.00	234.00	(Gobierno del Estado Libre y Soberano de Colima, 2002d)
10	VILLA DE ALVAREZ	165.00	165.00	(Gobierno del Estado Libre y Soberano de Colima, 2002a)
99	TOLIMAN	372.15	1,636.55	(Gobierno del Estado Libre y Soberano de Jalisco, 2011a)
103	TOLINA	336.00	1,229.00	(Gobierno del Estado Libre y Soberano de Jalisco, 2011b)
108	TUXPAN	877.00	1,454.33	(Gobierno del Estado Libre y Soberano de Jalisco, 2011c)
122	ZAPOTITLAN DE VADILLO	238.00	1,070.89	(Gobierno del Estado Libre y Soberano de Jalisco, 2011d)

VUT: Valor unitario de terreno

VUC: Valor unitario de construcción

Para determinar la extensión en metros cuadrados de terreno y construcción de los inmuebles, en el programa Google Earth se trazaron polígonos de inmuebles en las diversas localidades ubicadas dentro de la zona de estudio; con la información obtenida se generó una base de datos georreferenciada que concentró la extensión de cada polígono; una vez generada la base de datos se determinó el promedio de extensión de terreno y construcción para establecer un valor catastral promedio por inmueble.

Se midieron 251 inmuebles en terreno y construcción que tuvieran la toma de Google Earth en el cenit para evitar, en la medida de lo posible, errores por ángulo en la toma. Con base en este procedimiento se determinó que los inmuebles contaban con un promedio de 158 m² de construcción y 579 m² de terreno. El costo por inmueble por municipio se desglosa en la tabla 18, cabe mencionar que la diferencia en los importes radica en los valores unitarios de terreno y construcción que difieren entre cada municipio.

Tabla 18. Valores catastrales por inmueble por municipio (valores promedio)

	Municipio	Valor catastral por inmueble (promedio)
2	COLIMA	222,000.00
3	COMALA	122,000.00
5	CUAUHTEMOC	172,000.00
10	VILLA DE ALVAREZ	122,000.00
99	TOLIMAN	474,049.75
103	TOLINA	389,243.12
108	TUXPAN	738,181.17
122	ZAPOTITLAN DE VADILLO	307,452.86

3.4.2. Evaluación de vías de comunicación (carreteras y caminos) y puentes

El costo promedio del metro lineal de caminos y carreteras se determinó por medio de los anuarios estadísticos que la SCT publica año tras año. Con la información disponible de 2002 a 2009 se generó una base de datos donde se especificó la región, concepto, demarcación estatal, importe de la inversión y kilómetros construidos.

El costo promedio por metro lineal de carretera bajo los conceptos de construcción, reconstrucción y ampliación ascendió a \$20,170.00 (Tabla 19); importe que se multiplicó por la cantidad de vías de comunicación correspondiente a cada Unidad Espacial de Referencia (UER) contenía.

Tabla 19. Inversión nacional en infraestructura vial de 2002 a 2009 (valores promedio)

Concepto	Infraestructura (km)	Inversión (millones de pesos)	Costo promedio por unidad de infraestructura (Millones de pesos)
Construcción, ampliación y reconstrucción	35,415.5	714,330.63	20.17

Fuente: Anuarios estadísticos de la SCT 2002 a 2009 (SCT, 2003, SCT, 2004, SCT, 2005, SCT, 2006, SCT, 2007, SCT, 2008, SCT, 2009, SCT, 2010)

La base de datos también se utilizó en el cálculo del costo promedio en la construcción de puentes; el importe calculado fue por metro lineal de este tipo de infraestructura el cual ascendió a \$48,360.00

3.4.3. Valuación de las líneas de transmisión eléctrica

De forma similar a la evaluación de la infraestructura vial, en el caso de la infraestructura eléctrica se consultaron los informes anuales de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de 2006 a 2010, de ellos se extrajeron la cantidad de inversión en la ampliación de infraestructura, de manera específica la expansión de líneas de transmisión y construcción de subestaciones eléctricas. El costo promedio del kilómetro circuito (km-c) de línea de transmisión ascendió a \$3,097,826.88 el km-c en tanto que lo referente a subestaciones eléctricas fue de \$69,159,284.10 por cada una; el desglose de datos se muestra en la tabla 20.

Tabla 20. Inversión nacional en infraestructura eléctrica de 2006 a 2010 (valores promedio)

Infraestructura	Infraestructura construida	Inversión (millones de pesos)	Costo promedio por unidad de infraestructura (Millones de pesos)
kilómetro-circuitos de líneas de transmisión	5,880	18,169	3.09
Subestaciones eléctricas	210	14,523	69.15

Fuente: Anuarios estadísticos de la Comisión Federal de Electricidad 2006 a 2010 (CFE, 2007, CFE, 2008, CFE, 2009, CFE, 2010, CFE, 2011)

3.4.4. Valuación de infraestructura educativa

Gobierno Federal creó en 2008, el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED), organismo encargado de ampliar y mantener la infraestructura física del sector educativo en el país (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2008).

Los informes de gastos e inversión se identificaron en los reportes de la Cuenta de Hacienda Pública Federal en la cual se desglosan los montos de inversión por escuela; para el

2009 el gasto promedio nacional dedicado a la construcción de infraestructura física educativa ascendió a \$592,500.00 por plantel educativo (Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 2010); este importe se adoptó como valor promedio para cada plantel educativo ubicado dentro de la zona de estudio.

3.4.5. Valuación de la producción en los sectores primario, secundario y terciario de la economía

La producción de bienes y servicios presenta una distribución espacial específica, ya sea por medio de la ubicación puntual de las unidades económicas, que en su mayoría se concentran en las zonas urbanas o en los espacios dedicados a las actividades agropecuarias las cuales presentan una disposición espacial más amplia que las anteriores. En el caso de la zona de estudio, se consideraron como base para el sector primario, la dimensión de las áreas dedicadas a la actividad agropecuaria y para los sectores secundario y terciario las unidades económicas con base en su orientación.

Las estadísticas referentes a la producción agrícola y el valor de la producción pecuaria se consultaron del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), dependiente de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Los datos de producción agrícola y pecuaria para el año 2010 se muestran en la tabla 21. El valor obtenido se multiplicó por los metros cuadrados dedicados a la actividad agropecuaria contenidos en cada UER.

Tabla 21. Estadísticas de producción agrícola para el año 2010

Municipio	Sup. Cosechada (m ²)	VPA (Pesos)	VPA m ² (pesos)	Sup. Act. Pecuarias (m ²)	VPP (pesos)	VPP m ² (pesos)	VAAP m ² (pesos)
Colima	165,394,800	484,111,750	2.93	256,889,370	946,103,000	3.68	6.60
Comala	71,618,700	109,677,450	1.53	122,846,873	215,487,000	1.75	3.28
Cuauhtemoc	125,614,700	540,333,570	4.30	228,289,629	127,931,000	0.56	4.86
Villa de Álvarez	72,954,800	223,146,280	3.06	88,916,185	80,320,000	0.90	3.55
Tonilá	50,097,500	186,480,830	3.72	52,416,555	34,417,000	0.65	4.37
Tuxpan	189,460,000	540,431,820	2.85	322,625,857	159,013,000	0.49	3.34
Zapotitlan de Vadillo	52,695,000	73,003,030	1.39	99,253,237	42,745,000	0.43	1.81

VPA= Valor de la producción agrícola (cultivos perennes y de temporal) Fuente: (SLAP, 2010)

VPP= Valor de la producción pecuaria (no se considera la cría de traspatio y autoconsumo) Fuente: (SLAP, 2010)

VPPm² = Valor de la producción agrícola por metro cuadrado de superficie cosechada
VPPm² = Valor de la producción pecuaria por metro cuadrado de superficie dedicada a las actividades primarias
VAAPm² = Valor de la producción agropecuaria por metro cuadrado de superficie

La distribución de la producción en los sectores secundario y terciario se realizó de manera diferente. En este caso, se consideraron las diversas unidades económicas y se les asignó un monto promedio de producción con base en el PIB municipal por sector de la economía. Con base en el directorio estadístico nacional de unidades económicas se identificaron de manera puntual cada una de ellas y se determinó el sector de la economía al cual pertenecía.

Obtenidos los promedios, se le asignó un valor económico a cada UER para producción total de los sector secundario y terciario dependiendo el número de unidades económicas comprendidas dentro de su demarcación espacial. La producción promedio de cada UEco según el municipio y sector económico se muestra en la tabla 22.




Tabla 22. Promedio de producción por unidad económica, municipio y sector de la economía, datos para 2009
(Fuente: Directorio estadístico nacional de unidades económicas (INEGI, 2010b))

Municipio	Sector secundario			Sector terciario		
	UEco2	PT2 (Miles de pesos)	PT2/UEco2 (miles de pesos)	UEco3	PT3 (Miles de pesos)	PT/UEco3 (Miles de pesos)
Colima	915	17,178,087	18,773	7,273	7,874,320	1,082
Comala	127	60,254	474	572	110,906	193
Cuauhtémoc	84	1,492,960	17,773	723	140,889	194
Villa de Álvarez	452	1,078,081	2,385	2,905	1,046,813	360
Tonila	40	24,852	275	221	20,338	73
Tuxpan	226	914,044	4,044	1,282	152,468	118
Zapotitlán de Vadillo	15	22,565	1,504	129	10,996	85

UEco2 = Unidades económicas del sector secundario *UEco3* = Unidades económicas del sector terciario
PT2 = Producción total en miles de pesos del sector secundario *PT3* = Producción total en miles de pesos del sector terciario

El monto del Riesgo Específico (RE) por UER se calculo sumando los diferentes importes de la infraestructura, viviendas, producción económica y demás elementos que pudieron ser evaluados. Los importes se agruparon en clases cualitativas según los rangos mostrados en la tabla 23.

Tabla 23. Rangos, clasificación cualitativa y colores utilizados para representar el RE

Rango (millones de pesos)	Clase	Color en cartografía
Más de 10	Alto	
De 1 a 10	Medio	
Menos de 1	Bajo	

3.5. Cálculo del índice de riesgo total (IRT)

Evaluar el riesgo a través de la metodología propuesta por Cardona (2005) permite realizar estimaciones en zonas urbanas y rurales. Se calcula por medio de dos elementos: Riesgo Físico y el factor de impacto para un evento máximo considerado (EMC).

El *riesgo físico* (R_f) constituye el factor “duro” de la ecuación; en este rubro se agrupan todos aquellos datos que refieren a los elementos expuestos como edificaciones, instalaciones, infraestructura, etcétera (Cardona, 2005), es decir, los elementos incluidos dentro del cálculo del riesgo específico (RE). El dato directo de RE se expresa en dinero y para poder relacionarlo con el otro elemento de la ecuación fue necesario normalizarlo (RE_N) a datos que van de 0 a 1, donde 0 se asignó al valor menor y 1 a la celda con mayor monto de riesgo.




El otro elemento, *factor de impacto* (F), constituye el factor “blando” de la ecuación (Cardona, 2005) y refiere variables asociadas a la fragilidad social y falta de resiliencia de la población expuesta, es decir, las variables incluidas en el índice de vulnerabilidad prevalente (IVP). La relación entre R_f y F se muestra en la siguiente ecuación matemática:

$$R_T = R_f * (1 + F) \therefore IRT = RE_N * (1 + IVP)$$

La relación matemática permite apreciar como los efectos de un proceso natural peligroso pueden exacerbarse con base en las características socioeconómicas que se engloban dentro de la vulnerabilidad.

Con los valores de RE IVP por cada unidad espacial de referencia se aplicó la fórmula operativa para calcular el IRT por cada celda; los valores se agruparon en tres clases cualitativas cuyos rangos se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Rangos, dasificación cualitativa y colores utilizados para representar el IRT

Rango	Clase	Color en cartografía
Más de 0.01	Alto	
De 0.002 a 0.01	Medio	
Menos de 0.001	Bajo	

3.7. Determinación de los alcances del evento máximo esperado

La cartografía obtenida en la aplicación del IRT se contrastó con la referente a los alcances del evento máximo esperado (EME), en este caso los fenómenos de lahares y piroclásticos asociados al evento volcánico de 1913, para identificar aquellos espacios que, además de presentar valores de riesgo, se encontraran bajo amenaza de algún tipo de proceso volcánico en la zona de estudio.

Los alcances del EME fueron identificados con base en la distribución espacial de los flujos piroclásticos y oleadas determinadas por Saucedo (2005) y el modelado de lahares de 5,000,000 m³ propuesta por Gavilanes (2004). La cartografía correspondiente se presenta en la figura 23.

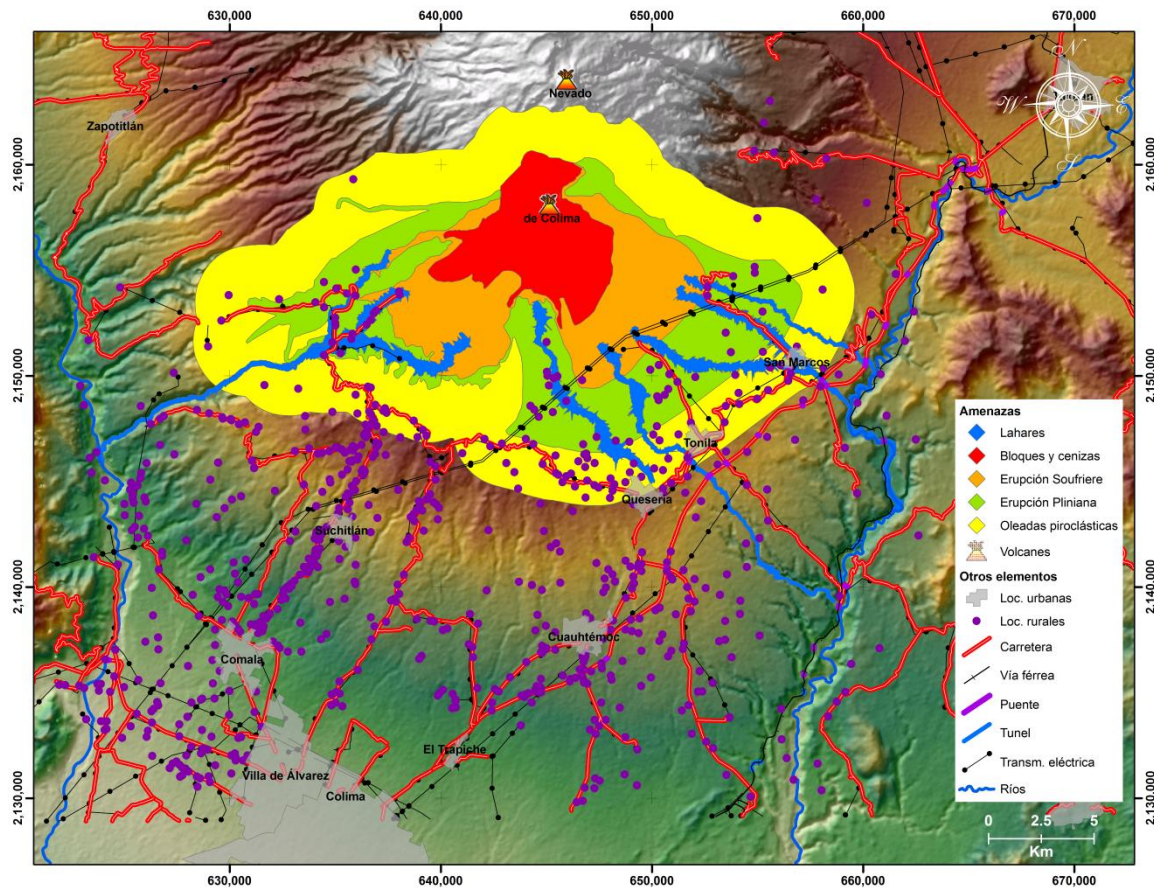


Figura 23. Alcance de los peligros considerados para el análisis del riesgo correspondiente

La figura muestra los alcances de los diversos procesos eruptivos relacionados con la actividad desarrollada en 1913 en el volcán de Colima; se puede apreciar a grosso modo las poblaciones y parte de la infraestructura bajo amenaza como poblados, líneas de transmisión y carreteras.

El mapa previo incluye los alcances de flujos más diluidos que pueden ir al menos 1 km más allá de la avalancha basal (Saucedo *et al.*, 2005). Para establecer el límite distal de dichos flujos, se analizaron mapas publicados en los cuales se identificaron el alcance de *ash cloud* asociado a flujos piroclásticos. Con base en los datos mostrados en la tabla 25, se consideró un alcance máximo de 2.5 km a partir del límite considerado para la avalancha basal.

Tabla 25. Resumen de alcances de avalanchas basales y ash cloud asociados a flujos piroclásticos

Volcán	año evento	Avalanch	Ash	avance del	Fuente
		a basal	Cloud	Ash cloud	
		Alcance (km)		%	
Pelée	1902	5	10	100%	Lajoie <i>et al</i> (1989)
Pelée	1902	5	12	140%	Smith <i>et al</i> (1990)
Pelée	1902	6	10.4	73%	Fisher <i>et al</i> (1982)
Santiaguito	1973	2.5	7.1	184%	Rose <i>et al</i> (1977)
Soufriere	1976	0.8	1.1	38%	Sheridan (1980)
Chichón	1982	6	14	133%	Francis <i>et al</i> (1995)
Mount St. Helens	1986	1.5	2.7	80%	Mellors <i>et al</i> (1988)
Unzen	1991	3.6	4.4	22%	Yamamoto <i>et al</i> (1993)
Unzen	1991	6	6.8	13%	Nakada <i>et al</i> (1993)
Unzen	1991	5.25	6.15	17%	Fujii <i>et al</i> (1999)
Unzen	1991	3	4.4	47%	Takahashi <i>et al</i> (2000)
Merapi	1994	5.6	6.5	16%	Abdurachman <i>et al</i> (2000)
Merapi	1994	7	8.2	17%	Kelfoun <i>et al</i> (2000)
Merapi	1994	5.6	6.5	16%	Voight <i>et al</i> (2000)
Merapi	1994	5	7.5	50%	Itoh <i>et al</i> (2000)
Soufriere	1997	3.6	3.6	0%	Ritchie <i>et al</i> (2002)
Soufriere	1997	5	5.5	10%	Cole <i>et al</i> (2002)
Merapi	1998	8.5	11.5	35%	Schwarzkopf <i>et al</i> (2004)
Soufriere	2000	4.5	5	11%	Carn <i>et al</i> (2004)
PROMEDIO		4.71	7.02	53%	

3.7. Planeación y ejecución del trabajo de campo

Se realizaron dos salidas a campo, la primera en el mes de agosto del 2011 y la segunda en diciembre del mismo año. Por medio del trabajo de campo se pudieron reconocer los poblados, infraestructura, actividades económicas y tendencia en el uso de suelo en las inmediaciones del volcán; asimismo se identificaron afloramientos de flujos piroclásticos correspondientes a la erupción de 1913 en la barranca Montegrande y Cordobán (Figura 24a) así como la gran actividad de procesos epiclásticos evidente por los depósitos de lahar en las barrancas La Lumbre (Figura 24b) y Montegrande.

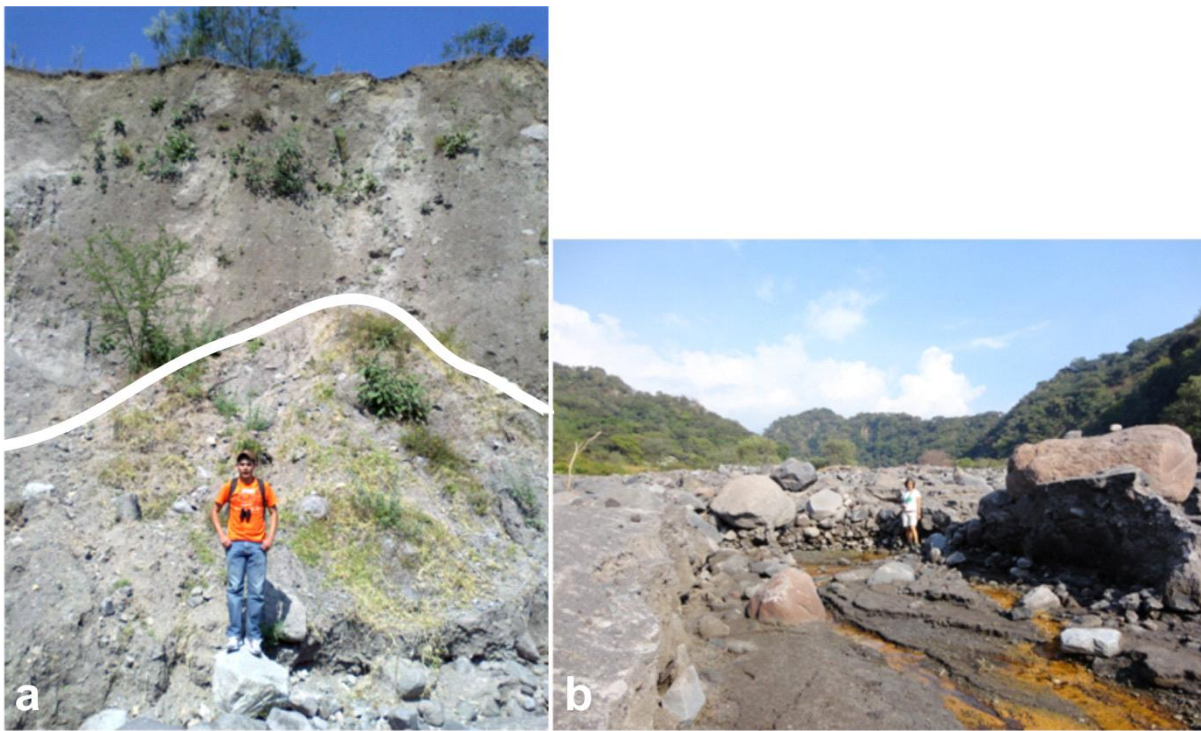


Figura 24. Depósitos de flujos piroclásticos en la barranca el Cordobán y de lahar en la barranca la Lumbre

En la figura a se muestra el afloramiento de los depósitos de flujos piroclásticos relacionados con la erupción acaecida en 1913, la línea blanca marca el contacto inferior del depósito; por otro lado, los depósitos de lahar provenientes del volcán de Colima mostrado en la figura b estuvieron relacionados con las intensas lluvias que el huracán Jova precipitó los días 12 y 13 de octubre de 2011. En la imagen se pueden apreciar los grandes bloques transportados ladera abajo del volcán que llegan a medir más de 1.40 m de diámetro.

