



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Riesgo y vulnerabilidad ante
escenarios eruptivos del Pico
de Orizaba**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Jessica Tolentino Godinez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Mariana Patricia Jácome Paz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado RIESGO Y VULNERABILIDAD ANTE ESCENARIOS ERUPTIVOS DEL PICO DE ORIZABA que presenté para obtener el título de INGENIERA GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

JESSICA TOLENTINO GODINEZ
Número de cuenta: 317290369

AGRADECIMIENTOS

Hace 9 años que ingresé al CCH Vallejo. Durante la ceremonia de apertura el director pronunció unas palabras que en aquel momento me parecieron una exageración: “Bienvenidos a su nueva casa”. Hoy 9 años después, comprendo el significado de sus palabras y a su vez la gran responsabilidad que implica pertenecer a esta institución.

La UNAM no solo fue mi escuela; fue el lugar donde me formé profesionalmente, donde aprendí, y descubrí nuevas pasiones. También fue el lugar donde encontré una nueva familia, y donde viví experiencias que han definido quién soy. Por ello, a mi alma máter le agradezco profundamente la persona que soy y el lugar en el que hoy me encuentro. Por siempre, gracias, UNAM.

A la Facultad de Ingeniería, donde encontré una de mis pasiones y donde tuve la oportunidad de nutrirla y fortalecerla con conocimientos. Al Instituto de Geofísica, por abrirme sus puertas, permitirme realizar mi servicio social y regalarme grandes experiencias y aventuras que contribuyeron en mi formación.

A la Doctora Jácome, quien, con paciencia y dedicación, me instruyó desde el primer día que la conocí. Gracias por darme la oportunidad de participar en sus proyectos, por guiarme, señalar mis errores y ayudarme a crecer. Gracias por confiar en mí y en mi trabajo y por brindarme palabras de aliento para seguir adelante.

Al ingeniero Juan Carlos Jiménez, por compartir conmigo gran parte de su conocimiento con pasión y dedicación. Al maestro Orestes, quien estuvo presente desde mis primeros pasos en la carrera, por confiar en mí y dedicarme un tiempo invaluable durante el desarrollo de este trabajo. A la Doctora Lizeth Caballero, por el esmero y dedicación con los que me ayudó a pulir este trabajo. Y al Doctor Rafael Torres, por su tiempo, sus aportaciones y por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto.

A todos ustedes, gracias por sus enseñanzas, su tiempo y sus generosas aportaciones. Cada una de ellas forma parte de este trabajo y, sin duda, también de mi formación.

A mis padres, Carmen y Clemente, por su apoyo incondicional, por las noches de desvelo mientras esperaban mi regreso, por sus cuidados y por todas las bendiciones que me acompañaron en cada salida a campo. Este trabajo también es suyo, porque me dieron las herramientas, la confianza y la fuerza necesarias para alcanzar esta gran meta. Gracias por estar siempre.

A mis hermanos, Irma y Gabriel, quienes estuvieron a mi lado en cada etapa, me hicieron reír incluso en los días difíciles y fueron mis cómplices en tantas aventuras y travesuras. Gracias por acompañarme durante todo este camino y por hacer que fuera mucho más divertido.

“El lugar donde piensen en ti, es al que debes llamar hogar”- Jiraiya

Y a mis amigos: Lizzy, Bernardo, Santi, Gus, Enrique, Vianney, Julio, Yamileet, Ximena, Miguel y tantos otros que tuve la fortuna de conocer a lo largo de estos años. Gracias por tantos momentos, tantas sonrisas, experiencias y anécdotas que construimos juntos. Gracias por estar, por acompañarme y por hacer de esta etapa una historia que recordaré siempre.

“Se que necesito a mis amigos si quiero ganar” – Monkey D. Luffy

La vida es como un lápiz: algún día acabará, pero será nuestra historia la que permanezca escrita. Por eso, que cada cicatriz recuerde lo que superamos y cada paso lo que avanzamos y que, incluso en la oscuridad, sigamos escribiendo; siendo siempre más fuertes que ayer, que hace medio día, incluso que hace media hora.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	10
Capítulo 1. Introducción	12
Antecedentes	12
Planteamiento del problema	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Particulares	15
Hipótesis.....	15
Justificación	16
Capítulo 2. Marco Teórico	17
Volcanismo y gases volcánicos	17
Procesos eruptivos.....	17
Tipos de actividad volcánica	18
Actividad efusiva.....	18
Actividad Explosiva	19
Tipos de volcanes.....	19
Estilos Eruptivos	21
Peligros volcánicos.....	23
Riesgo Volcánico	26
Evaluación del Riesgo	27
Vulnerabilidad	28
Vulnerabilidad física	29
Vulnerabilidad social.....	29
Capítulo 3. Área de estudio	31
Historia Eruptiva.....	32
Actividad Reciente	35
Estudios previos.....	37