La inercia geográfica, que es definida por Palacio como la ocupación persistente del espacio (1995) fue evidente, la población conoce y reconoce los diversos peligros que implica la proximidad a un volcán activo, no obstante, la fertilidad del suelo y el régimen climático

propician la ocupación al favorecer el desarrollo de actividades agrícolas como la siembra de maíz, frijol, caña de azúcar, café e incluso la introducción del aguacate (Figura 25), el cual está cobrando importancia en la región por presentar características muy similares a las existentes en el Estado de Michoacán.

Toda esta actividad económica genera economías de escala que brindan empleo y sustento a la población. Las observaciones hechas durante el trabajo de campo, enriquecieron de manera sustancial los resultados obtenidos, mismos que se presentarán en el capítulo siguiente.



Figura 25. Huerta aguacatera ubicada en las faldas del volcán

En la figura se puede apreciar al fondo, cubierto de nubosidad, el volcán de Colima. La huerta aguacatera ubicada a 8 km del cráter pertenece al Sr. Pedro Virgen, abarca aproximadamente 6 hectáreas y en ella se sembraron 8.736 plantas con un costo de \$61.00 cada una (\$50.00 por planta más \$11.00 de flete). Según la conversación con el propietario, la inversión se decidió con base en la similitud de ambientes entre las huertas aguacateras de Michoacán y el existente en este lugar. La inversión hasta el momento ha ascendido a más de \$700,000.00 considerando el costo de las plantas, la mano de obra y la introducción del sistema de riego. El propietario espera que para el presente año cada árbol produzca de 1 a 2 kg de aguacate; un árbol en plena producción genera más de 150 kg al año.

También fue evidente la venta de inmuebles en espacios susceptibles de amenaza; a lo largo de la carretera que conecta a Comala con Suchitlan y Zapotitlan se está comercializando con

terrenos para la construcción de viviendas de corte campestre (Figura 26); si bien esto no es un indicador de que la población del lugar esté dejando el sitio, muestra cómo población ajena a la dinámica de la zona de estudio invierte en su patrimonio dentro de espacios que son susceptibles de afectación por fenómenos de carácter volcánico.



Figura 26. Venta de lotes de terreno e inmuebles en espacios susceptibles de afectación

Según referencias obtenidas por los habitantes de la zona, a últimas fechas se ha incrementado el comercio de lotes de terreno e inmuebles en los espacios aledaños al volcán con la finalidad de construir viviendas de corte campestre, lo anterior ha incrementado el precio del suelo en la zona e incrementa el número de población que se asienta en los espacios que pueden ser afectados por procesos volcánicos provenientes del volcán de Colima.

La cercanía con el volcán presenta interpretaciones diferentes, por un lado, la población reconoce, aunque sea de manera parcial, el peligro que representa y por otro lado es utilizado para la comercialización, la imagen del volcán es utilizada como un sinónimo de bienestar, tranquilidad, seguridad y estatus o como lo muestra el slogan de la figura 27 “Una nueva forma de vivir”.



Figura 27. Uso comercial de la imagen de volcán de Colima

Estos son sólo unos pocos ejemplos de cómo la sociedad de Colima y Jalisco consideran al volcán dentro de su vida cotidiana. La cuestión cultural y el arraigo a la tierra son factores de elevada importancia al momento de comprender cómo, a pesar del riesgo y del conocimiento parcial de éste, los espacios se ocupan de manera persistente

La convivencia cotidiana entre un entorno natural susceptible de amenazas y la organización territorial que las sociedades hacen del entorno genera una percepción específica del riesgo que es prescrita por situaciones de peligro experimentadas en el pasado. Con base en ello, existen tres formas de adaptarse al riesgo (Palacio, 1995):

1. Ocupación persistente del área de riesgo
 - a. Con medidas de protección
 - b. Con planes de alerta y evacuación
 - c. Sin ninguna medida de protección, que correspondería al estado de máxima vulnerabilidad
2. Cohabitando con el daño causado por eventos pretéritos, que correspondería al estado de mayor inercia geográfica
3. Abandonando asentamientos y estructuras dañadas o destruidas pero reubicándose dentro de la zona susceptible a la amenaza, lo cual constituye un estado de inercia geográfica secundaria.

Estas formas de adaptación al peligro real y potencial muestran que mientras exista una forma de apropiación del espacio por el ser humano, la percepción del riesgo cambiará con relación directa a la carga subjetiva presente.

En la zona de estudio son evidentes las tres formas de adaptación ya que se han puesto en marcha medidas de prevención así como el monitoreo de la actividad volcánica debido a la ocupación persistente del área; existen asentamientos sobre depósitos de lahares, flujos piroclásticos y avalanchas de escombros pasadas, como en el caso del rancho El Jabalí, la Becerrera y la Yerbabuena; este último ha sido abandonado de manera parcial por la contingencia presente en la primera década del presente siglo.

Capítulo 4. Resultados

A lo largo del presente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos una vez aplicada la metodología previa. La información está dispuesta para cada uno de los elementos calculados: IVP, RE e IRT.

El análisis se presenta en dos apartados principales: en principio para la zona de estudio completa y después con base en los alcances de los fenómenos volcánicos analizados cuyos resultados se presentan por separado y en conjunto.

4.1. Análisis general de la zona de estudio

4.1.1. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente (IVP)

El índice de vulnerabilidad prevalente (IVP) se compone de tres subíndices, uno que refiere la exposición de personas y elementos (IVP_{EF}), otro que comprende los factores socioeconómicos (IVP_{FS}) y el tercero que refiere las capacidades sociales de enfrentar y sobreponerse a eventos perturbadores (IVP_{FR}) (Cardona, 2005). Estos elementos se calcularon para cada una de las unidades espaciales de referencia (UER) establecidas en el inciso 3.2 y la distribución espacial correspondiente se presenta a continuación.

4.1.1.1 Índice de vulnerabilidad prevalente por exposición física (IVP_{EF})

Este elemento es el promedio de índices e indicadores que refieran el incremento de personas y bienes en zona de estudio delimitada (*véase el apartado 3.3.1*). En la zona de estudio se ha presentado un incremento poblacional importante, de 50,399 pobladores para el año 2000 se incrementó a 67,800 en el 2010, el incremento corresponde a un 34.5% total o un 3% promedio anual. Con respecto a la ocupación de vivienda, para el año 2000 se encontraban 16,273 viviendas habitadas, número que se incrementó a 18,617 en el 2010, lo cual representa un incremento del 14.5% total o un incremento promedio anual del 1.4%.

Ambos indicadores fueron considerados dentro del cálculo de este índice al igual que la superficie dedicada a la producción agropecuaria, la producción económica de bienes y servicios, unidades económicas, cantidad de inmuebles y edificaciones diversas, total de escuelas y hospitales, entre otros.

Con base en el valor calculado para cada UER, éstas se distribuyeron de la siguiente manera:

Rango	UER
Sin dato	271
Bajo	325
Medio	142
Alto	386
Total	1124

La distribución espacial de este elemento se muestra en la figura 28; en ella se puede apreciar que las UER con más alto IVP_{EF} coinciden con los agregados poblacionales (rurales o urbanos) o en la confluencia de infraestructura de comunicación y transmisión de electricidad.

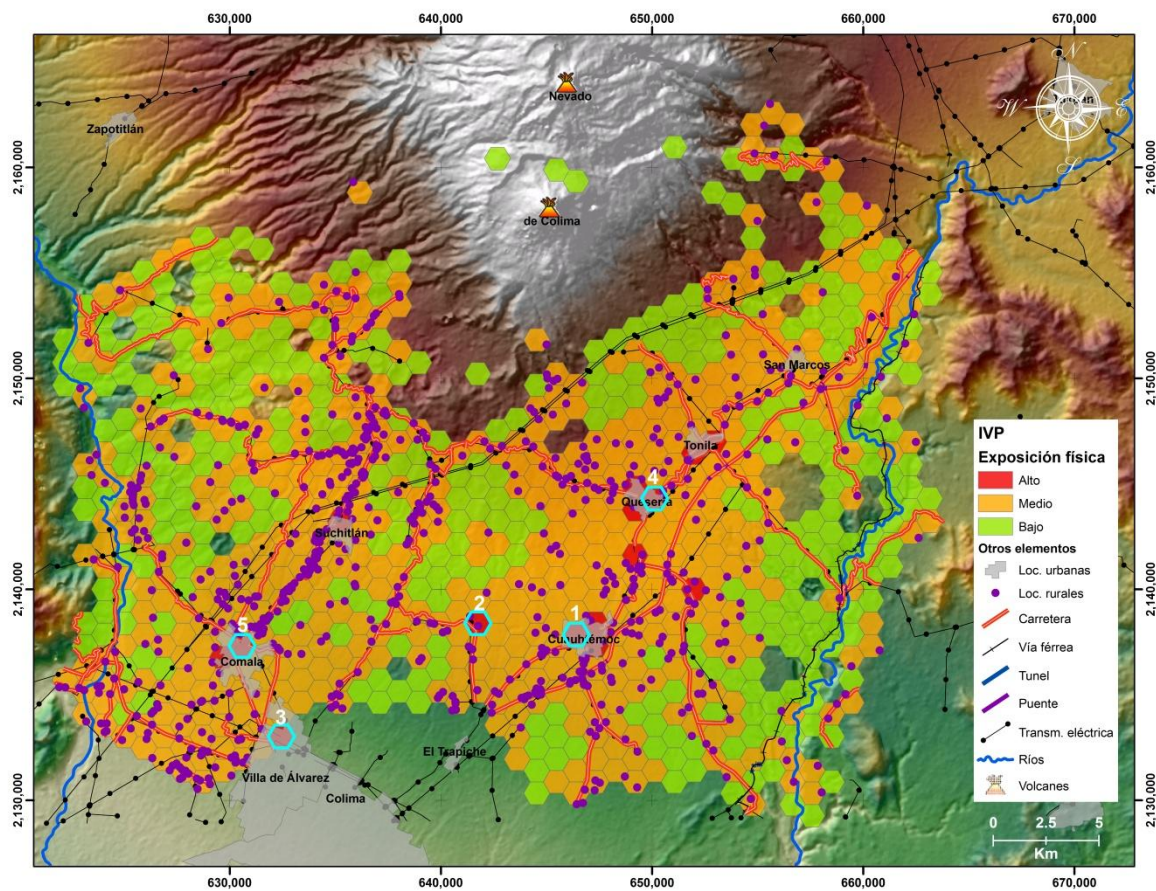


Figura 28. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente por exposición física

Resaltado con un contorno azul se marcan las UER que presenta un mayor valor de IVP_{EF} ; el número ubicado en la parte superior indica la posición correspondiente. Las UER con mayor valor coinciden con agregados poblacionales rurales o urbanos así como la confluencia de infraestructura eléctrica y de comunicación así como construcciones diversas, ver texto para mayor detalle.

La UER que presenta un mayor valor de este elemento corresponde a la 228, ubicada en las inmediaciones del poblado de Cuauhtémoc, Colima, cuyo valor de IVP_{EF} asciende a 0.548. Le corresponde la primera posición por converger en ese espacio los siguientes factores:

1. 98% de su superficie dedicado a la producción agropecuaria
2. Concentrar el mayor número de las siguientes instalaciones:
 - a. Templos (2),
 - b. Escuelas (6)
 - c. Unidades de asistencia médica (2)

Le siguen las UER enlistadas en la tabla 26:

Tabla 26. UER con mayor valor de IVP_{EF}

UER	Ubicación / localidades	Elemento más importante dentro del valor de IVP_{EF}	IVP_{EF}
1. 228	Zona urbana de Cuauhtemoc, Colima	Alta producción agropecuaria y alto número de instalaciones diversas	0.548
2. 246	Pobladitos el Ocotillo y Chiapa, Cuauhtémoc, Colima	Mayor cantidad de instalaciones diversas (65) y 2 unidades médicas	0.473
3. 55	Parte noroeste de la zona urbana de Villa de Álvarez	Crecimiento medio anual de población (8%) y de vivienda (2%) por encima del promedio estatal.	0.469
4. 480	Quesería, Cuauhtémoc, Col.	Instalaciones diversas (25) y 2 unidades de asistencia médica	0.461
5. 199	Zona urbana de Comala	Mayor cantidad de unidades económicas (325) y 30 instalaciones diversas entre ellas 5 escuelas	0.457

4.1.1.2 Índice de vulnerabilidad prevalente por fragilidad socioeconómica (IVP_{FS})

Este elemento se construye con el promedio de índices e indicadores que refieran las debilidades intrínsecas de los grupos sociales que tienden a exacerbar los efectos de fenómenos perturbadores (Cardona, 2005), como la marginación, la pobreza, bajo grado de escolaridad, viviendas precarias, desempleo y dependencia económica, entre otros (véase el apartado 3.3.2).

Los valores para cada UER se distribuyeron de la siguiente manera:

Rango	UER
Sin dato	738
Bajo	71
Medio	292
Alto	23
Total	1124

El apartado de “Sin dato” resulta de aquellas UER que no cuentan con población sobre la cual se puedan calcular indicadores. La distribución espacial de este elemento se muestra en la figura 29; en ella se puede apreciar que las UER ocupan sólo espacios donde se localizan localidades rurales o urbanas caso contrario con el elemento anterior, donde las UER también se localizan en espacios que no están poblados por existir en ellos infraestructura o actividades económicas específicas.

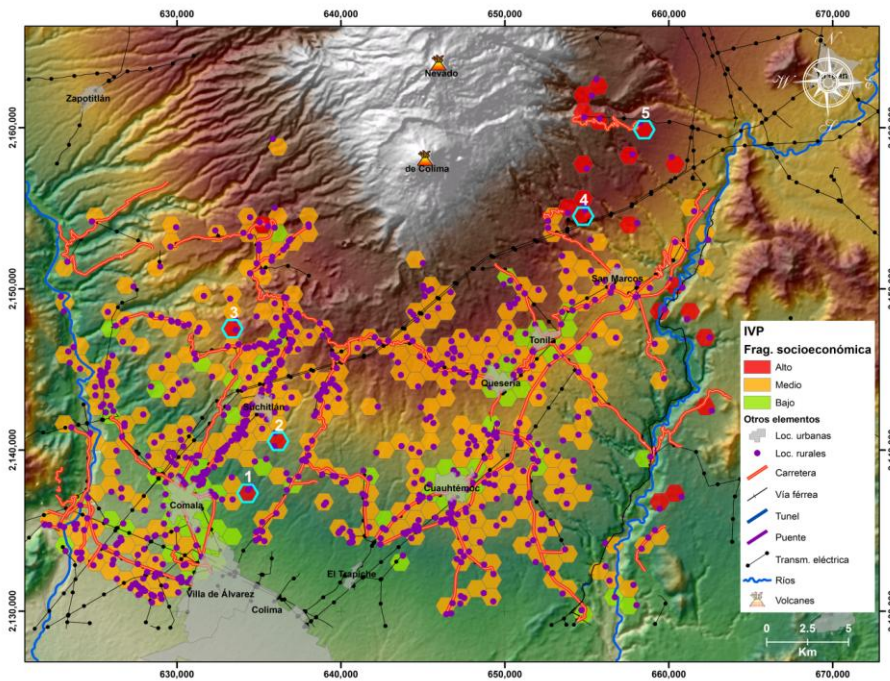


Figura 29. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente por fragilidad socioeconómica

Resaltado con un contorno azul se marcan las UER que presenta un mayor valor de IVP_{FS} ; el número ubicado en la parte superior indica la posición correspondiente. Las UER con mayor valor coinciden con agregados poblacionales de orden rural donde la marginación, pobreza y carencia de servicios es importante. En las localidades urbanas, el índice es bajo ya que el bienestar social se incrementa por existir servicios que aumentan la calidad de vida de la población, asimismo, en estos asentamientos se desarrollan y organizan grupos sociales y gubernamentales con el objetivo de preparar a la población ante contingencias por fenómenos naturales.

La UER que presenta un mayor valor de este elemento corresponde a la 201, que abarca los poblados de El Jaboncillo y Diego Fuentes (El Limoncito) pertenecientes al municipio de Villa de Álvarez, Colima. El valor de IVP_{FS} asciende a 0.504 y obedece al elevado porcentaje de viviendas precarias en la zona. Esta UER presenta un 100% en viviendas sin agua, electricidad y bienes. Le siguen las UER enlistadas en la tabla 27:

Tabla 27. UER con mayor valor de IVP_{FS}

UER	Ubicación / localidades	Elemento más importante dentro del valor de IVP_{FS}	IVP_{FS}
1. 201	El Jaboncillo y Diego Fuentes (El Limoncito), Villa de Álvarez, Colima	Viviendas precarias	0.504
2. 323	Poblados de El Fresnillo, Casa de Adobe y La Mezcalerita, Comala, Col.	100% de población de 12 años o más que no asiste a la secundaria además de contar con 96% de viviendas precarias	0.465
3. 603	Piedra Rajada (Aguacatera), Comala, Col.	100% de la población de 12 años o más que no cuenta con educación formal	0.436
4. 904	Los Machos, Tuxpan, Jal.	Presenta una tasa de dependencia económica elevada sumado a una población que no cuenta con educación básica finalizada	0.406
5. 1071	Las Tejas, Tuxpan, Jal.	Presenta una tasa de dependencia económica elevada y viviendas que no cuentan con agua, drenaje y electricidad.	0.406

4.1.1.3 Índice de vulnerabilidad prevalente por falta de resiliencia (IVP_{FR})

Este elemento se construye a través del tratamiento complementario o invertido de indicadores relacionados con el nivel de desarrollo humano (Cardona, 2005), como capital humano, distribución de la riqueza, nivel educativo, calidad en la comunicación entre las zonas rurales y la cabecera municipal, entre otros (véase el apartado 3.3.3).

Los valores para cada UER se distribuyeron de la siguiente manera:

Rango	UER
Sin dato	738
Bajo	106
Medio	194

Alto	86
Total	1124

De forma similar que el apartado anterior, las UER que arrojan “Sin dato” resulta de aquellas que no cuentan con población sobre la cual se puedan calcular indicadores. La distribución espacial de de este elemento se muestra en la figura 30.

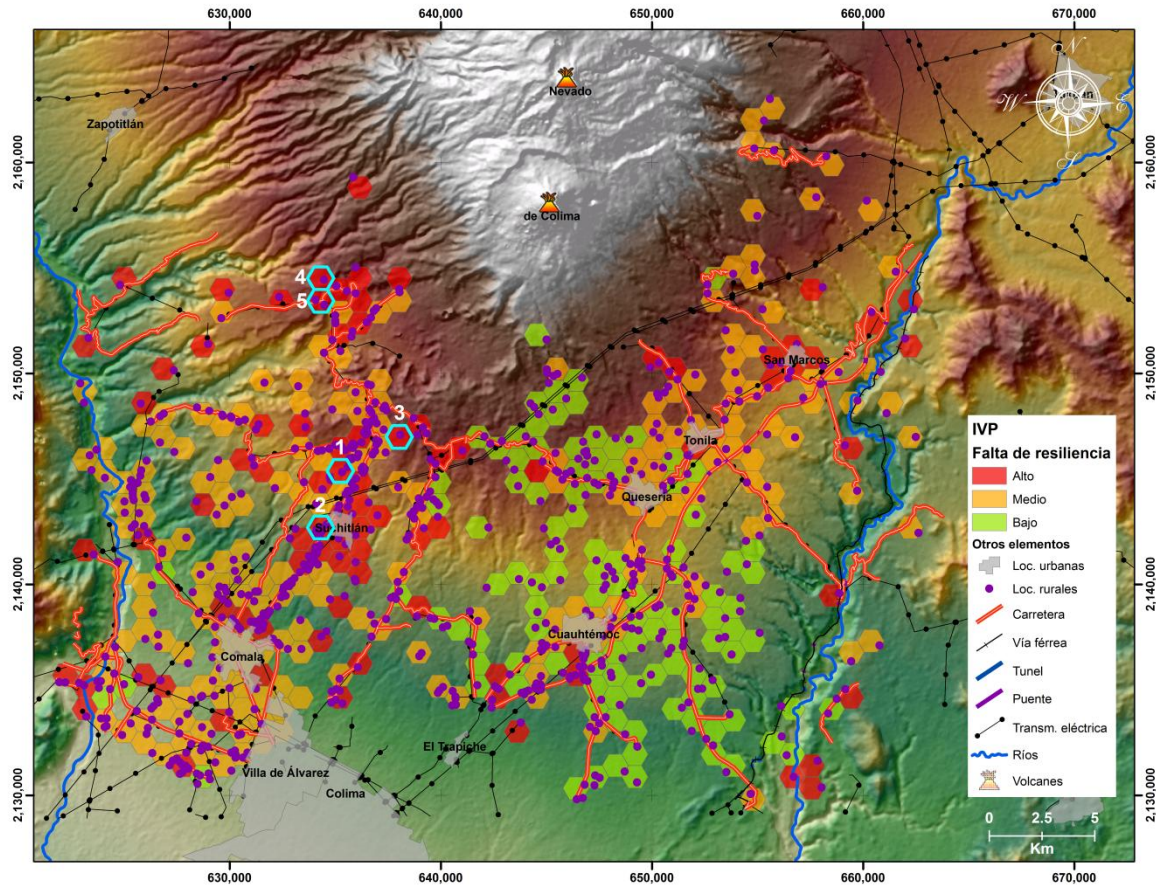


Figura 30. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente por falta de resiliencia

Resaltado con un contorno azul se marcan las UER que presenta un mayor valor de IVP_{FR} ; el número ubicado en la parte superior indica la posición correspondiente. Las UER con mayor valor coinciden con espacios rurales, donde indicadores de desarrollo humano tienden a ser inferiores que en las zonas urbanas.

La UER que presenta un mayor valor de este elemento corresponde a la 516, que integra los poblados de Rafael Martínez y Rancho del Medio (Petronilo Castro) pertenecientes al municipio de Comala, Colima. El valor de IVP_{FR} asciende a 0.798 y es el resultado de un bajo índice de suficiencia vial, viviendas precarias, nulo acceso a servicios de salud, incomunicación y población sin educación post básica. Le siguen las UER enlistadas en la tabla 28:

Tabla 28. UER con mayor valor de IVP_{FR}

UER	Ubicación / localidades	Elemento más importante dentro del valor de IVP _{FR}	IVP _{FS}
1. 516	Rafael Martínez y Rancho del Medio (Petronilo Castro)	Baja suficiencia vial, viviendas precarias y nulo acceso a servicios de salud	0.798
2. 406	Juan José Topete Silva, Rancho Santa Paola, Teodoro Lozano, La India (Los Macías), Elías Tintos, Lorena Sánchez, Alberto Bolio, Enrique Topete, Rancho la Piedra, José Macías, Quinta la Lomita (La Loma) y Los Pinos, Comala, Col.	Alto porcentaje de viviendas que no cuentan con servicios de comunicación además de diversos conflictos sociales que dificultan la organización social; entre los problemas identificados cabe destacar: conflictos por propiedad de la tierra y por preferencias electorales	0.788
3. 583	Las Gemelas, Comala, Col.	Bajo índice de suficiencia vial, población sin derechohabencia a servicios de salud y viviendas sin medios de comunicación	0.787
4. 893	El Borbollón, Zapotitlan de Vadillo, Jal.	Bajo índice de suficiencia vial, población sin servicios de salud y viviendas sin medios de comunicación	0.784
5. 850	La Estancia y Las Galeanas, Zapotitlan de Vadillo, Jalis.	Población sin derechohabencia a servicios de salud y viviendas sin medios de comunicación	0.782

4.1.1.4 Índice de vulnerabilidad prevalente (IVP)

El IVP es el promedio de los tres elementos descritos con antelación (*véase el apartado 3.3.4*), cada uno de ellos refiere características del territorio que puede ser afectado por fenómenos físicos; en este sentido permite dimensionar de manera cuantitativa dichas particularidades. Los valores para cada UER se distribuyeron de la siguiente manera:

Rango	UER
Sin dato	271
Bajo	467
Medio	242
Alto	144
Total	1124

Las 271 UER que no muestran dato son el resultado de espacios en los cuales no existe ni población ni bienes que puedan ser contabilizados o utilizados para realizar el cálculo de índices necesarios. La distribución espacial se muestra en la figura 31.

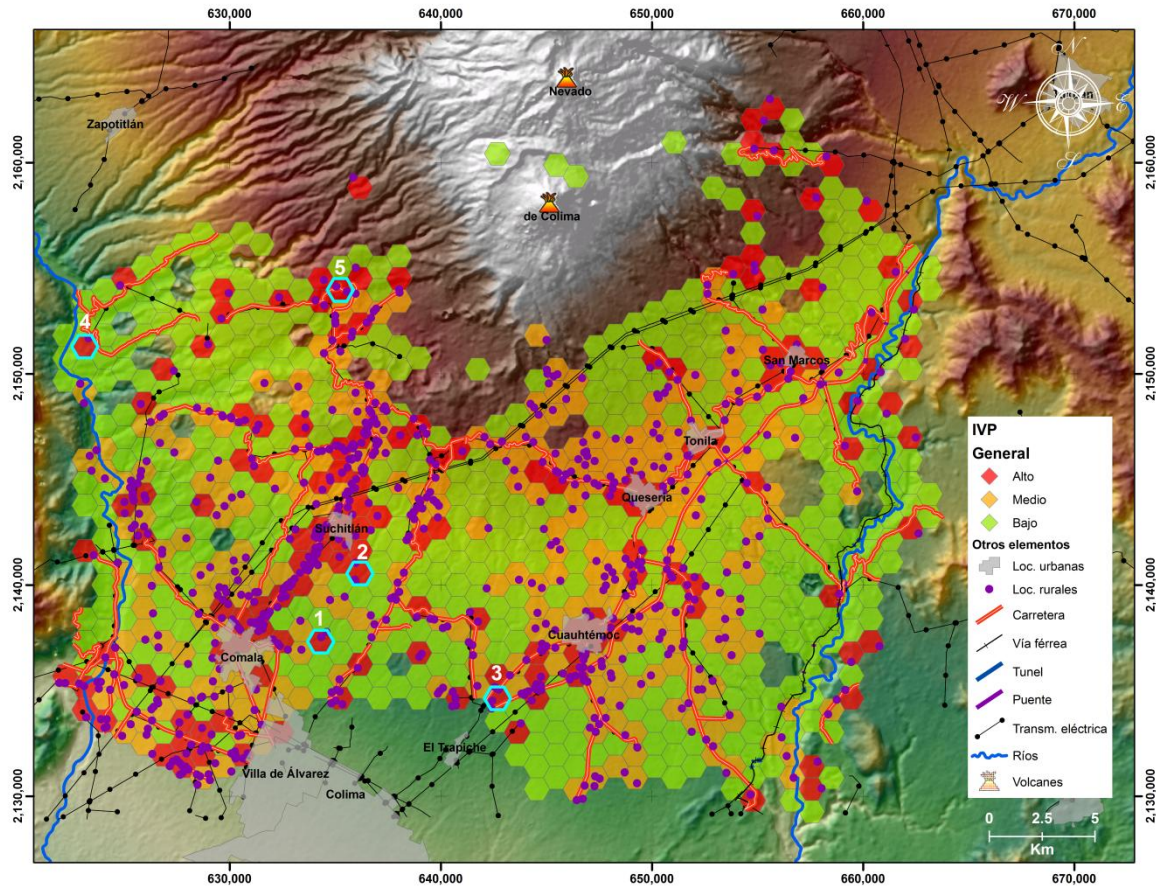


Figura 31. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad prevalente (IVP)

Resaltado con un contorno azul se marcan las UER que presenta un mayor valor de IVP; el número ubicado en la parte superior indica la posición correspondiente. Las UER que muestran el mayor valor coinciden con agregados poblacionales sobre todo pertenecientes a zonas rurales, donde las formas de vida precaria, características de estos espacios, exacerbaban los efectos de los fenómenos naturales.

La UER que presenta un mayor valor corresponde a la 201 que incluye los poblados de Diego Fuentes (El Limoncito) y El Jaboncillo pertenecientes al municipio de Villa de Álvarez, Colima. El valor de IVP asciende a 0.484 y ocupa el primer lugar como resultado de un valor elevado en fragilidad socioeconómica (0.504) y falta de resiliencia (0.691). Le siguen las UER enlistadas en la tabla 29:

Tabla 29. UER con mayor valor de IVP

UER	Ubicación / localidades	IVP_{EF}	IVP_{FS}	IVP_{FR}	IVP
1. 201	Diego Fuentes (El Limoncito) y El Jaboncillo, Villa de Álvarez, Colima	0.256	0.504	0.691	0.484
2. 323	El Fresnito, Casa de Adobe y La Mezcalerita, Comala, Colima	0.218	0.465	0.7485	0.477
3. 104	El Cobano, El Parian y Roberto Vargas (Nutilite), Cuauhtemoc, Colima	0.348	0.360	0.6724	0.460
4. 753	Mazatán (San Francisco Mazatán) Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.284	0.389	0.705	0.459
5. 872	Tlajomulco y Rancho Santa Rosa, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.240	0.404	0.732	0.458

A lo largo del presente análisis se buscó traducir a un valor cuantitativo todas aquellas características de la población, actividades socioeconómicas y existencia de infraestructura con la finalidad de dimensionar la vulnerabilidad, la cual es un aspecto clave para comprender el riesgo desde una perspectiva social, es decir, como una construcción histórica y cuya determinación social depende de las capacidades de los grupos en los cuales recae el análisis.

En resumen, la vulnerabilidad se encuentra ligada de manera íntima con procesos sociales que permiten concebir la confluencia de espacios vulnerables y eventos físicos peligrosos como el resultado de una construcción social del riesgo (Cardona, 2005). En el área de estudio, la vulnerabilidad se concentró sobre todo en zonas con características rurales las cuales presentan altos grados de marginación, pobreza y abandono de políticas gubernamentales tendientes a mejorar en la calidad de vida de la población; en este sentido, se crean espacios donde grupos sociales con carencias pueden ser afectadas por fenómenos naturales previsibles e incluso normales (Maskrey, 1998).

4.1.2. Distribución espacial del riesgo específico (RE)

La conceptualización de Riesgo Específico (RE) dentro de la presente investigación refiere el valor monetario o costo de reemplazo de los elementos bajo amenaza (Blong, 2003). Cardona (1993) menciona que el RE concentra el grado de pérdidas esperadas como consecuencia de un evento en particular.

En este sentido el RE es la evaluación de los diversos elementos (infraestructura, áreas de cultivo, edificaciones, etc) que son susceptibles de afectación por un fenómeno natural los cuales se enlistan en la tabla 30:

Tabla 30. Evaluación de elementos emplazados en la zona de estudio

Elemento	Total de unidades	Importe total (millones de pesos)
Inmuebles	22,049 Inmuebles	4,035
Vías de comunicación	374,997 Metros	7,564
Puentes	3,136 Metros	103
Líneas de transmisión	338,166 Metros	1,048
Subestaciones eléctricas	2 Unidades	138
Escuelas	105 Escuelas	62
Producción económica	2,207 Unidades económicas	17,108
Total		30,058

Como referente que permita dimensionar la magnitud del importe de los elementos bajo amenaza, el total expuesto constituye el 0.3% del PIB nacional, basta decir que el país destina para el desarrollo de ciencia y tecnología el 0.4% del PIB (González, 2009). Del monto general, \$24,894 millones corresponden a elementos ubicados dentro del territorio de Colima y \$5,164 millones a Jalisco, ambas cantidades constituyen el 56% y 1% del PIB estatal de forma respectiva.

Con base en el valor correspondiente, las UER se distribuyeron de la siguiente manera:

Rango	UER
Sin dato	271
Bajo	173
Medio	339
Alto	341
Total	1124

La UER con mayor valor corresponde a la 228 ubicada en la zona urbana del municipio de Cuauhtémoc el importe asciende a \$4,073 millones de pesos y el elemento más importante dentro del importe lo constituye la producción económica en la zona. Las UER con mayor valor se localizan a lo largo de los ejes carreteros, ferroviarios y líneas de transmisión; asimismo coinciden dentro de los espacios donde confluye la infraestructura dentro de las zonas urbanas como en los poblados de Comala, Villa de Álvarez y Cuauhtémoc (Figura 32).

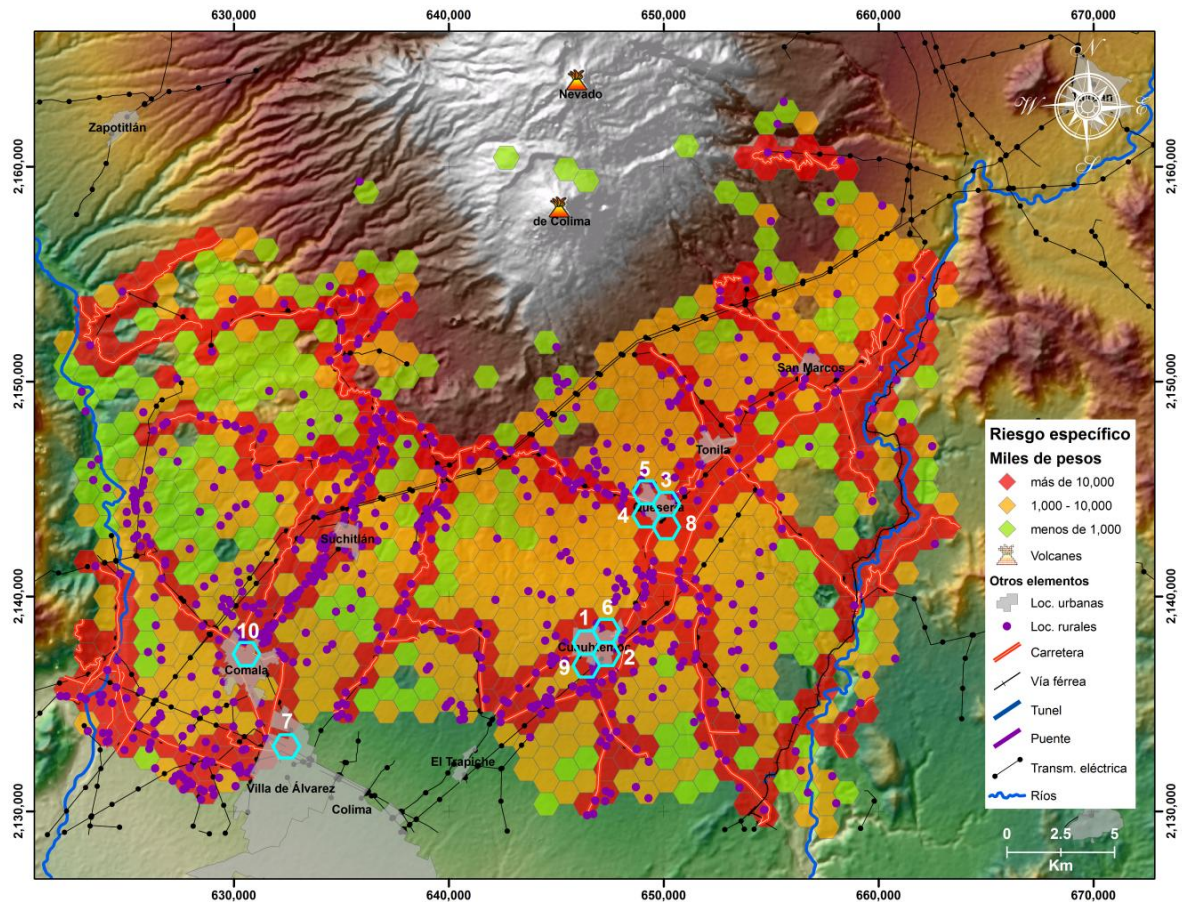


Figura 32. Distribución espacial del riesgo específico (RE)

El importe de las 10 UER con mayor RE concentra el 54% del total calculado para la zona de estudio

Las UER que le siguen en importe se enlistan en la tabla 31.

Tabla 31. UER con mayor valor de RE dentro de la zona de estudio

UER	Ubicación / localidades	Importe (millones de pesos)
1. 228	Zona urbana de Cuauhtémoc, Colima	4,074
2. 208	Zona urbana de Cuauhtémoc, Colima	2,887
3. 480	Zona urbana de Quesería, Colima	2,485
4. 458	Zona urbana de Quesería, Colima	2,030
5. 502	Zona urbana de Quesería, Colima	1,887
6. 249	Zona urbana de Cuauhtémoc, Colima	1,080
7. 55	Zona urbana de Villa de Álvarez, Colima	625
8. 436	Zona urbana de Quesería, Colima	569
9. 187	Zona urbana de Cuauhtémoc	299
10. 199	Zona urbana de Comala, Colima	284
	Total	16,220

El importe de las UER enlistadas concentra el 54% del total en la zona de estudio.

4.1.3. Distribución espacial del índice de riesgo total (IRT)

Este índice conjuga de manera cuantitativa las características socioeconómicas – factor blando o de impacto – y el importe de los elementos que se encuentran bajo amenaza y que corresponden al factor duro de la ecuación referida en el apartado 3.5. Con base en el valor del IRT, las UER se distribuyeron de la siguiente forma:

Rango	UER
Sin dato	271
Bajo	344
Medio	376
Alto	133
Total	1124

La distribución espacial del IRT se muestra en la figura 33; los valores más altos coinciden con asentamientos de tipo urbano, ya que en ellos coincide mayor parte de la infraestructura, inmuebles, producción económica etc.

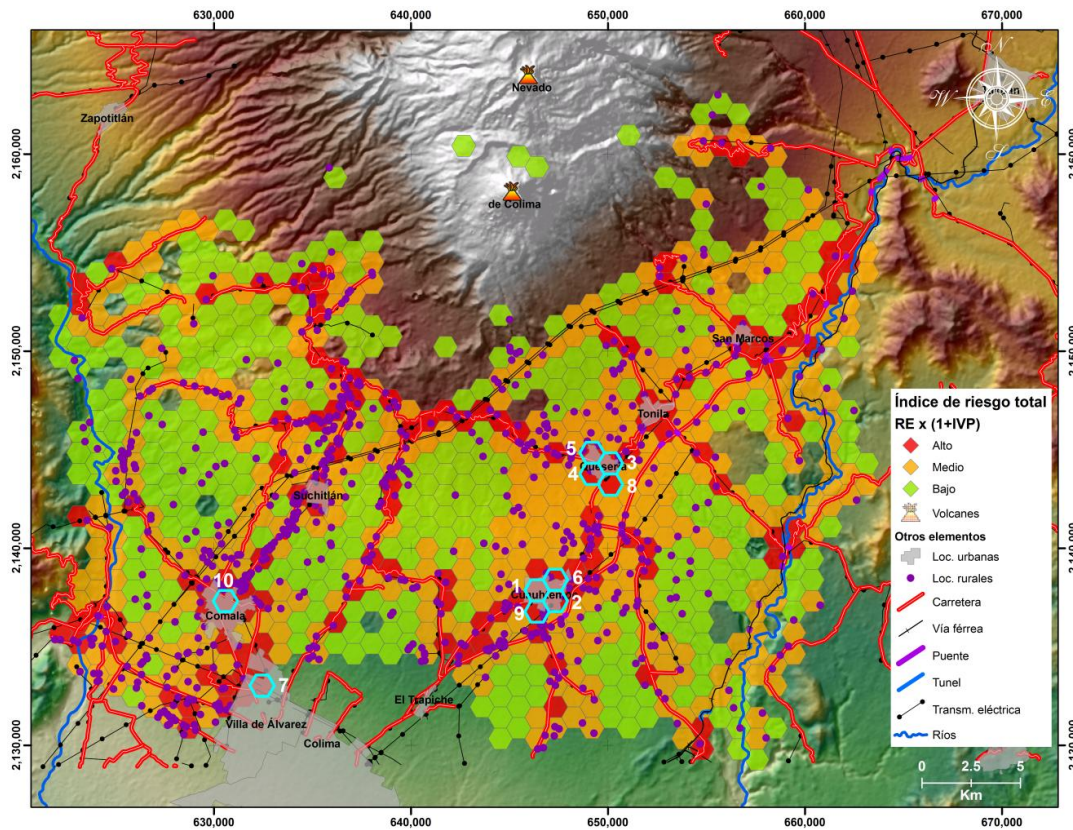


Figura 33. Distribución espacial del Índice de Riesgo Total (IRT)

Los valores mayores de IRT se concentran en las zonas urbanas y rurales aledañas a la infraestructura vial y eléctrica

La UER con mayor valor de IRT corresponde a la 228 ubicada en la zona urbana del municipio de Cuauhtémoc, Colima, el valor del índice asciende a 1.450; las UER subsecuentes se enlistan en la tabla 32 en la cual se incluye la posición de los valores de IVP y RE con respecto al total de las UER establecidas para la zona de estudio.

Tabla 32. UER con mayor valor de IRT dentro de la zona de estudio

UER	Ubicación / localidades	IRT	Posición IVP	Posición RE
1. 228	Zona urbana de Cuauhtémoc, Colima	1.450	7	1
2. 208	Zona urbana de Cuauhtémoc, Colima	0.995	75	2
3. 480	Zona urbana de Quesería, Colima	0.875	20	3
4. 458	Zona urbana de Quesería, Colima	0.699	77	4
5. 502	Zona urbana de Quesería, Colima	0.654	57	5
6. 249	Zona urbana de Cuauhtémoc, Colima	0.369	115	6
7. 55	Zona urbana de Villa de Álvarez, Colima	0.215	83	7
8. 436	Zona urbana de Quesería, Colima	0.190	201	8
9. 187	Zona urbana de Cuauhtémoc	0.103	71	9
10. 199	Zona urbana de Comala, Colima	0.098	43	10

El análisis realizado hasta el momento corresponde a la totalidad de las UER delimitadas para la zona de estudio; no obstante los alcances correspondientes a los fenómenos considerados dentro del análisis del riesgo son inferiores a la totalidad de la zona. A continuación se muestran los resultados para aquellas áreas comprendidas dentro de los alcances de los procesos eruptivos relacionados con el evento máximo esperado, es decir, la erupción de 1913.