Capítulo 4. Metodología	40
Recopilación de información.....	41
Repositorio de datos	41
Obtención de los componentes del Riesgo.....	42
Exposición.....	42
Estimación de vulnerabilidad Social	46
Caracterización de peligro volcánico.....	48
Clasificación de niveles de peligro	51
Determinación del Riesgo volcánico	53
Generación de cartografía especializada.....	54
Capítulo 5. Resultados.....	59
Mapeo de la exposición.....	60
Vulnerabilidad Social	66
Zonificación de peligros volcánicos	68
Interpolaciones	72
Niveles de peligro	74
Estimación del riesgo.....	78
Capítulo 6. Discusión	82
Capítulo 7. Conclusiones	84
Referencias	86
Anexos 1	90

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Mapa de ubicación del Pico de Orizaba</i>	32
<i>Figura 2. Mapa geológico y mapa estructural del volcán Pico de Orizaba</i>	34
<i>Figura 3. Mapa de peligros del volcán Pico de Orizaba</i>	37
<i>Figura 4. Esquema de metodología</i>	40
<i>Figura 5. Mapa de distribución de depósitos de caída y de corrientes de densidad piroclástica del Citlaltépetl Inferior (LC)</i>	43
<i>Figura 6. Diagrama de ejes de las elipses</i>	50
<i>Figura 7. Gráfica de pastel de distribución poblacional</i>	59
<i>Figura 8. Gráfica de barras de localidades con mayor concentración poblacional</i>	60
<i>Figura 9. Mapa de zonificación de las localidades expuestas</i>	61
<i>Figura 10. Distribución espacial de las localidades expuestas</i>	62
<i>Figura 11. Distribución espacial de las localidades con mayor concentración poblacional</i>	63
<i>Figura 12. Mapa de infraestructura crítica</i>	64
<i>Figura 13. Mapa de infraestructuras hídrica</i>	65
<i>Figura 14 (Parte I). Vulnerabilidad social</i>	61
<i>Figura 15. Mapa de vulnerabilidad total</i>	67
<i>Figura 16. Mapa de isopacas. Primer evento eruptivo</i>	68
<i>Figura 17. Mapa de isopacas. Segundo evento eruptivo</i>	69
<i>Figura 18. Mapa de isopacas. Tercer evento eruptivo</i>	70
<i>Figura 19. Mapa de isopacas de mayor extensión</i>	71
<i>Figura 20. Mapa de peligro y vulnerabilidad total para el escenario UC2</i>	75
<i>Figura 21. Mapa de peligro y vulnerabilidad total para el escenario UC4</i>	76
<i>Figura 22. Mapa de peligro y vulnerabilidad total para el escenario UC6</i>	77
<i>Figura 23. Mapa de riesgo para el escenario eruptivo UC2</i>	79
<i>Figura 24. Mapa de riesgo para el escenario eruptivo UC4</i>	80
<i>Figura 25. Mapa de riesgo para el escenario eruptivo UC6</i>	81
<i>Figura 26. Mapa de localidades completas</i>	83

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Ejemplo de matriz de riesgo.</i>	28
<i>Tabla 2. Distancias mínimas y máximas de los mapas de isopacas e isopletras.</i>	44
<i>Tabla 3. Distribución de los datos descargados del SCINCE 2020.</i>	46
<i>Tabla 4. Descripción de los eventos eruptivos principales.</i>	48
<i>Tabla 5. Principales impactos de depósitos de ceniza.</i>	52
<i>Tabla 6. Matriz de riesgo (Peligro vs Vulnerabilidad).</i>	54
<i>Tabla 7. Umbrales para la clasificación del riesgo volcánico.</i>	54
<i>Tabla 8. Resultados del procesamiento de datos en RStudio.</i>	59
<i>Tabla 9. Rangos de clasificación de vulnerabilidad social.</i>	66
<i>Tabla 10. Rangos de clasificación de vulnerabilidad social total.</i>	66
<i>Tabla 11. Valores de área, downwind y crosswind.</i>	72
<i>Tabla 12. Gráficas y ecuaciones exponenciales de las isopacas.</i>	73
<i>Tabla 13. Parámetros geométricos estimados para las isopacas.</i>	74
<i>Tabla 14. Matriz base.</i>	78
<i>Tabla 15. Matriz de riesgo final.</i>	78

Resumen

El volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl) es considerado un volcán activo cuya historia eruptiva muestra la ocurrencia de eventos explosivos capaces de generar diversos fenómenos volcánicos potencialmente destructivos. Entre ellos destacan las caídas de ceniza y las corrientes de densidad piroclástica, las cuales representan una amenaza para la población, la infraestructura crítica, la agricultura, la ganadería y las actividades económicas localizadas en sus alrededores. El objetivo de esta investigación fue evaluar el riesgo asociado a caídas de ceniza en el entorno del Pico de Orizaba mediante la integración de información de peligro y vulnerabilidad.