4.2. Distribución espacial de los indicadores en los espacios bajo amenaza

De las 1124 UER delimitadas para la zona de estudio, 475 se encuentran dentro del alcance de los fenómenos relacionados con la erupción de 1913 (Figura 34). La información se determinó por medio del cruce entre el mapa de alcances de los procesos eruptivos (véase figura 23) y el correspondiente a la UER (véase figura 22).

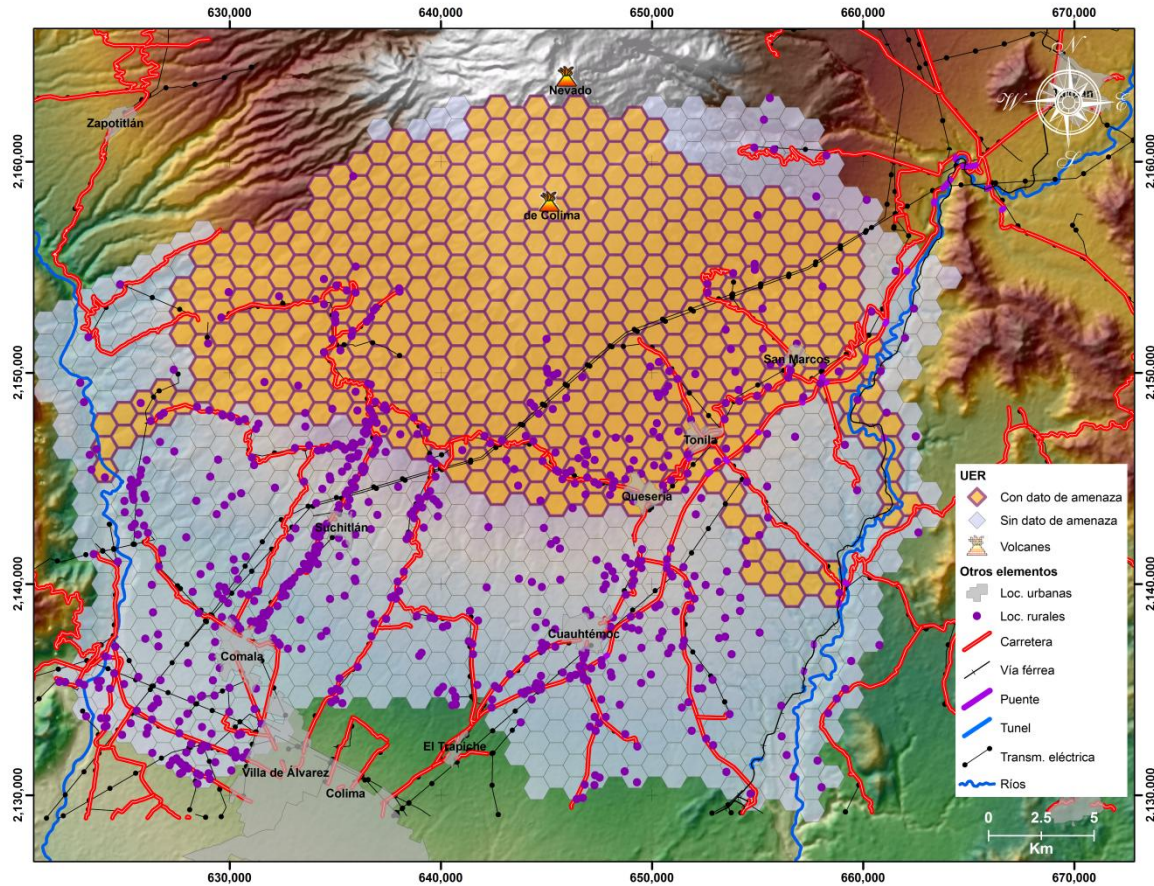


Figura 34. Distribución espacial de UER comprendidas dentro de los alcances de las amenazas consideradas para el análisis del riesgo

La figura muestra las áreas comprendidas dentro de los alcances de los procesos eruptivos relacionados con el evento de 1913. Se incluyen las localidades urbanas de Quesería, Tonilá y San Marcos.

De manera similar que en el análisis de la zona general, para las UER con dato de amenaza fueron calculados los valores para el IVP, RE e IRT, datos que se muestran con base en los fenómenos volcánicos involucrados. Los valores correspondientes se distribuyeron en tres clases con observancia de los intervalos utilizados en el análisis general.

4.2.1. Indicadores de IVP, RE e IRT para UER dentro de alcances de flujos piroclásticos

De las 475 UER que se encuentran dentro de las distancias de los fenómenos volcánicos analizados, 434 corresponden a espacios donde los flujos piroclásticos presentan alcance (Figura 35).

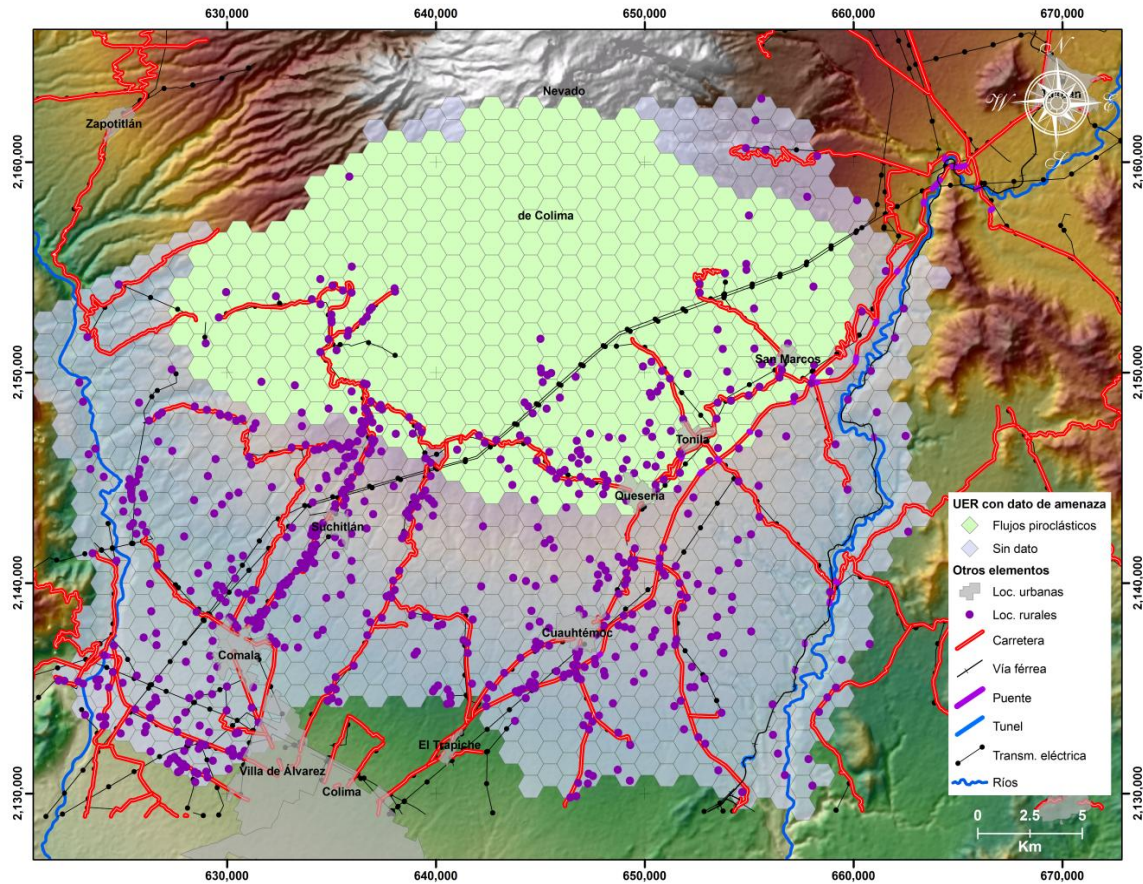


Figura 35. Distribución espacial de las UER localizadas dentro de los alcances de flujos piroclásticos relacionados con las erupciones de 1913

No todas las UER cuentan con información socioeconómica que permite calcular el IVP. De las 434 UER que se localizan dentro de los alcances de flujos piroclásticos, 228 cuentan con información suficiente para calcular el IVP; estas UER se distribuyeron en tres clases como a continuación se muestra:

Rango	UER
Sin dato	206
Bajo	127
Medio	66
Alto	35
Total	434

La distribución espacial se muestra en la figura 36; el valor más elevado corresponde a la UER 872 ubicada en el municipio de Zapotitlan de Vadillo, Jalisco, cuyo IVP asciende a 0.458 e incluye los datos estadísticos de los asentamientos de Tlajomulco y Rancho Santa Rosa.

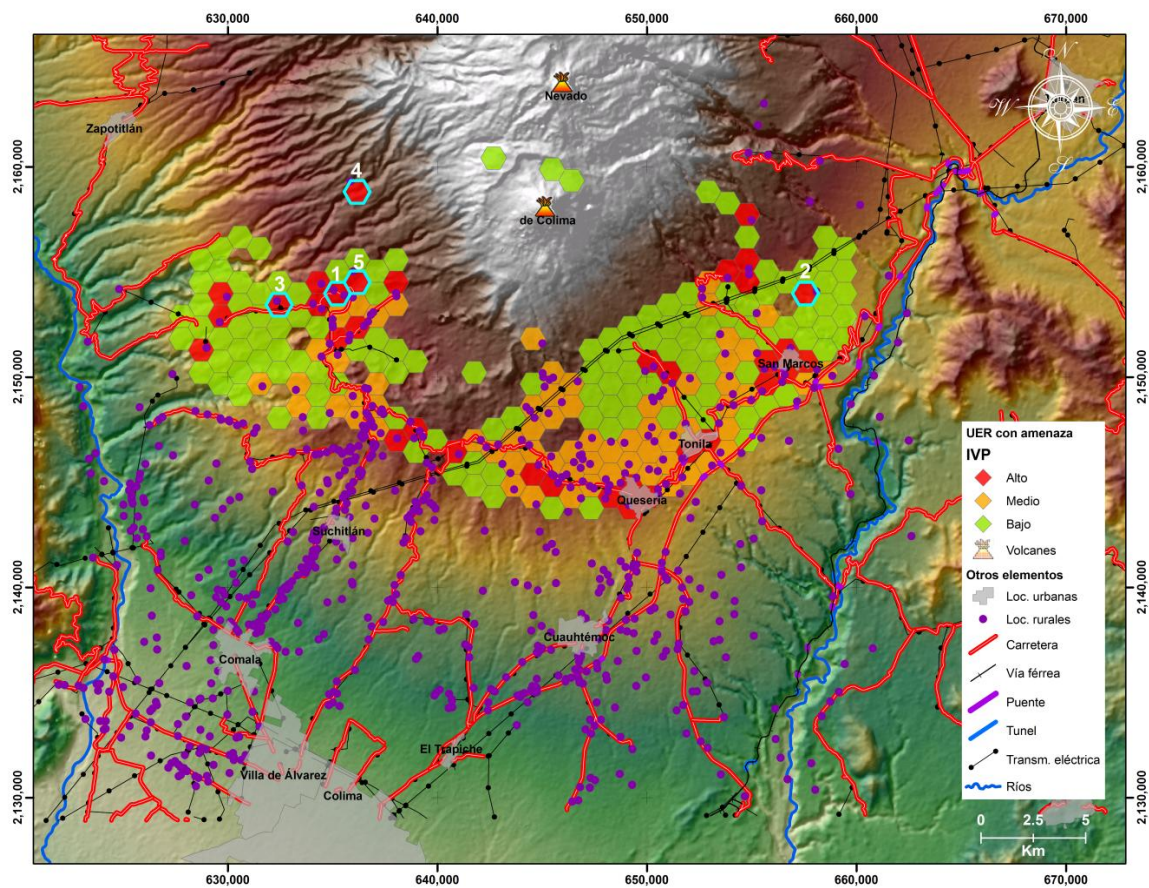


Figura 36. Distribución espacial del IVP en las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos piroclásticos relacionados con la erupción de 1913

En el mismo tenor que el análisis general, las UER con mayor valor coinciden con las zonas rurales, ya que en estos espacios confluyen características sociales de marginación, falta de

oportunidades y carencia de bienes que incrementen el nivel de vida de la población. Las UER que le siguen en valor se enlistan en la tabla 33.

Tabla 33. UER con mayor valor de IVP ubicadas dentro de los alcances de flujos piroclásticos

UER	Ubicación / localidades	IVP _{EF}	IVP _{FS}	IVP _{FR}	IVP
1. 872	Tlajomulco y Rancho Santa Rosa, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.240	0.404	0.732	0.458
2. 884	El Saucillo, Tuxpan, Jalisco	0.205	0.397	0.746	0.449
3. 849	El Tecuan, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.306	0.371	0.647	0.441
4. 1033	Las Moras, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.205	0.381	0.736	0.441
5. 894	La Mariana, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.210	0.381	0.728	0.440

Con respecto al número de población, en los espacios bajo amenaza se presenta una tendencia de incremento. Para el año 2000 se reportan 13,199 habitantes, los cuales incrementan a 16,536 en 2010, es decir un incremento del 25% general o 2% anual; este indicador se incluyó dentro del análisis del IVP por exposición física.

Con respecto a los valores para el RE, el importe general de la zona con amenaza de flujos piroclásticos asciende a \$9,790 millones de pesos, que equivale al 93% del importe de todas las UER localizadas dentro de los alcances correspondientes a los fenómenos volcánicos analizados. El monto corresponde a los elementos enlistados en la tabla 34:

Tabla 34. Evaluación de elementos bajo amenaza por flujos piroclásticos en la zona de estudio

Elemento	Total de unidades	Importe total (millones de pesos)
Inmuebles	5,320 Inmuebles	1,424
Vías de comunicación	86,848 Metros	1,752
Puentes	418 Metros	20
Líneas de transmisión	108,802 Metros	337
Subestaciones eléctricas	0 Unidades	0.00
Escuelas	25 Escuelas	15
Producción económica	661 Unidades económicas	6,242
Total		9,790

Del importe expresado en la tabla previa, \$7,522 millones de pesos corresponden a elementos ubicados en Colima y \$2,268 millones de pesos a Jalisco; ambos importes constituyen el 17% y 0.4% del PIB estatal de manera respectiva. Con base en los valores de RE las UER se clasificaron de la siguiente manera:

Rango (miles de pesos)	UER
Sin dato	206
Menos de 1,000	64
Entre 1,001 y 10,000	89
Más de 10,000	75
Total	434

Cuya distribución espacial se muestra en la figura 37. Las UER con mayor importe coinciden con los asentamientos urbanos de Quesería y Tonilá en las cuales confluyen tanto infraestructura vial, ferroviaria y de transmisión eléctrica como inmuebles, escuelas, y producción económica que constituye el RE.

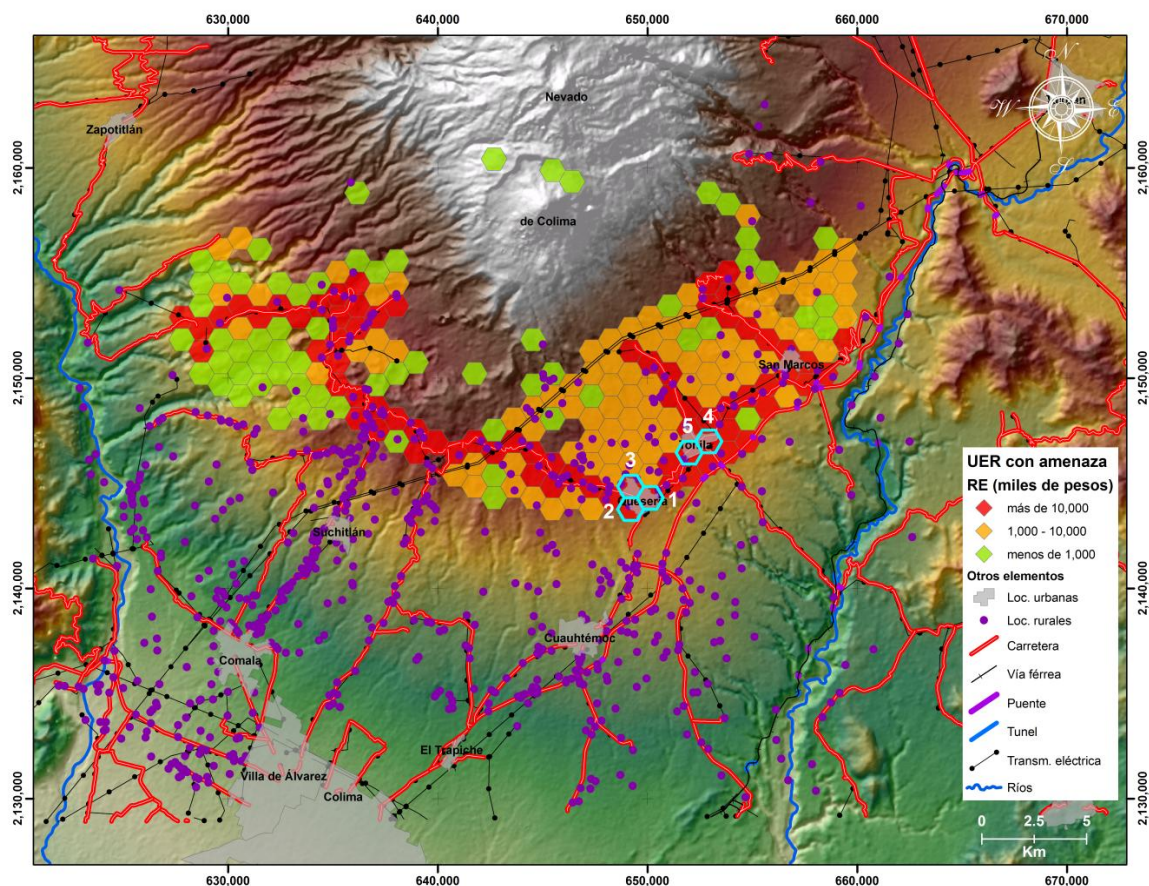


Figura 37. Distribución espacial del RE de las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos piroclásticos relacionados con la erupción de 1913

Las UER con mayor importe corresponde a la 480 que se localiza en la zona urbana de Quesería, Cuauhtémoc, Colima; el importe asciende a \$ 2,485 millones de pesos que representa el 24% del valor de los elementos bajo amenaza. Las UER que le siguen se enlistan en la tabla 35 cuyo total equivale al 66% del importe de las UER bajo algún tipo de amenaza (flujos piroclásticos y lahares).

Tabla 35. UER dentro de los alcances de flujos piroclásticos con mayor valor de RE

UER	Ubicación / localidades	Importe (millones de pesos)
1. 480	Zona urbana de Quesería, Cuauhtémoc, Colima	2,485
2. 458	Zona urbana de Quesería, Cuauhtémoc, Colima	2,030
3. 502	Zona urbana de Quesería, Cuauhtémoc, Colima	1,887
4. 591	Zona urbana de Tonilá, Jalisco	272
5. 569	Zona urbana de Tonilá, Jalisco	255
Total		6,929

Para finalizar, el IRT de las áreas bajo amenaza de flujo piroclástico distribuyó las UER de la siguiente forma:

Rango	UER
Sin dato	206
Bajo	108
Medio	83
Alto	37
Total	434

La distribución espacial de las UER se muestra en la figura 38; la unidad con mayor valor de IRT corresponde a la 480, localizada en la zona urbana de Quesería; el valor del índice asciende a 0.875, ocupó el primer lugar en importe de RE y el 6° en valor de IVP.

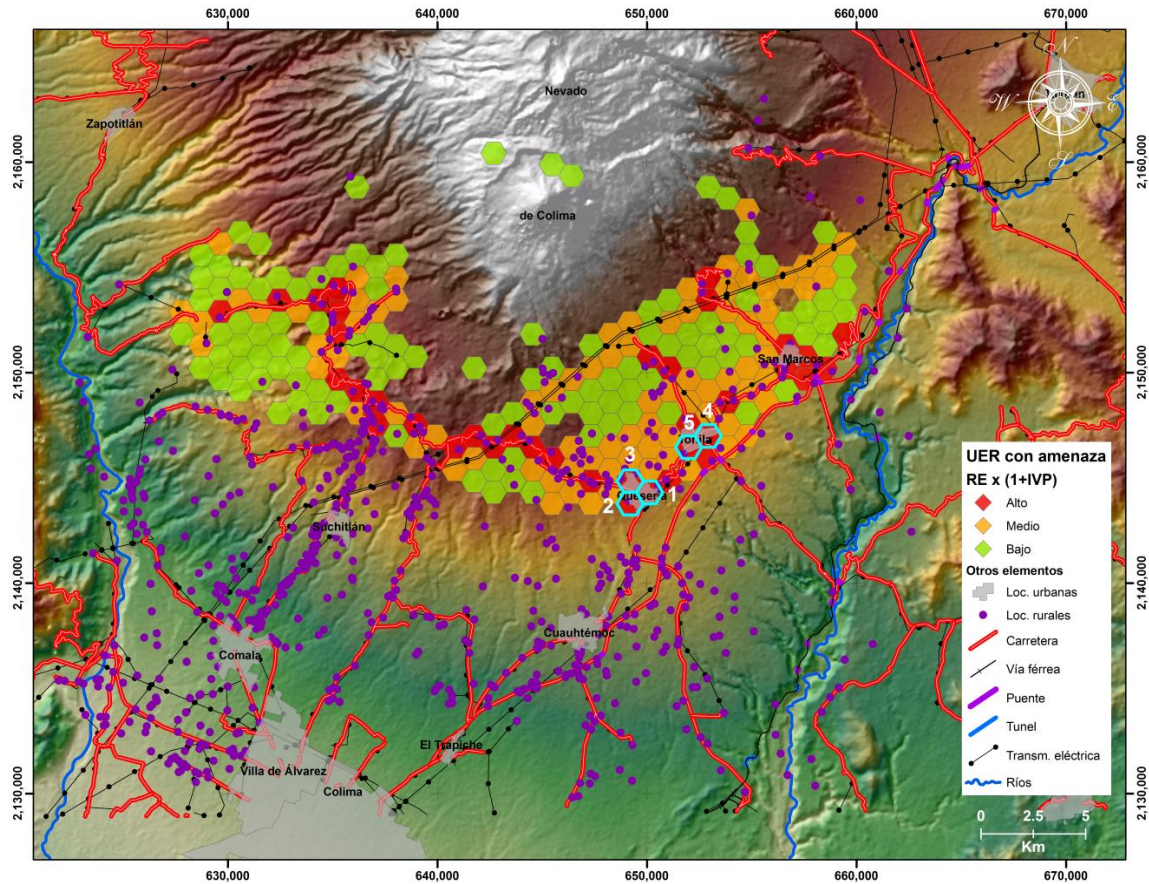


Figura 38. Distribución espacial del IRT de las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos piroclásticos relacionados con la erupción de 1913

Las UER que siguen en importancia de IRT se enlistan en la tabla 36, éstas coinciden con las zonas urbanas de mayor importancia como Quesería y Tonilá.

Tabla 36. UER dentro de los alcances de flujos piroclásticos con mayor valor de IRT

UER	Ubicación / localidades	IRT	Posición		
			IVP	RE	
1.	480	Zona urbana de Quesería, Colima	0.875	6	1
2.	458	Zona urbana de Quesería, Colima	0.699	29	2
3.	502	Zona urbana de Quesería, Colima	0.654	22	3
4.	591	Zona urbana Tonilá, Jalisco	0.094	7	4
5.	569	Zona urbana Tonilá, Jalisco	0.088	15	5

4.2.2. Indicadores de IVP, RE e IRT para UER dentro de alcances de lahares

De las 475 UER que se encuentran dentro de las distancias de los fenómenos volcánicos analizados, 157 corresponden a espacios donde los lahares que se distribuyen, según se muestra en la figura 39. Cabe hacer mención que se presentaron UER donde inciden tanto flujos piroclásticos como lahares; estas UER serán analizadas en un apartado diferente.

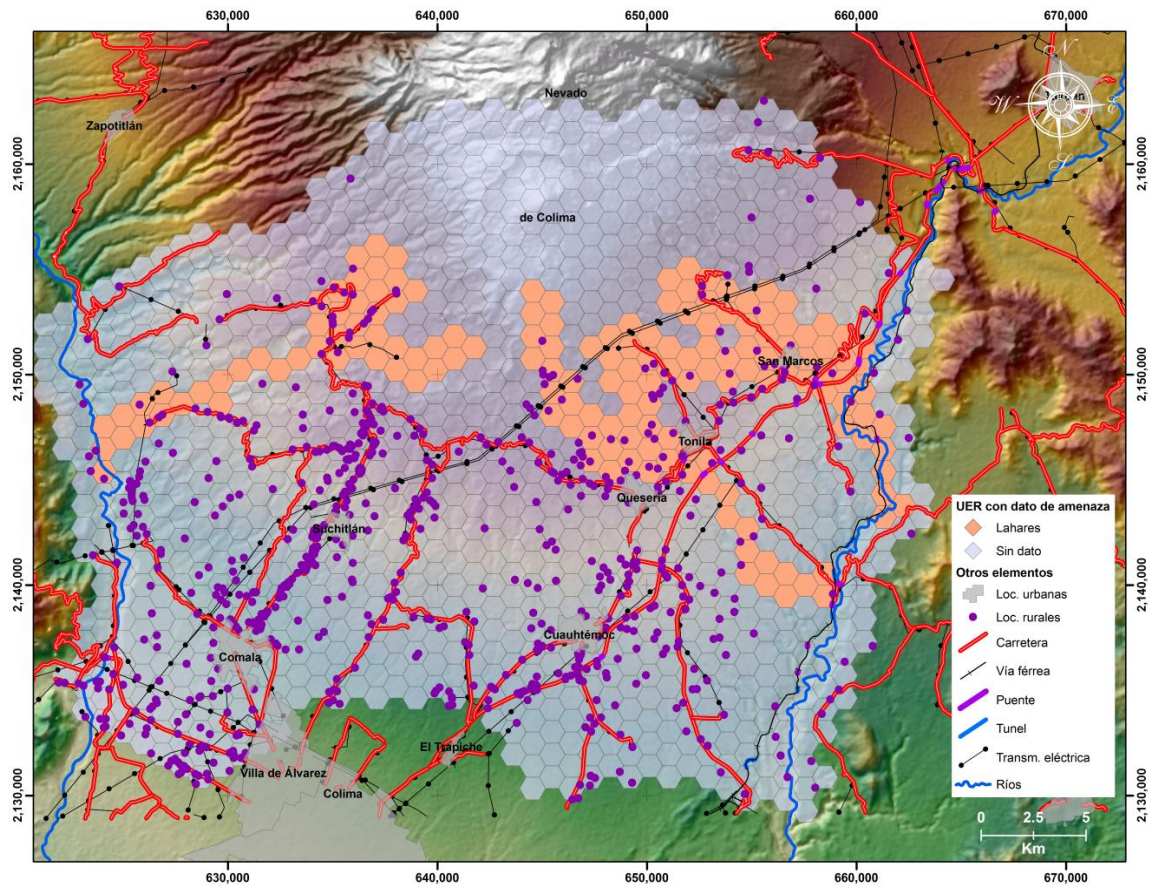


Figura 39. Distribución espacial de UER localizadas dentro de los alcances de lahares

Con respecto a las UER bajo amenaza de lahares, los valores de IVP son los siguientes:

Rango	UER
Sin dato	19
Bajo	78
Medio	42
Alto	18
Total	157

La distribución espacial se muestra en la figura 40; el valor más elevado corresponde a la UER 872 ubicada en el municipio de Zapotitlán de Vadillo, Jalisco, cuyo IVP asciende a 0.458 e incluye los datos estadísticos de los asentamientos de Tlajomulco y Rancho Santa Rosa.

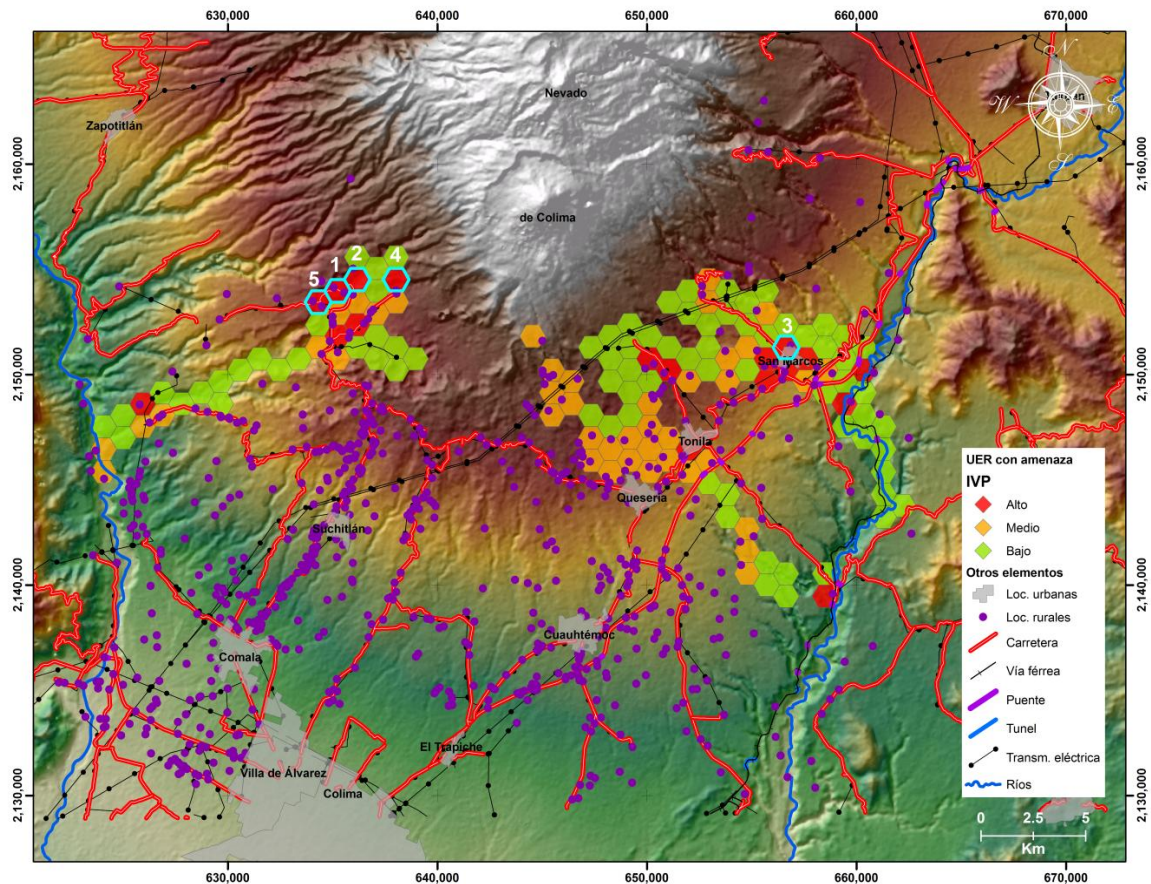


Figura 40 Distribución espacial del IVP en las UER que se encuentran dentro de los alcances de lahares relacionados con la erupción de 1913

Las UER con mayor valor coinciden con las zonas rurales, ya que en estos espacios confluyen características socioeconómicas que disminuyen la calidad de vida de la población. Las UER que le siguen en valor se enlistan en la tabla 37.

Tabla 37. UER con mayor valor de IVP ubicadas dentro de los alcances de lahares

UER	Ubicación / localidades	IVP _{EF}	IVP _{FS}	IVP _{FR}	IVP
1. 872	Tlajomulco y Rancho Santa Rosa, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.240	0.404	0.732	0.458
2. 894	La Mariana, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.210	0.381	0.728	0.440
3. 771	Parte norte del asentamiento San Marcos y la población de La Caseta, Tonilá, Jalisco	0.361	0.282	0.653	0.432
4. 895	La Yerbabuena, Comala, Colima	0.269	0.301	0.695	0.422
5. 850	La Estancia y Las Galeanas, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.234	0.243	0.782	0.420

Con respecto al número de población, en los espacios bajo amenaza de lahares se presenta una tendencia de incremento. Para el año 2000 se reportan 2,075 habitantes, los cuales incrementan a 5,147 en 2010, es decir un incremento del 148% general o 10% anual; este indicador se incluyó dentro del análisis del IVP por exposición física.

Con respecto a los valores para el RE, el importe general de la zona con amenaza de lahares asciende a \$2,340 millones de pesos, que equivale al 22% del importe total de las UER bajo amenaza. El monto corresponde a los elementos enlistados en la tabla 38:

Tabla 38. Evaluación de elementos bajo amenaza de lahares en la zona de estudio

Elemento	Total de unidades	Importe total (millones de pesos)
Inmuebles	1,808 Inmuebles	607
Vías de comunicación	65,480 Metros	1,320
Puentes	1,205 Metros	58
Líneas de transmisión	56,418 Metros	175
Subestaciones eléctricas	0 Unidades	0.00
Escuelas	13 Escuelas	8
Producción económica	252 Unidades económicas	172
Total		2,340

Del importe expresado en la tabla previa, \$511 millones de pesos corresponden a elementos ubicados en Colima y \$1,829 millones de pesos a Jalisco; ambos importes constituyen el 1.1% y 0.3% del PIB estatal de manera respectiva. Con base en los valores de RE las UER se clasificaron de la siguiente manera:

Rango (miles de pesos)	UER
Sin dato	19
Menos de 1,000	25
Entre 1,001 y 10,000	62
Más de 10,000	51
Total	157

Cuya distribución espacial se muestra en la figura 41. Las UER con mayor importe coinciden con los asentamientos urbanos de Tonilá y San Marcos pertenecientes al municipio de Tonilá, Jalisco y la infraestructura carretera en las inmediaciones de la localidad Barranca El Durazno, perteneciente al municipio de Tuxpan, Jalisco en las cuales confluyen tanto infraestructura vial, puentes, vías de ferrocarril, transmisión eléctrica e inmuebles tanto particulares como públicos, escuelas, y producción económica que constituye el RE.

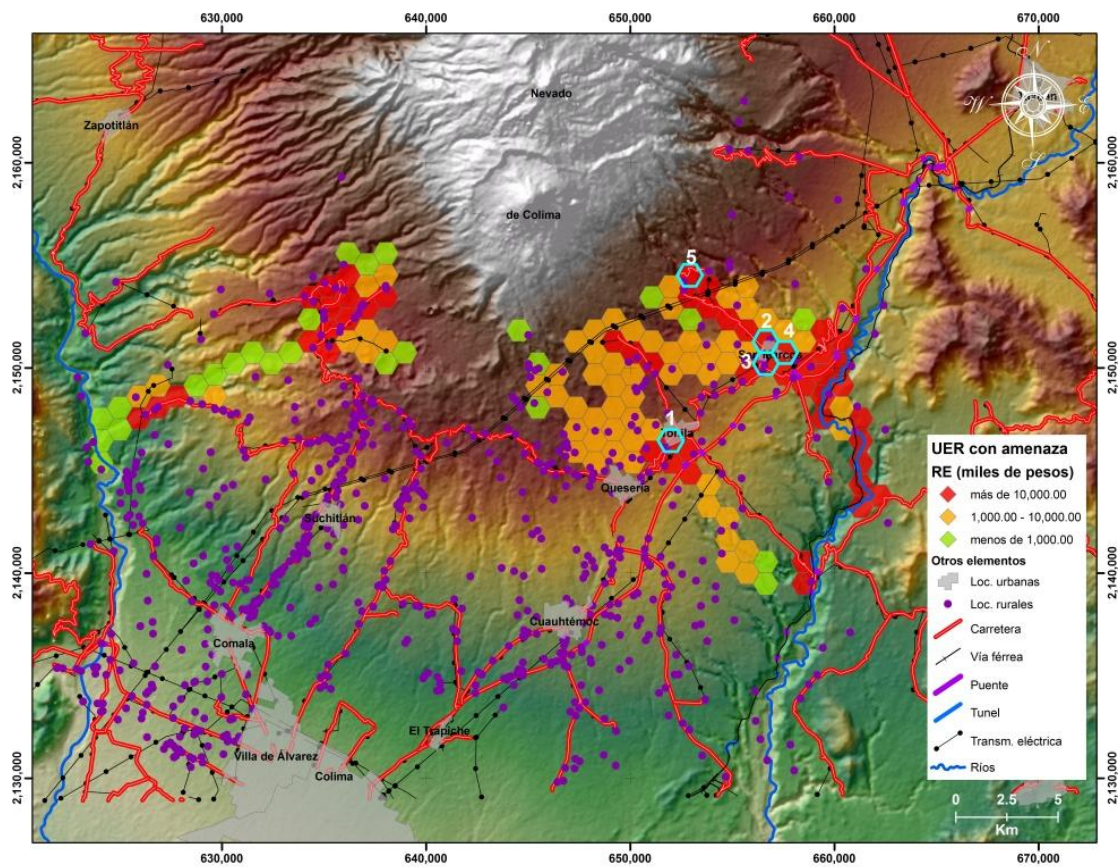


Figura 41. Distribución espacial del RE de las UER que se encuentran dentro de los alcances de lahares relacionados con la erupción de 1913

Las UER con mayor importe corresponde a la 569 que se localiza en la zona urbana de Tonilá, Tonilá, Jalisco; el importe asciende a \$ 255 millones de pesos que representa el 2% del valor de las UER bajo amenaza. Las UER que le siguen se enlistan en la tabla 39 cuyo total equivale al 7% del importe de las UER bajo amenaza.

Tabla 39. UER dentro de los alcances de lahares con mayor valor de RE

UER	Ubicación / localidades	Importe (millones de pesos)
1. 569	Zona urbana de Tonilá, Tonilá, Jalisco	254
2. 771	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	199
3. 726	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	163
4. 749	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	82
5. 903	Barranca del Durazno, Tuxpan, Jalisco	62
	Total	760

Como punto final, el IRT de las áreas bajo amenaza por lahares distribuyó las UER de la siguiente forma:

Rango	UER
Sin dato	19
Bajo	56
Medio	61
Alto	21
Total	157

La distribución espacial de las UER se muestra en la figura 42; la unidad con mayor valor de IRT corresponde a la 569, localizada en la zona urbana de Tonilá, Tonilá, Jalisco; el valor del índice asciende a 0.088, ocupó el quinto lugar en importe de RE y el 20° en valor de IVP.

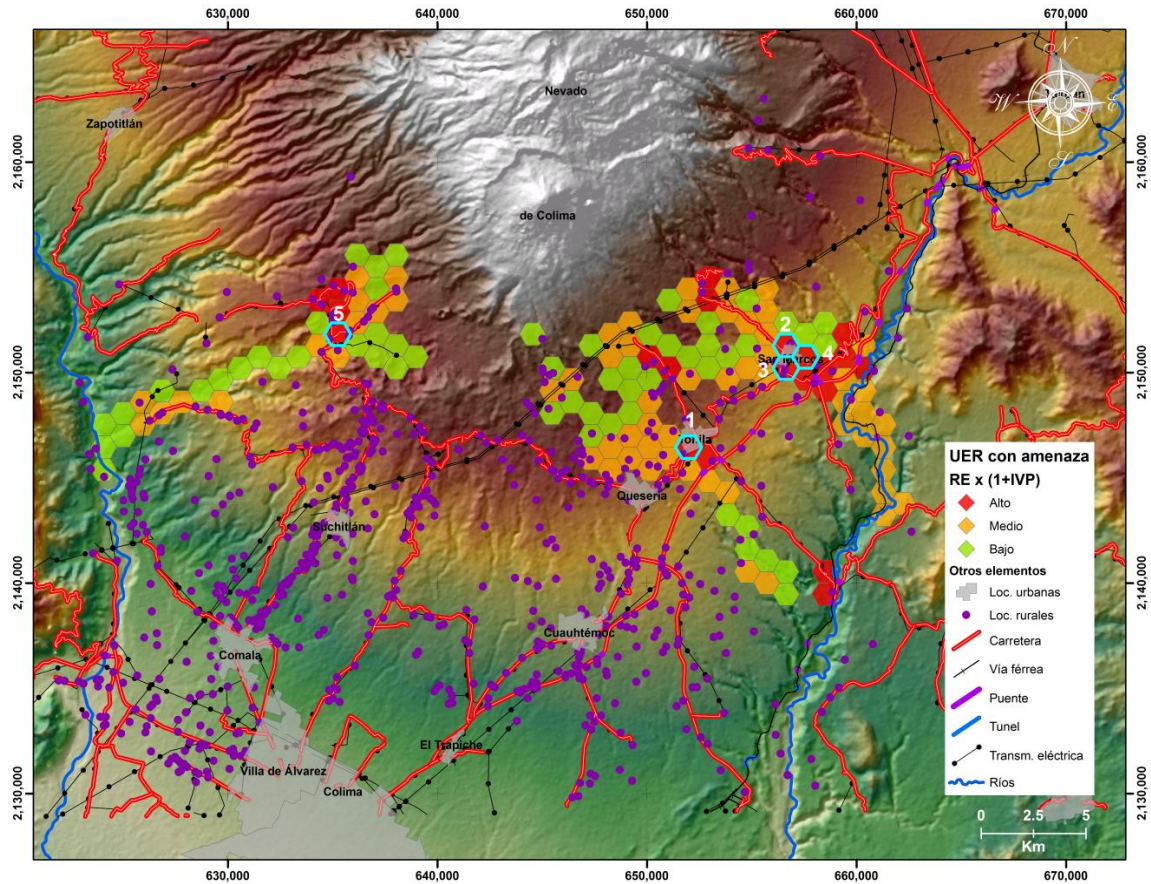


Figura 42. Distribución espacial del IRT de las UER que se encuentran dentro de los alcances de lahares relacionados con la erupción de 1913

Las UER que siguen en importancia de IRT se enlistan en la tabla 40, éstas coinciden con las zonas urbanas de mayor importancia como Tonilá y San Marcos, del Municipios de Tonilá, Jalisco y la comunidad de la Becerrera, Municipio de Comala, Colima

Tabla 40. UER dentro de los alcances de lahares con mayor valor de IRT

UER	Ubicación / localidades	IRT	Posición IVP	Posición RE
1. 569	Zona urbana de Tonilá, Tonilá, Jalisco	0.088	20	5
2. 771	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	0.070	7	6
3. 726	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	0.056	17	7
4. 749	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	0.028	28	10
5. 782	La Becerrera, Comala, Colima	0.020	25	12

4.2.3. Indicadores de IVP, RE e IRT para UER en las cuales inciden flujos piroclásticos y lahares

Si bien, el objetivo de la presente investigación no es generar o proponer una metodología que permita evaluar multiamenazas a continuación se muestran las UER en las cuales inciden ambos fenómenos volcánicos analizados en el entendido de que la propuesta de una metodología que permita la evaluación de amenazas múltiples es aun un tema por desarrollar.

De las 475 UER que se localizan dentro de los alcances de las amenazas, en 116 inciden tanto flujos piroclásticos como lahares. La distribución espacial de estas UER se muestra en la figura 43.

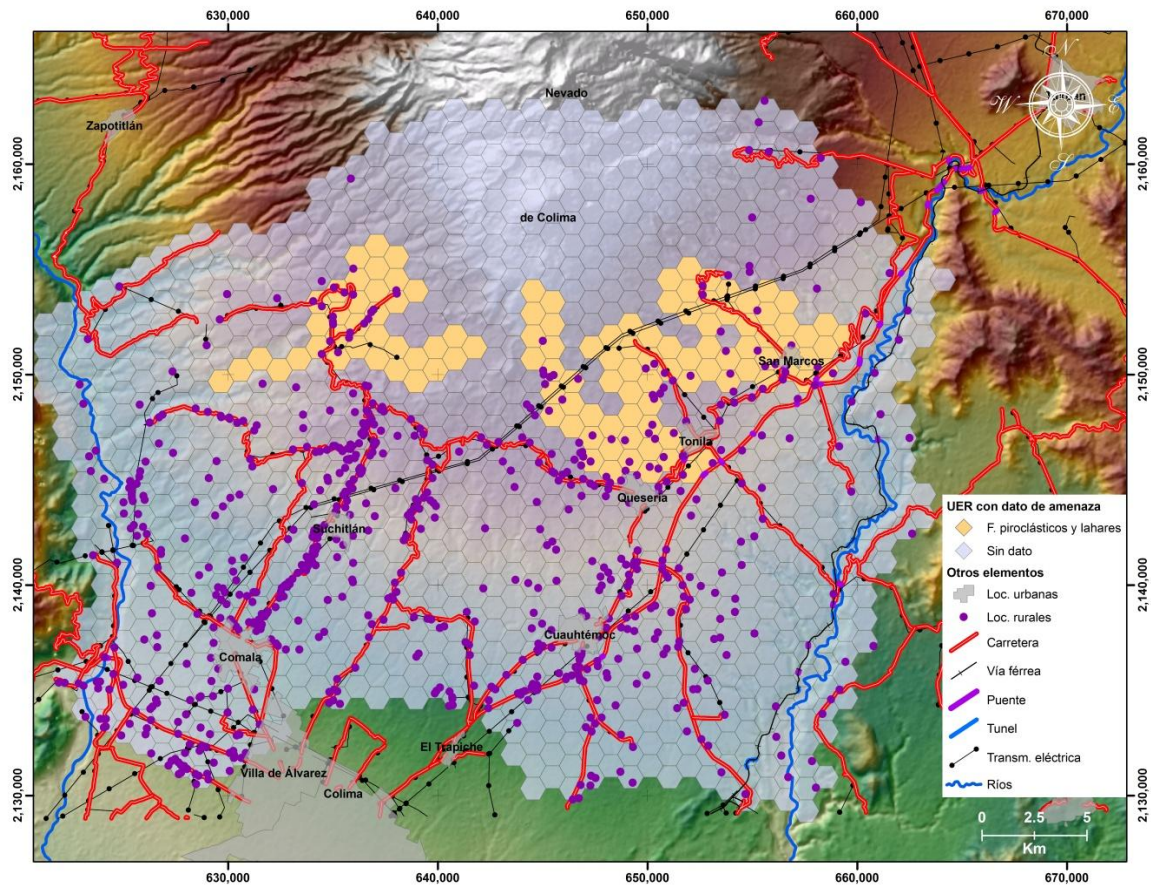


Figura 43. UER localizadas dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares relacionados con la actividad eruptiva de 1913

Con respecto a los valores de IVP, las 116 UER presentan los siguientes valores:

Rango	UER
Sin dato	18
Bajo	49
Medio	35
Alto	14
Total	116

La distribución espacial se muestra en la figura 44; el valor más elevado corresponde a la UER 872 ubicada en el municipio de Zapotitlán de Vadillo, Jalisco, cuyo IVP asciende a 0.458 e incluye los datos estadísticos de los asentamientos de Tlajomulco y Rancho Santa Rosa.

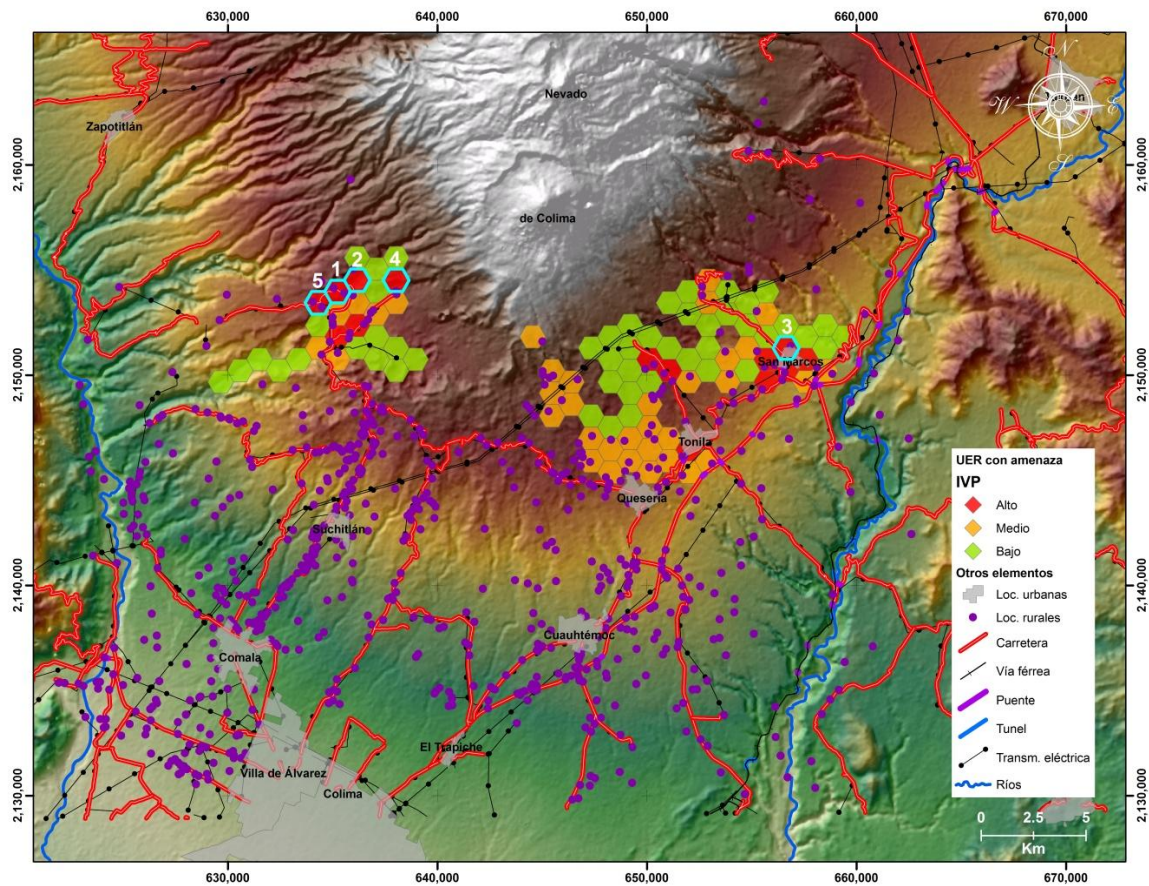


Figura 44. Distribución espacial del IVP en las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares relacionados con la erupción de 1913

Las UER con mayor valor en vulnerabilidad coinciden, en su mayoría con asentamientos de orden rural, a excepción de la UER que ocupa la 3ª posición la cual comprende la parte norte

del asentamiento San Marcos, perteneciente al municipio de Tonilá, Jalisco. Las UER que le siguen en valor se enlistan en la tabla 41.

Tabla 41. UER con mayor valor de IVP ubicadas dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares

UER	Ubicación / localidades	IVP _{EF}	IVP _{FS}	IVP _{FR}	IVP
1. 872	Tlajomulco y Rancho Santa Rosa, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.240	0.404	0.732	0.458
2. 894	La Mariana, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.210	0.381	0.728	0.440
3. 771	Parte norte del asentamiento San Marcos y la población de La Caseta, Tonilá, Jalisco	0.361	0.282	0.653	0.432
4. 895	La Yerbabuena, Comala, Colima	0.269	0.301	0.695	0.422
5. 850	La Estancia y Las Galeanas, Zapotitlan de Vadillo, Jalisco	0.234	0.243	0.782	0.420

Con respecto al número de población, en los espacios bajo amenaza de flujos piroclásticos y lahares se presenta una tendencia de incremento. Para el año 2000 se reportan 1,929 habitantes, los cuales incrementan a 5,008 en 2010, es decir un incremento del 160% general o 10% anual; este indicador se incluyó dentro del análisis del IVP por exposición física.

Con respecto a los valores para el RE, el importe general de la zona con amenaza de lahares y flujos piroclásticos asciende a \$1,680 millones de pesos, que equivale al 16% del importe total de las UER bajo amenaza. El monto corresponde a los elementos enlistados en la tabla 42:

Tabla 42. Evaluación de elementos bajo amenaza de lahares en la zona de estudio

Elemento	Total de unidades	Importe total (millones de pesos)
Inmuebles	1,713 Inmuebles	590
Vías de comunicación	38,580 Metros	778
Puentes	383 Metros	19
Líneas de transmisión	48,073 Metros	149
Subestaciones eléctricas	0 Unidades	0.00
Escuelas	11 Escuelas	6
Producción económica	251 Unidades económicas	138
Total		1,680

Del importe expresado en la tabla previa, \$ 355 millones de pesos corresponden a elementos ubicados en Colima y \$ 1,325 millones de pesos a Jalisco; ambos importes constituyen el 0.8%

y 0.2% del PIB estatal de manera respectiva. Con base en los valores de RE las UER se clasificaron de la siguiente manera:

Rango (miles de pesos)	UER
Sin dato	18
Menos de 1,000	17
Entre 1,001 y 10,000	50
Más de 10,000	31
Total	116

Cuya distribución espacial se muestra en la figura 45. Las UER con mayor importe se ubican en los asentamientos urbanos de Tonilá y San Marcos, Tonilá, Jalisco así como en el asentamiento denominado Barranca El Durazno, Tuxpan, Jalisco, en donde confluyen infraestructura vial e inmuebles que constituyen el RE.

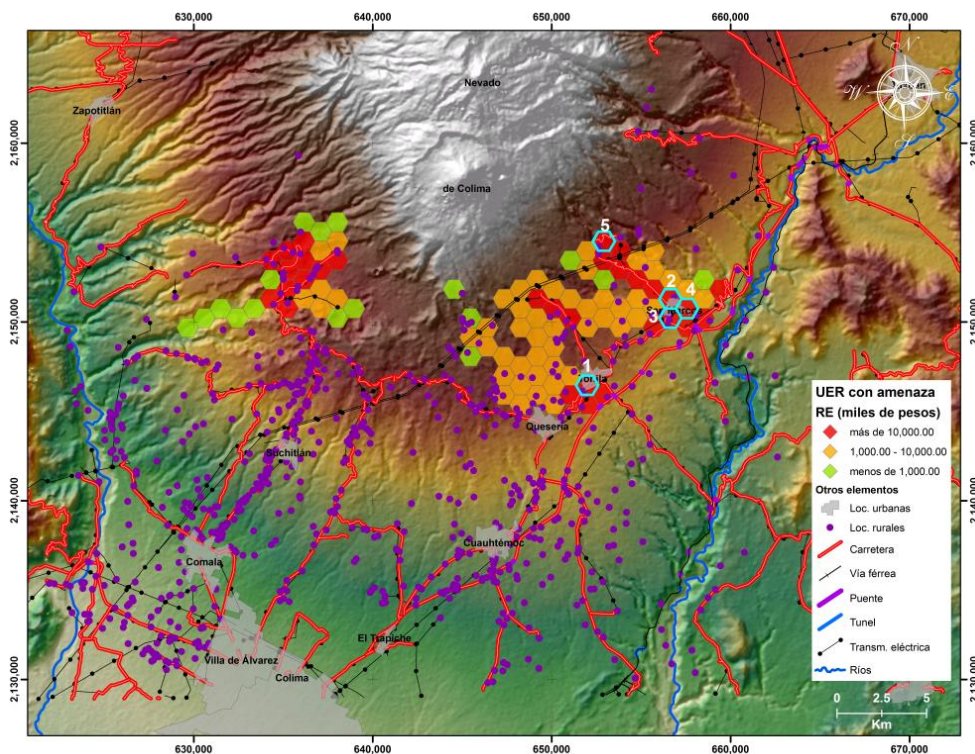


Figura 45. Distribución espacial del RE de las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares relacionados con la erupción de 1913

Las UER con mayor importe corresponde a la 569 que se localiza en la zona urbana de Tonilá, Tonilá, Jalisco; el importe asciende a \$ 255 millones de pesos que representa el 2% del valor de las UER bajo amenaza. Las UER que le siguen se enlistan en la tabla 43 cuyo total equivale al 7% del importe de las UER bajo amenaza.

Tabla 43. UER dentro de los alcances de lahares con mayor valor de RE

UER	Ubicación / localidades	Importe (millones de pesos)
1. 569	Zona urbana de Tonilá, Tonilá, Jalisco	255
2. 771	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	199
3. 726	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	162
4. 749	Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	82
5. 903	Barranca del Durazno, Tuxpan, Jalisco	61
	Total	760

Como punto final, el IRT de las áreas bajo amenaza por lahares distribuyó las UER de la siguiente forma:

Rango	UER
Sin dato	19
Bajo	56
Medio	61
Alto	21
Total	157

La distribución espacial de las UER se muestra en la figura 46; la unidad con mayor valor de IRT corresponde a la 569, localizada en la zona urbana de Tonilá, Tonilá, Jalisco; el valor del índice asciende a 0.088, ocupó el quinto lugar en importe de RE y el 20° en valor de IVP.

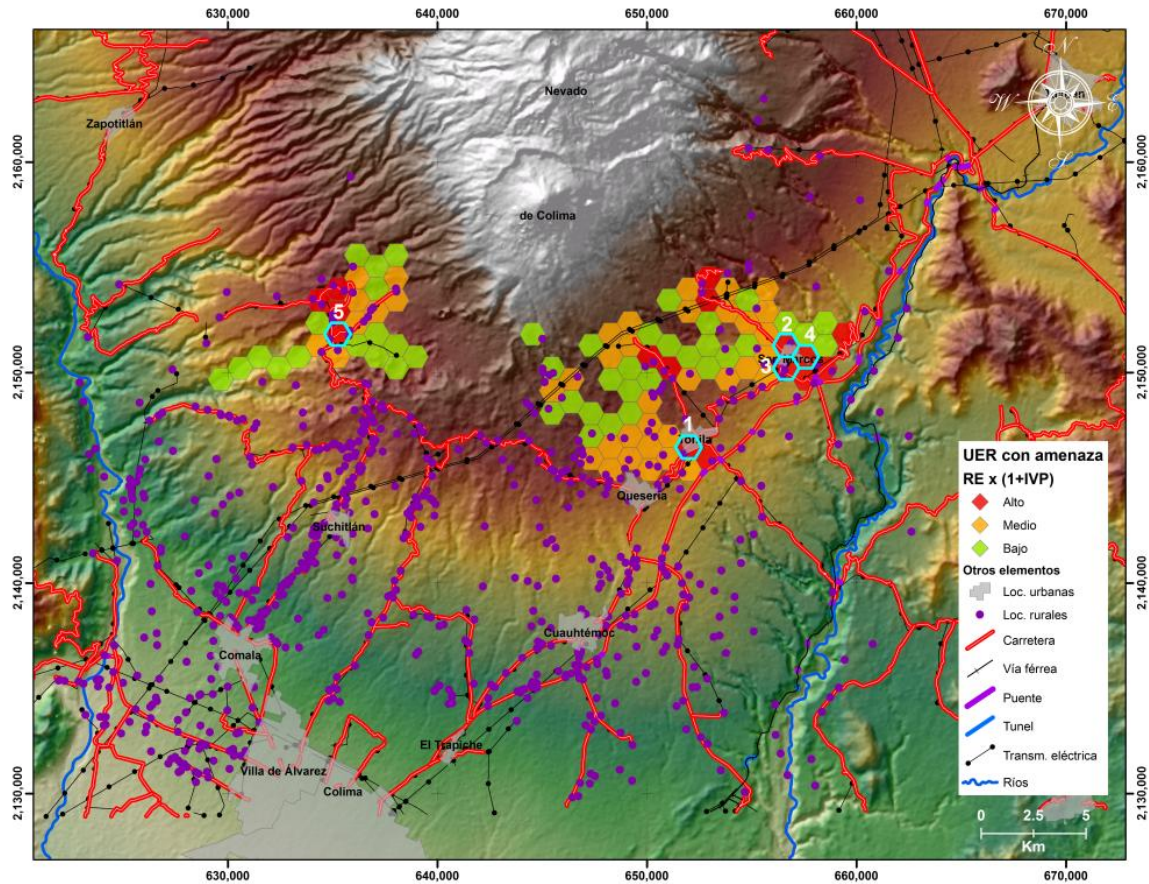


Figura 46. Distribución espacial del IRT de las UER que se encuentran dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares relacionados con la erupción de 1913

Las UER que siguen en importancia de IRT se enlistan en la tabla 44, éstas coinciden con las zonas urbanas de mayor importancia como Tonilá y San Marcos, del Municipios de Tonilá, Jalisco y la comunidad de la Becerrera, Municipio de Comala, Colima

Tabla 44. UER dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares con mayor valor de IRT

UER	Ubicación / localidades	IRT	Posición IVP	Posición RE
1.	569 Zona urbana de Tonilá, Tonilá, Jalisco	0.088	20	5
2.	771 Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	0.070	7	6
3.	726 Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	0.056	17	7
4.	749 Zona urbana de San Marcos, Tonilá, Jalisco	0.028	28	10
5.	782 La Becerrera, Comala, Colima	0.020	25	12

Discusión y conclusiones

Discusión

El volcán de Colima es considerado como el más activo del país, por ello cuenta con un observatorio vulcanológico donde se miden en tiempo real un número importante de parámetros que permiten monitorear el nivel de actividad. Asimismo, ha sido tema de un importante número de investigaciones sobre las diferentes manifestaciones que ha presentado a lo largo de su historia. Algunas, como las propuesta por Saucedo *et al* (2005), Dávila *et al* (2007), Capra *et al* (2010) y Sulpizio *et al* (2010), por mencionar unas pocas, buscan zonificar los alcances de los fenómenos asociados a la actividad eruptiva con la finalidad de identificar zonas susceptibles de amenaza.

Además de este tipo de investigaciones, se han realizado estudios como los propuestos por Saucedo (1997) y Saucedo *et al* (2010) que reconstruyen por medio de trabajo de campo y versiones de testigos oculares los procesos volcánicos presentados durante el episodio de 1913, que es señalado como el más importante con registro histórico y cuyos alcances son considerados como referencia dentro de los estudios de amenaza y riesgo.

Estas investigaciones, relacionada con la visión del riesgo desde las ciencias naturales, son primordiales al momento de incluir factores socioeconómicos en el análisis (Maskrey, 1998); la inclusión de elementos sociales en el estudio de riesgos es de suma importancia porque de esta forma la población pasa de ser un ente pasivo en la relación sociedad – naturaleza a ser un ente activo, cuya dinámica y procesos históricos y económicos modifican los efectos de los fenómenos peligrosos que inciden en un territorio (Wilches, 1993).

La inclusión de la vulnerabilidad en los estudios sobre riesgo se desarrolla en la década de los años 80 del siglo XX, cuando la oficina de las Naciones Unidas para Desastres (UNDRO por sus siglas en inglés) propone que el concepto sea considerado como un grado de pérdida; la inclusión de este concepto en los modelos conceptuales del riesgo permitió enfatizar la heterogeneidad de los impactos asociados con las amenazas, las cuales presentan diferencias en el espacio y el tiempo (Maskrey, 1998). No obstante, con esta visión, la población continua como ente pasivo de la relación sociedad – naturaleza, ya que la vulnerabilidad sólo implicaba un grado de pérdida.

El cambio se presenta con la inclusión del concepto de vulnerabilidad, pero desde una visión social, lo cual significa que el riesgo no puede calcularse ni la vulnerabilidad definirse sin hacer referencia a las capacidades sociales de responder y recuperarse de un evento extremo. En este sentido la sociedad deja de ser un ente pasivo para convertirse en un elemento activo dentro del estudio de los riesgos (Maskrey, 1998).

No obstante, el cálculo formal del riesgo se enfrenta a la complejidad de hacer cuantificable el concepto cualitativo de la vulnerabilidad (Sanahuja, 1999). En este punto se propone el cálculo de índices e indicadores que transformen las características cualitativas de la vulnerabilidad en datos cuantitativos que puedan ser medibles y comparables.

Los conceptos de desarrollo humano y pobreza se han consolidado principalmente durante las últimas décadas del siglo XX (Albala, 1993, Armand *et al*, 1997), no obstante en los inicios del desarrollo de este marco conceptual, las cuestiones de desarrollo humano, pobreza y marginación no se consideraban dentro de los análisis de riesgo como consecuencia de la aplicación generalizada de la metodología para el cálculo del riesgo propuesta por la ONU a través de la oficina orientada hacia el análisis de los desastres: UNDRO así como el predominio, aun vigente, de la visión naturalista del riesgo (Maskrey, 1998).

Es a principios de este siglo que Cardona (2001) y Barbat (2003) propone y enlista un número determinado de indicadores que pueden ser calculados con base en la información estadística de cada país y presenta la serie de índices que convierten a la vulnerabilidad en un concepto medible y desarrollan, a la par, el marco conceptual correspondiente.

La metodología por Cardona (2005) permite la inclusión holística de elementos socioeconómicos que tienen injerencia en los efectos ocasionados por fenómenos naturales; el cálculo de los indicadores y su inclusión dentro del análisis del riesgo permite identificar los espacios donde las debilidades socioeconómicas pudieran generar un desastre por fenómenos naturales, independientemente de la magnitud de éstos. En este sentido, el cálculo del índice de riesgo total (IRT) permite la integración de características sociales con datos provenientes de potenciales pérdidas económicas relacionadas a fenómenos naturales peligrosos.

El cálculo del IRT facilita la representación cartográfica de zonas donde incide la vulnerabilidad, las pérdidas económicas y la amenaza, en este sentido coadyuva al análisis contextual, es decir, el territorio se puede estudiar no sólo por encontrarse dentro de los

alcances de los fenómenos naturales peligrosos sino tomando en cuenta su ubicación con respecto a las cabeceras municipales, producción económica, crecimiento de su población, grado escolar, unidades económicas que producen bienes y servicios, calidad de la vivienda y presencia de bienes que mejoran la calidad de vida de los habitantes; de esta manera, integrar dichas características dentro de la evaluación del riesgo.

Por medio del cálculo del índice de vulnerabilidad prevalente (IVP) y riesgo específico (RE) fue posible señalar a las zonas rurales como aquellas que ostentan una mayor vulnerabilidad relacionada con las carencias sociales y económicas inherentes de estos espacios y a las zonas urbanas como aquellas donde el riesgo específico es superior debido a la incidencia en estos espacios de carreteras, tendidos eléctricos, viviendas, edificaciones y demás infraestructura característica de estos espacios. En este tenor, no sólo se señalaron los espacios por su cercanía con los alcances de fenómenos volcánicos sino por sus características socioeconómicas.

La selección de esta metodología obedeció a la claridad con la cual se explica el cálculo de los elementos a evaluar y su relación, asimismo con la consistencia en el desarrollo del marco conceptual. En nuestro país no hay hasta el momento trabajos que estimen el riesgo con base en la relación holística de los elementos sociales, económicos y naturales que es posible a través de este método; en este sentido, la presente investigación es pionera en el campo de la evaluación del riesgo como un fenómeno holístico; dicha evaluación realizada por medio del análisis espacial.

Con respecto a lo último, el uso de sistemas de información geográfica coadyuvó e hizo eficiente tanto el estudio como la representación cartográfica de los elementos analizados; por ello constituyeron una herramienta indispensable en el estudio de riesgos, amenazas y relación sociedad – naturaleza. Los sistemas de información geográfica agilizaron el manejo conjunto de bases de datos de los elementos analizados además de que facilitaron la división de la zona de estudio en las unidades espaciales de referencia (UER) que permitieron el estudio.

El problema principal dentro de la investigación fue el acceso a la información y la calidad de los datos disponibles para el cálculo de los indicadores. Por desgracia, alguna información no está disponible, la escala es muy grande, se encuentra fraccionada o se representa en diversos formatos espaciales que involucran inconsistencias dentro del análisis. Para solventar algunos de estos problemas, se propuso el uso de UER que permitieran una

homogeneidad espacial para hacer el estudio más eficiente. El uso de esta metodología, característica de investigaciones ecológicas y económicas, demostró que si bien se pierde precisión en la identificación puntual los espacios, se gana en capacidad de análisis y representación cartográfica. Por tanto, el tamaño de las unidades espaciales en futuras investigaciones, dependerá de la zona de estudio, detalle en los resultados deseados y calidad de datos disponibles.

Con respecto a esto último, es importante señalar el esfuerzo por socializar la información que han hecho las dependencias gubernamentales encargadas de generar estadísticas como INEGI, SCT o CONAPO, no obstante se vienen arrastrando vicios e inconsistencias que sólo con el tiempo serán solventadas. Por mencionar un ejemplo, existen diferencias entre los censos de 2000 y 2010 en cuanto a información disponible, en el 2000 es posible encontrar información económica más detallada que en el último censo; esto impide que el análisis sea más dinámico y se actualice por lo menos cada cinco años con los conteos y censos de población y vivienda.

La inexistencia o poca información referente a la inversión en infraestructura que puede ser incluida dentro del cálculo del RE es otra problemática que se enfrentó en la investigación; existe infraestructura que es financiada y administrada por medio de los municipios quienes se manejan de manera autónoma entre sí, por tanto la socialización de la información depende del criterio de los cabildos correspondientes quienes pueden o no publicar los informes de gobierno donde se especifica el monto invertido en infraestructura local como agua, pavimentación, drenaje, etc. Se torna necesaria una investigación más a detalle para incluir estos aspectos dentro del concepto de RE.

Existen otras tareas pendientes, que por falta de tiempo no han podido ser abordadas, entre ellas un análisis más profundo para determinar si la caracterización de la zona de estudio por medio del cálculo de los indicadores propuestos pudiera coadyuvar al estudio y evaluación de multiamenazas. Por medio de este análisis sería posible identificar de manera espacial aquellas zonas donde incide más de un proceso natural y por tanto brindarle un mayor valor e importancia en la aplicación de políticas tendientes a mitigar o trasladar el riesgo.

Asimismo sería importante analizar la forma en que la población ocupa y adapta los espacios con amenaza potencial; lo anterior, denominado inercia geográfica, muestran que la percepción del riesgo – por tanto su análisis y evaluación – varía en relación directa con la

carga de subjetividad involucrada que lleva a la adaptación y modificación del territorio (Palacio, 1995)

Con este tipo de análisis es posible identificar una de las tres diferentes maneras en como la comunidad se adapta al riesgo (Palacio, 1995): Ocupación persistente el área de riesgo, cohabitando con el daño causado por desastres previos o abandonando asentamientos y estructuras dañadas. Este análisis al ser integrado en futuros estudios permitirá comprender cómo la organización social puede modificar los efectos de las amenazas.

El estudio del riesgo, desde un punto de vista social tiene un largo camino por recorrer y debe solventar diversas problemáticas emanadas de la heterogeneidad en las metodologías, la carencia de información y las diferencias entre las investigaciones provenientes de las ciencias duras y las ciencias sociales; no obstante, valga decir que el cálculo de indicadores es posible y el análisis holístico de las características socioeconómicas es factible. Con base en ello se pueden identificar espacios en donde la intervención de las autoridades competentes es necesaria para aplicar políticas tendientes a lograr cualquiera de las siguientes etapas definidas por Wilches (1993):

1. **Prevención: Decirle “NO” al riesgo:** esto implica la reducción o eliminación de los fenómenos con potencial peligroso. Nada es posible hacer para eliminar los fenómenos naturales que se relacionan con la actividad del planeta; pero con aquellos originados por la actividad humana, la eliminación, control o reducción debe constituir la regla general.
2. **Mitigación: Decirle “NO” a la vulnerabilidad:** involucra la reducir en lo posible la incapacidad de una comunidad para absorber los efectos de un cambio en el ambiente. Esto se logra por medio de políticas sociales y económicas que hagan a la sociedad más flexible, autónoma, informada, con capacidad de decisión y organización.
3. **Preparación: Reducir los efectos negativos del desastre:** implica preparar a la población para reducir al máximo la duración de los periodos de emergencias posteriores a la incidencia de un fenómeno natural peligroso y como consecuencia acelerar el inicio de las etapas de rehabilitación y reconstrucción

Conclusiones

Con base en la presente investigación se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- El cálculo del índice de vulnerabilidad prevalente (IVP) y riesgo específico (RE) permitió caracterizar los espacios incluidos dentro de los alcances de procesos volcánicos relacionados con la erupción de 1913, de esta forma se calculó el índice de riesgo total (IRT) y se caracterizaron los espacios por medio del valor obtenido.
- Por medio de la metodología aplicada fueron señalados espacios no sólo por su proximidad a los alcances de procesos volcánicos sino por las características socioeconómicas que prevalecen en la zona.
- La división de la zona de estudio en unidades espaciales de referencia (UER) facilitó el análisis y la homogenización de datos estadísticos de población y vivienda que se encuentran disponibles en formatos espaciales diferentes.
- De las 1124 UER en las cuales se dividió la zona de estudio, 853 presentaron algún valor de vulnerabilidad prevalente y riesgo específico, estas UER constituyeron la base para realizar un análisis general de la zona que cuantificó un importe de RE de **\$30,058 millones de pesos** de los cuales \$24,893 corresponden a Colima y \$5,164 a Jalisco, ambas cantidades constituyen el 56% y 1% del PIB estatal de forma respectiva.
- 434 UER se identificaron dentro de los alcances de los flujos piroclásticos relacionados con la erupción de 1913; estas UER fueron la base para realizar el análisis de los espacios susceptibles a este tipo de amenaza. Dentro del análisis de cuantificó un importe de \$9,790 millones de pesos de los cuales \$7,522 corresponden a elementos ubicados en Colima y \$2,268 a Jalisco; ambos importes constituyen el 17% y 0.4% del PIB estatal de manera respectiva.
- 157 UER se identificaron dentro de los alcances de lahares; estas UER cuantificaron un importe total de \$2,340 millones de pesos de los cuales \$511 corresponden a elementos ubicados en Colima y \$1,829 a Jalisco; ambos importes constituyen el 1.1% y 0.3% del PIB estatal de manera respectiva.

- 116 UER se ubican dentro de los alcances de flujos piroclásticos y lahares, estas UER cuantificaron \$1,680 millones de pesos de los cuales \$ 355 corresponden a elementos ubicados en Colima y \$1,325 a Jalisco; ambos importes constituyen el 0.8% y 0.2% del PIB estatal de manera respectiva.
- Se ha presentado un incremento de población en la zona de estudio, de las 853 UER involucradas en el análisis general, la población para el año 2000 era de 50,399 para el 2010 ascendió a 67,800 lo cual representa un incremento del 34.5% total o 3% anual; este índice, junto con otros más se incluyó dentro del análisis del IVP por exposición física.
- En incremento poblacional es también evidente en los espacios ubicados dentro de los alcances de las amenazas analizadas; las UER ubicadas en estos sitios cuantificaron un aumento poblacional del 25%, pasaron de 13,345 habitantes en 2000 a 16,675 en 2010 que significa una tasa porcentual del 2% anual.
- Se presentaron diferencias con respecto a la ubicación espacial de las UER con mayor valor en los índices, no obstante, las características de los asentamientos involucrados eran similares: el mayor valor de IVP corresponde a localidades de carácter rural y el mayor RE a localidades con características urbanas.
- La mayor vulnerabilidad se identificó en las localidades de Tlajomulco, Rancho Santa Rosa, La Mariana, La Estancia y las Galeanas pertenecientes al municipio de Zapotitlan de Vadillo (UER 872, 894, 850) así como en la parte norte del asentamiento de San Marcos y población La Caseta, pertenecientes al municipio de Tonilá, Jalisco (UER 771); también se identificaron los asentamientos de Diego Fuentes (El Limoncito) y El Jaboncillo del municipio de Villa de Álvarez (UER 201) y La Yerbabuena perteneciente al municipio de Comala, Colima (UER 895). Estos asentamientos corresponden a zonas rurales donde la pobreza y marginación constituyen los principales pilares de la vulnerabilidad.
- Las localidades con mayor RE se localizan en los asentamientos urbanos de Quisería, Cuauhtemos, Colima, y Tonilá, Jalisco; el importe elevado responde a la mayor cantidad de infraestructura vial, eléctrica y de servicios que caracteriza a los asentamientos urbanos

- El IRT más elevado se localizó en los asentamientos urbanos de Quesería perteneciente al municipio de Cuauhtemoc, Colima, Tonilá y San Marcos, pertenecientes al municipio de Tonilá, Jalisco. Estos asentamientos además de contar con mayor infraestructura se encuentran localizados dentro de los alcances de los procesos volcánicos provenientes de la erupción de 1913.
- Se torna pertinente analizar si la metodología propuesta en la presente investigación pudiera ser aplicada en la evaluación de multiamenazas, ya que la vulnerabilidad y riesgo específico fueron calculados de manera independiente a los alcances de fenómenos naturales analizados; esto permitiría aplicar dentro de la zona de estudio los modelados de diversos fenómenos peligrosos e identificar los espacios en los cuales inciden más de un proceso, de esta forma es posible señalar aquellos espacios que presentan mayor exposición a las amenazas y que además cuentan con valores de IVP y RE que pueden exacerbar el efecto de los procesos naturales.

Es importante ampliar las investigaciones hacia el campo de la inercia geográfica, ya que esta permite comprender que la percepción del riesgo, y por tanto su análisis y evaluación, varía de forma directa con la subjetividad involucrada; esta subjetividad queda en evidencia por medio de las ocupación y uso que la sociedad hace de los espacios peligrosos y cómo ésta se adapta al riesgo.

Referencias

- ABDURACHMAN, E. K., BOURDIER, J. L. & VOIGHT, B. (2000) Nuées ardentes of 22 November 1994 at Merapi volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 345-361.
- ALBALA BERTRAND, J. M. (1993) Natural Disaster Situations and Growth: A Macroeconomic Model for Sudden Disasters Impacts. *World Development*, 21, 1417-1434.
- ARNAND, S. & SEN, A. (1997) Concepts of Human Development Poverty: A Multidimensional Perspective. En 1997, U. H. D. R. (Ed.) *Papers: Poverty and Human Development*. New York, HDI-1 HDI-2.
- BARBAT, A. (2003) *Vulnerability and Disaster Risk Indices from Engineering Perspective and Holistic Approach to Consider Hard and Soft Variables at Urban Level*, Manizales, Universidad Nacional de Colombia.
- BLONG, R. (2003) A new damage index. *Natural Hazards*, 30, 1-23.
- BOVIS, M. J. & JAKOB, M. (1999) The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 1039-1054.
- BRANNEY, M. J. & KOKELAAR, P. (1992) A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to non-particulate flow during emplacement of high-grade ignimbrite. *Bulletin of Volcanology*, 54, 504-520.
- BRETÓN GONZÁLEZ, M., RAMÍREZ, J. J. & NAVARRO OCHOA, C. (2002) Summary of the historical eruptive activity of Volcán de Colima, México 1519-2000. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117, 21-46.
- CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN (2008) Ley general de la infraestructura física educativa. En GENERAL, S. (Ed.). México, Secretaría de Servicios Parlamentarios.
- CAPRA, L., BORSELLI, L., VARLEY, N. R., GAVILANES RUÍZ, J. C., NORINI, G., SAROCCHI, D., CABALLERO, L. & CORTÉS CORTÉS, A. (2010) Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima, Mexico: Surface hydro-repellency as initiation process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 105-117.
- CARDONA ARBOLEDA, O. D. (1993) Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. En MASKREY, A. (Ed.) *Los desastres no son naturales*. La Red de estudios sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- CARDONA ARBOLEDA, O. D. (2001) Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos. *Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos*. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.
- CARDONA ARBOLEDA, O. D. (2005) *Sistema de indicadores para la gestión del riesgo de desastre*, Manizales, Col, Universidad Nacional de Colombia.

- CARN, S. A., WATTS, R. B., THOMPSON, G. & NORTON, G. (2004) Anatomy of a lava dome collapse: the 20 march 2000 event at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 131, 241-264.
- CAS, R. A. F. & WRIGHT, J. V. (1987) *Volcanic successions. Modern and ancient*, Londres, Allen & Unwin.
- CASTAÑEDA CAMACHO, X. (2009) Determinación de áreas naturales prioritarias de conservación con potencial turístico en el estado de San Luis Potosí: una propuesta de sustentabilidad. *Coordinación de Ciencias Sociales y Humanidades*. San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- CFE (2007) Informe Anual 2006. México, Secretaría de Energía.
- CFE (2008) Informe Anual 2007. México, Secretaría de Energía.
- CFE (2009) Informe Anual 2008. México, Secretaría de Energía.
- CFE (2010) Informe Anual 2009. México, Secretaría de Energía.
- CFE (2011) Informe Anual 2010. México, Secretaría de Energía.
- COLE, P., CALDER, E. S., SPARKS, R. S. J., CLARKE, A. B., DRUITT, T. H., YOUNG, S. R., HERD, R. A., HARFORD, C. & NORTON, G. (2002) Deposits from dome-collapse and countain-collapse pyroclastic flow at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. En DRUITT T.H. & KOKELAAR, B. P. (Ed.) *The eruption of Soufriere Hills Volcano*. London, Geological Society.
- CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN (2006) Grado de marginación a nivel localidad, 2000. México, CONAPO.
- COSTA, J. E. (1988) Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hiperconcentrated flows and debris flows. En BAKER, V. R., KOCHER, R.C., PATTON, P.C. (Ed.) *Flood Geomorphology*. New York, Wiley.
- CRONIN, S. J., LECOINTRE, J. A., PALMER, A. S. & NEALL, V. E. (2000) Transformation, internal stratification, and depositional processes within a channelised, multi-peaked lahar flow,. *Journal of geology and geophysics*, 43, 117-128.
- CRONIN, S. J., NEALL, V. E., LECOINTRE, J. A. & PALMER, A. S. (1999) Dynamic interactions between lahars and stream flow: A case study from Ruapehu volcano, New Zeland. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 28-38.
- CHESTER, D. K. & DUNCAN, A. M. (2007) Geomythology, theodicy, and the continuing relevance of religious worldviews on responses to volcanic eruption. En JOHN GRATTAN Y ROBIN TORRENCE (Ed.) *Living under the shadow. Cultural impacts of volcanic eruptions*. Walnut Creek, California, Left coast press.
- DAVILA, N., CAPRA, L., GAVILANES RUÍZ, J. C., VARLEY, N. R., NORINI, G. & GÓMEZ VÁZQUEZ, A. (2007) Recent lahars at Volcán de Colima (Mexico): Drainage variation and spectral classification. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 165, 127-141.
- DE LA CRUZ REYNA, S. (2008) Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatépetl Volcano, Mexico: Importance of an effective hazards-warning system. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 170, 121 - 134.

- DE RISO, R., BURETTA, P., CALCATERRA, D. & SANTO, A. (1999) Le colate rapide in terreni piroclastici del territorio campano. *Proceeding Previsione e Prevenzione di Movimenti Fransi Rapidi Trento. 17-19 Giugno 1999*, 133-150.
- DEMANT, A. & ROBIN, C. (1975) Fases del vulcanismo en México; una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico. *Revista Instituto Geología UNAM*, 1, 66-79.
- FERRARI, L. (2000) Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 84-92.
- FISHER, R. V. & HEIKEN, G. (1982) Mt. Pelée, Martinique: May 8 and 20, pyroclastic flows and surge. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 13, 339-371.
- FOLCH, R. (2011) Estrategias para el análisis y planificación del territorio: la complejidad de la conectividad. *Fedenatur*. Barcelona, Fedenatur, Federación europea de espacios naturales y rurales metropolitanos y periurbanos,.
- FRANCIS, P. (1995) *Volcanoes a planetary perspective*, Hong Kong, Clarendon Press.
- FRANCIS, P. & OPPENHEIMER, C. (2004) *Volcanoes*, New York, Oxford University Press.
- FUJII, T. & NAKADA, S. (1999) The 15 september 1991 pyroclastic flows at Unzen Volcano (Japan): a flow model for associated ash-cloud surge. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 89, 159-172.
- GABET, E. J. & DUNNE, T. (2002) Landslide on coastal sage-scrub and grassland hillslopes in a severe El Niño winter: the effects on conversion on sediment delivery. *Geological Society of America Bulletin*, 114, 983-990.
- GARCÍA DE MIRANDA, E. (1987) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*, México, D.F., UNAM, Instituto de Geografía.
- GARCÍA DE MIRANDA, E. & COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD (CONABIO) (1998) *Climas (Clasificación de Köppen modificado por García)*. Escala 1:1000000. México.
- GARDUÑO MONROY, V. H., SAUCEDO GIRÓN, R., JIMÉNEZ, Z., GAVILANES RUÍZ, J. C., CORTÉS CORTÉS, A. & URIBE CIFUENTES, R. M. (1998) Falla Tamazula, límite suroriental del Bloque de Jalisco, y sus relaciones con el Complejo Volcánico de Colima, México. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, 15, 132-144.
- GARZA, G. (2002) Evolución de las ciudades mexicanas en el siglo XX. *Revista de información y análisis*. México, INEGI.
- GAVILANES RUÍZ, J. C. (2004) Simulación de escenarios eruptivos del volcán de Colima y aportaciones al plan de contingencias del Estado de Colima. *Facultad de Filosofía y Letras, Instituto de Geografía, Programa de Posgrado en Geografía*. México, D.F, Universidad Nacional Autónoma de México.
- GOBIERNO DEL ESTADO DE COLIMA (2012) *Caracterización ambiental*. Colima, Secretaría de Desarrollo Urbano.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (2002a) *DECRETO 268: Ley de Hacienda para el Municipio de Villa de Alvarez*. En H. CONGRESO

- CONSTITUCIONAL DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (Ed). Colima, Periódico oficial del Estado Libre y Soberano de Colima,.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (2002b) DECRETO 269: Ley de Hacienda para el Municipio de Colima. En H. CONGRESO CONSTITUCIONAL DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (Ed). Colima, Periódico oficial del Estado Libre y Soberano de Colima,.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (2002c) DECRETO 272: Ley de Hacienda para el Municipio de Comala. En H. CONGRESO CONSTITUCIONAL DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (Ed). Colima, Periódico oficial del Estado Libre y Soberano de Colima,.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (2002d) DECRETO 273: Ley de Hacienda para el Municipio de Cuauhtemoc. En H. CONGRESO CONSTITUCIONAL DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (Ed). Colima, Periódico oficial del Estado Libre y Soberano de Colima,.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE COLIMA (2010) Predios Urbanos y Rústicos del Estado. En DIRECCIÓN DE CATASTRO DEL ESTADO DE LA SECRETARÍA DE FINANZAS Y ADMINISTRACIÓN DEL GOBIERNO DEL ESTADO (Ed.). Colima.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE JALISCO (2011a) Tablas de valores unitarios de suelo y construcción del municipio de Tolimán para el ejercicio fiscal 2012. En DIRECCIÓN DE CATASTRO DEL ESTADO DE LA SECRETARÍA DE FINANZAS Y ADMINISTRACIÓN DEL GOBIERNO DEL ESTADO (Ed.). Jalisco.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE JALISCO (2011b) Tablas de valores unitarios de suelo y construcción del municipio de Tonilá para el ejercicio fiscal 2012. En DIRECCIÓN DE CATASTRO DEL ESTADO DE LA SECRETARÍA DE FINANZAS Y ADMINISTRACIÓN DEL GOBIERNO DEL ESTADO (Ed.). Jalisco.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE JALISCO (2011c) Tablas de valores unitarios de suelo y construcción del municipio de Tuxpan para el ejercicio fiscal 2012. En DIRECCIÓN DE CATASTRO DEL ESTADO DE LA SECRETARÍA DE FINANZAS Y ADMINISTRACIÓN DEL GOBIERNO DEL ESTADO (Ed.). Jalisco.
- GOBIERNO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE JALISCO (2011d) Tablas de valores unitarios de suelo y construcción del municipio de Zapotitlán de Vadillo para el ejercicio fiscal 2012. En DIRECCIÓN DE CATASTRO DEL ESTADO DE LA SECRETARÍA DE FINANZAS Y ADMINISTRACIÓN DEL GOBIERNO DEL ESTADO (Ed.). Jalisco.
- GÓMEZ TUENA, A., OROZCO ESQUIVEL, M. T. & FERRARI, L. (2005) Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII, Volúmen conmemorativo del centenario. Temas selectos de la Geología Mexicana, 227-283.

- GONZALEZ AMADOR, R. (2009) México destina sólo el 0.4% del PIB a la investigación científica. *La Jornada*. México.
- GRATTAN, J. & TORRENCE, R. (2007) Beyond gloom and doom: The long-term consequences of volcanic disasters. En JOHN GRATTAN Y ROBIN TORRENCE (Ed.) *Living under the shadow. Cultural impacts of volcanic eruptions*. Walnut Creek, California, Left coast press.
- HANSEN, R. (1993) *Política del Desarrollo Mexicano*, México, Siglo XXI.
- HIDALGO, R., BORSODORF, A. & SÁNCHEZ, R. (2007) Hacia un nuevo tejido rural. Los megaproyectos de ciudades valladas en la periferia de Santiago de Chile. *Ciudad y Territorio*, XXXIX, 115 - 138.
- HOLLAND, E. P., AERGERTER, J. N., C., D. G. & SMITH (2007) Landscape as a model: the importance of geometry. *PLoS Computational Biology*, 3.
- HUNGR, O. (2005) Classification and terminology. En JAKOB M, H. O. (Ed.) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Praxis, Springer Berlin Heidelberg.
- INEGI (2000) Censo general de población y vivienda. En ESTADÍSTICA (Ed.) *Consulta interactiva de datos*. México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática,.
- INEGI (2005a) Marco geoestadístico municipal (MGM2005). En GEOESTADÍSTICO, M. (Ed.). México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática,.
- INEGI (2005b) Producto interno bruto por entidad federativa. Metodología. En NACIONALES, S. D. C. (Ed.) *Sistema de Cuentas Nacionales*. México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática,.
- INEGI (2009) Censos y Conteos. En ESTADÍSTICA (Ed.) *Consulta interactiva de datos*. México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática,.
- INEGI (2010a) Censo general de población y vivienda. En ESTADÍSTICA (Ed.) *Consulta interactiva de datos*. México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática,.
- INEGI (2010b) Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). México, INEGI.
- INEGI (2010c) Población. En ESTADÍSTICA (Ed.) *Cuéntame*. México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática,.
- INEGI (2011) Mapa de climas del estado de Colima. En INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (Ed.) *Mapas de clima*. México, INEGI.
- ITOH, H., TAKAHAMA, J., TAKAHASHI, M. & MIYAMOTO, K. (2000) Hazard estimation of the possible pyroclastic flow disasters using numerical simulation related to the 1994 activity at Merapi Volcano. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 100, 503-516.
- IVERSON, R. M. (1997) The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35, 245-296.
- KELFOUN, K., LEGROS, F. & GOURGAUD, A. (2000) A statistical study of tree damage by the 22 november 1994 eruption of Merapi volcano (Java, Indonesia): relationships between ash-cloud surges and block-and-ash flow. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 100, 379-393.

- KOMOROWSKI, J. C., NAVARRO OCHOA, C., CORTÉS, A., SAUCEDO, R., GAVILANES RUÍZ, J. C., SIEBE, C., ESPÍNDOLA, J. M. & RODRÍGUEZ, S. (1997) IAVCEI General Assembly. Puerto Vallarta, México January 19-24, 1997. Field Guide Pre-conference excursion 3. *The Colima Volcanic Complex*. Puerto Vallarta.
- KURDIN, R. D. (1973) Classification of mudflows. *Soviet Hydrology* 4, 310-316.
- LAJOIE, J., BOUDON, G. & BOURDIER, J. L. (1989) Depositional mechanics of the 1902 pyroclastic nuee-ardente deposits of Mt. Peleé, Martinique. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 38, 131-142.
- LAVELL THOMAS, A., BRENES, A., ROMANO, L., SOMARRIBA, H., GAMARRA, L. & ARMIEN, F. (2003) La gestión local del riesgo. Nociones y precisiones en torno al concepto de la práctica. En CEPREDENAC & PNUD (Eds.). Guatemala, Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Buró para la Prevención de Crisis y Recuperación.
- LE MAITRE, R. W. (2002) *Igneous rocks. A classification and glossary of terms*, United Kingdom, University Press, Cambridge.
- LÓPEZ VELÁZQUEZ, E. (2009) Risk perception and coping strategies for risk from Popocatepetl Volcano, Mexico. *Geofísica Internacional, UNAM*, 48, 133-147.
- LÓPEZ VELÁZQUEZ, E., MARVÁN MARÍA, L., FLORES ESPINO, F. & PEYREFITTE, A. (2008) Volcanic Risk Exposure, Feelings of Insecurity, Stress, and Coping Strategies in México. *Journal of Applied Social Psychology*, 38, 2885-2902.
- LUHR, J. (2002) Petrology and geochemistry of 1991 and 1998-1999 lava flows from Volcán de Colima, México: implications for the end of the current eruptive cycle. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 117, 169-194.
- LUHR, J. & CARMICHAEL, I. (1980) The Colima Volcanic Complex, Mexico. I. Post-Caldera Andesites from Volcán Colima. *Contributions to mineralogy and petrology*, 71, 343-372.
- LUHR, J. & CARMICHAEL, I. (1982) The Colima Volcanic Complex, Mexico. III. Ash- and scoria fall deposits from the upper slopes of Volcán Colima. *Contributions to mineralogy and petrology*, 80, 262-275.
- LUHR, J. & CARMICHAEL, I. (1990) Petrological monitoring of cyclical eruptive activity at Volcán Colima, México. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 42, 235-260.
- LUHR, J., NELSON, S., ALLAN, J. & CARMICHAEL, I. (1985) Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology*, 13, 54-57.
- MACÍAS, J. L. (2005) Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII, 379-424.
- MACÍAS, J. L., CAPRA, L., ARCE, J. L., ESPÍNDOLA, J. M., GARCÍA PALOMO, A. & SHERIDAN, M. F. (2008) Hazard map of El Chichón volcano, Chiapas, México: Constraints posed by eruptive history and computer simulations. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 175, 444-458.

- MARCIAL, U. (1996) Popocatepetl. Vivir en riesgo. *Ciencias*, 41, 50-55.
- MARTIN DEL POZZO, A. L., GONZÁLEZ MORÁN, T., ESPINASA PEREÑA, R., BUTRON, M. A. & REYES, M. (2008) Characterization of the recent ash emissions at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 170, 61-75.
- MARTÍN DEL POZZO, A. L., ROMERO, V. H. & RUIZ KITCHER, R. E. (1987) Flujos piroclásticos del Volcan de Colima, México. *Geofísica Internacional, UNAM*, 26, 291-307.
- MASKREY, A. (1998) El Riesgo. En LA RED DE ESTUDIOS SOCIALES EN PREVENCIÓN DE DESASTRES EN AMÉRICA LATINA (Ed.) *Navegando entre brumas*. 1a 1998 ed. Bogotá, Colombia, La Red.
- MEDINA URRUTIA, V. M. & ROBLES GONZÁLEZ, M. (2010) Manejo de plantaciones de limón mexicano. Tecomán, Col.
- MELLORS, D. A., WAITT, R. & SWANSON, D. A. (1988) Generation of pyroclastic flows and surges by hot-rock avalanches from dome of Mount St. Helens volcano, USA. *Bull Volcanol*, 50, 14-25.
- MIRÓ, R. (2007) La trama hexagonal. *Escuela de humanidades, Universidad Nacional de General San Martín*, 3, 57 - 61.
- MOOSER, F. & RAMÍREZ, T. (1987) Faja Volcánica Transmexicana, Morfoestructura, Tectónica y Vulcanotectónica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 48, 75-80.
- MUÑOZ SALINAS, E., CASTILLO RODRIGUEZ, M., MANEA, V., MENEÁ, M. & PALACIOS, D. (2010) On the geochronological method versus flow simulation software application for lahar risk mapping: A case study of Popocatepetl volcano, Mexico. *Geografiska annaler series A-Physical geography*, 92A, 311-328.
- NAKADA, S. & FUJII, T. (1993) Preliminary report on the activity at Unzen Volcano (Japan), November 1990 - November 1991: Dacite lava domes and pyroclastic flows. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 54, 319-333.
- PALACIO APONTE, A. G. (1995) Ensayo metodológico geosistémico para el estudio de los riesgos naturales. *Posgrado de la Facultad de Filosofía y Letras*. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México.
- PALACIO PRIETO, J. L., SÁNCHEZ SALAZAR, M. T., CASADO IZQUIERDO, J. M., PROPIN FREJOMIL, E., DELGADO CAMPOS, J., VELÁZQUEZ MONTES, A., CHIAS BECERRIL, L., ORTIZ ÁLVAREZ, M. I., GONZÁLEZ SÁNCHEZ, J., NEGRETE FERNÁNDEZ, G., GABRIEL MORALES, J. & MÁRQUEZ HUITZIL, R. (2004) *Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial*, México, Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- PERFIT, M. R. & DAVISON, J. P. (2000) Plate tectonics and volcanism. En SIGURDSSON, H. (Ed.) *Encyclopedia of Volcanoes*. San Diego, CA, Academic Press.
- PIERSON, T. C. (1986) Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. En ABRAHAMS, A. D. (Ed.) *Hillslope processes* Boston, Allen & Unwin.
- PIERSON, T. C. & COSTA, J. E. (1987) A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. En J. COSTA & G.E. WIECZOREK (Ed.) *Debris flows/Avalanches: Process*,

Recognition, and mitigation. Reviews in engineering geology. Boulder, CO, Geological Society of America.

- PIERSON, T. C. & SCOTT, K. M. (1985) Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flows to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research*, 21, 1511-1524.
- PIERSON, T. C. & SCOTT, K. M. (1998) Surficial hydrologic hazards at volcanoes. *U.S.G.S Open file report*. Vancouver, Washington, U.S. Geological Survey.
- PROPIN FREJOMIL, E. & SÁNCHEZ CRISPÍN, A. (1998) Niveles de asimilación económica del estado de Guerrero. *Investigaciones geográficas*, 37, 59-70.
- PROPIN FREJOMIL, E., SÁNCHEZ CRISPÍN, A. & REYEZ PÉREZ, O. (1999) Niveles de asimilación económica del estado de Coahuila al término del siglo XX. *Investigaciones geográficas*, 39, 159-167.
- RIDING, A. (2004) *Vecinos distantes: un retrato de los mexicanos*, México, Joaquín Mortiz.
- RITCHIE, L. J., COLE, P. & SPARKS, R. S. J. (2002) Sedimentology of deposits from the pyroclastic density current of 26 December 1997 at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. En DRUITT T.H. & KOKELAAR, B. P. (Ed.) *The eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999*. London, Geological Society.
- ROBIN, C., CAMUS, G. & GOURGAUD, A. (1991) Eruptive and magmatic cycles at Fuego de Colima volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 45, 209-225.
- ROBIN, C., MOSSAND, P., CAMUS, G., CANTAGREL, J.-M., GOURGAUD, A. & VINCENT, P. M. (1987) Eruptive history of the Colima Volcanic Complex (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, 99-113.
- RODRÍGUEZ ELIZARRARÁS, S. R. (1995) Estratigrafía y estructura del volcán de Colima, México. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas, UNAM*, 12, 22-46.
- RODRÍGUEZ SEDANO, L. A. (2010) Estudio de los depósitos de lahar sucesivos a la gran erupción de 1913 en la barranca La Lumbre del Volcán de Colima, México. *Facultad de Ingeniería, Instituto de Geología*. San Luis Potosí, S.L.P., Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- ROMERO, G. & MASKREY, A. (1993) Como entender los desastres naturales. En MASKREY, A. (Ed.) *Los desastres no son naturales*. La Red de estudios sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- ROSE, W., PEARSON, T. & BONIS, S. (1977) Nuée ardente eruption from the foot of a dacite lava flow, Santiaguito volcano, Guatemala. *Bull Volcanol*, 40, 23-38.
- ROSSOTTI, A., FERRARI, L., LÓPEZ MARTÍNEZ, M. & ROSAS ELGUERA, J. (2002) Geology of the boundary between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt in the Guadalajara region, western Mexico. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, 19, 1-15.
- RUÍZ MARTÍNEZ, V. C. (2003) Estudio paleomagnético del Cinturón Volcánico Transmexicano: Implicaciones tectónicas. *Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I*. Madrid, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas,

- SAGARPA (2009) Producción agrícola. Cíclicos y Perennes 2009. Riego y Temporal. Limon. *Annual*. SAGARPA.
- SANAHUJA RODRÍGUEZ, H. E. (1999) El daño y la evaluación del riesgo en América Central. Una propuesta metodológica tomando como caso de estudio a Costa Rica. *Geografía*. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, La Red de estudios sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- SAROCCHI, D. (2006) Análisis textural del depósito de flujo de bloques y cenizas del 17 de julio de 1999 en el Volcán de Colima. *Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica*. México, Universidad Autónoma de México.
- SATO, H., FUJII, T. & NAKADA, S. (1992) Crumbling of dacite dome lava and generation of pyroclastic. *Nature*, 360, 664-666.
- SAUCEDO GIRÓN, R. (1997) Reconstrucción de la erupción de 1913. *Unidad Académica de Ciclos Profesionales y de Posgrado del CCH, Posgrado en Ciencias de la Tierra*. México, D.F, Universidad Nacional Autónoma de México.
- SAUCEDO GIRÓN, R., MACÍAS, J. L., GAVILANES RUÍZ, J. C., ARCE, J. L., KOMOROWSKI, J. C., GARDNER, J. E. & VALDEZ MORENO, G. (2010) Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 191, 149-166.
- SAUCEDO GIRÓN, R., MACÍAS, J. L., SAROCCHI, D., BURSIK, M. I. & RUPP, B. (2008) The rain-triggered Atenuique volcaniclastic debris flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, Mexico. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 173, 69-83.
- SAUCEDO GIRÓN, R., MACÍAS, J. L., SHERIDAN, M. F., BURSIK, M. I. & KOMOROWSKI, J. C. (2005) Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico: implications for hazard assessment. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 139, 103-115.
- SCT (2003) Anuario estadístico 2002. En DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN (Ed.). México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT (2004) Anuario estadístico 2003. En DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN (Ed.). México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT (2005) Anuario estadístico 2004. En DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN (Ed.). México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT (2006) Anuario estadístico 2005. En DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN (Ed.). México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT (2007) Anuario estadístico 2006. En DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN (Ed.). México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT (2008) Anuario estadístico 2007. En DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN (Ed.). México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT (2009) Anuario estadístico 2008. En DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN (Ed.). México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT (2010) Anuario estadístico 2009. En DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN (Ed.). México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

- SCHMINCKE, H. U. (2004) *Volcanism*, Stürtz AG, Würzburg Springer.
- SCHWARZKOPF, L. M., SCHMINCKE, H. U. & CRONIN, S. J. (2004) A conceptual model for block-and-ash flow basal avalanche transport and deposition, based on deposit architecture of 1998 and 1994 Merapi flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136, 117-134.
- SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO (2010) Cuenta de Hacienda Pública Federal. En SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO (Ed.). México, Información institucional del Gobierno Federal.
- SEDESOL, CONAPO & INEGI (2005) Delimitación de las zonas metropolitanas de México. 2008 ed. México.
- SEMARNAT & CNA (2002) Compendio básico del agua en México 2002. En CNA (Ed.). México, CNA.
- SHERIDAN, M. F. (1980) Pyroclastic block flow from the September, 1976, Eruption of La Fougère Volcano, Guadeloupe. *Bull Volcanol*, 43, 397-402.
- SIAP (2010) Servicio de información agroalimentaria y pesquera. SAGARPA.
- SMITH, A. L. & ROOBOL, M. J. (1990) *Mt. Pelée, Martinique*, Boulder, Colorado, GSA Books Science.
- SMITH, G. A. & FRITZ, W. J. (1989) Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology*, 17, 375-376.
- SPARKS, R. S. J. (1976) Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. *Sedimentology*, 23, 88 - 147.
- SPARKS, R. S. J., SELF, S. & WALKER, G. P. L. (1973) Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1, 115-118.
- SULPIZIO, R., CAPRA, L., SAROCCHI, D., SAUCEDO GIRÓN, R., GAVILANES RUÍZ, J. C. & VARLEY, N. R. (2010) Predicting the block-and-ash flow inundation areas at Volcán de Colima (Colima, Mexico) based on the present day (February 2010) status. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193, 49-66.
- TAKAHASHI, T. & TSUJIMOTO, H. (2000) A mechanical model for Merapi-type pyroclastic flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 98, 91-115.
- TARAN, Y., GAVILANES RUÍZ, J. C., CORTÉS, A. & ARMIENTA, M. A. (2000) Chemical precursors to the 1998-1999 eruption of Colima Volcano, Mexico. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas, UNAM*, 17, 111-124.
- TARBUCK, E. J. & LUTGENS, F. K. (2005) *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física*, Madrid, Prentice Hall.
- TOBIN, G. A., WHITEFORD, L. M., JONES, E. C., MURPHY, A. D., GARREN, S. J. & PADROS, C. V. (2010) The role of individual well-being in risk perception and evacuation for chronic vs. acute natural hazards in Mexico. *Applied Geography*, 31, 700-711.
- TORRENCE, R. & DOELMAN, T. (2007) Chaos and selection in catastrophic environments: Willaumez Peninsula, Papua New Guinea. En JOHN GRATTAN Y ROBIN

- TORRENCE (Ed.) *Living under the shadow. Cultural impacts of volcanic eruptions*. Walnut Creek, California, Left coast press.
- VALLANCE, J. W. (2000) Lahars. En SIGURDSSON, H. (Ed.) *Encyclopedia of Volcanoes*. London, Academic Press.
- VALLANCE, J. W. (2005) Volcanic debris flows. En JAKOB M, H. O. (Ed.) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Praxis, Springer Berlin Heidelberg.
- VALLANCE, J. W. & SCOTT, K. M. (1997) The Osceola Mudflow from Mount Rainier: Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 143-163.
- VOIGHT, B. & DAVIS, M. J. (2000) Emplacement temperatures of the November 22, 1994 nuée ardente deposits, Merapi Volcano, Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 371-377.
- WILCHES CHAUX, G. (1993) La vulnerabilidad global. En MASKREY, A. (Ed.) *Los desastres no son naturales*. La Red de estudios sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- WILLIAMS, H. & MCBIRNEY, A. (1979) *Volcanology*, San Francisco, USA.
- YAMAMOTO, T., TAKARADA, S. & SUTO, S. (1993) Pyroclastic flows from the 1991 eruption of Unzen volcano, Japan. *Bull Volcanol*, 55, 166-175.