La metodología desarrollada demuestra que la integración del peligro y vulnerabilidad mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye una herramienta útil para la estimación del riesgo volcánico y la identificación de zonas de prioridad para la gestión y reducción del riesgo.

Para ello, se utilizaron escenarios eruptivos previamente definidos, a partir de los cuales se analizaron mapas de peligro empleando técnicas de análisis espacial en SIG. Para complementar, se construyó un índice de vulnerabilidad social mediante la integración de indicadores sociodemográficos obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2020. Posteriormente, ambas variables fueron combinadas mediante una matriz de riesgo para identificar las zonas con mayor riesgo ante una posible erupción.

Los resultados muestran diferencias importantes entre los escenarios eruptivos considerados. El escenario UC4, que corresponde a una erupción pliniana de aproximadamente 29 ± 0.9 km de altura, presentó la mayor dispersión de depósitos de caída y, en consecuencia, este escenario presentó el mayor nivel de peligro y riesgo, con una extensión aproximada de 1,989 km² para depósitos cercanos a 1 cm de espesor. Por su parte, el escenario UC2 corresponde a una columna subpliniana, con una altura promedio de 21 ± 3.8 km. El escenario UC6 corresponde a una columna subpliniana en descenso, con una altura promedio de 24 ± 0.4 km; de acuerdo con Torres-Orozco et al. (2026). Tomando en cuenta estos escenarios, se identificó que hay localidades ubicadas al sur y sureste del volcán que presentan mayor exposición debido a que coinciden con la dirección preferencial de dispersión de los depósitos volcánicos.

Estos resultados evidencian que el riesgo volcánico no depende solo del peligro volcánico, sino también de las condiciones sociales y demográficas de las poblaciones expuestas, por lo que la vulnerabilidad social tiene un gran impacto en la estimación del riesgo. La principal contribución de este trabajo radica en la

generación de cartográfica que integra el peligro y la vulnerabilidad para tres escenarios eruptivos del Pico de Orizaba.

Los mapas de riesgo obtenidos constituyen una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en materia de gestión y reducción del riesgo pues permiten identificar de forma clara las zonas y las localidades que requieren de atención prioritaria. De esta manera, la investigación aporta información relevante que puede ser usada por las autoridades competentes para el diseño de planes de respuesta ante un evento eruptivo y de igual manera contribuir en el fortalecimiento de la resiliencia de las poblaciones más vulnerables en el entorno del Pico de Orizaba.

Abstract

Pico de Orizaba volcano (Citlaltépetl) is considered an active volcano whose eruptive history shows the occurrence of explosive events capable of generating various potentially destructive volcanic phenomena. Among these, ash fall and pyroclastic density currents stand out, as they represent a threat to the population, critical infrastructure, agriculture, livestock, and economic activities located in its surroundings. The objective of this research was to assess the risk associated with ash fall in the vicinity of Pico de Orizaba through the integration of hazard and vulnerability information.

The methodology demonstrates that integrating hazard and vulnerability through Geographic Information Systems (GIS) constitutes a useful tool for estimating volcanic risk and identifying priority zones for risk management and reduction.

To this end, previously defined eruptive scenarios were used, from which hazard maps were analyzed using spatial analysis techniques in GIS. In addition, a social vulnerability index was built by integrating sociodemographic indicators obtained from the 2020 Population and Housing Census. Subsequently, both variables were combined through a risk matrix to identify the areas of greatest risk in the event of a possible eruption.

The results show significant differences among the eruptive scenarios considered. The UC4 scenario, corresponding to a Plinian eruption with a column height of approximately 29 ± 0.9 km, showed the greatest dispersion of fall deposits and, consequently, presented the highest level of hazard and risk, with an approximate extent of 1,989 km² for deposits close to 1 cm in thickness. The UC2 scenario corresponds to a sub-Plinian column with an average height of 21 ± 3.8 km. The UC6 scenario corresponds to a waning sub-Plinian column with an average height of 24 ± 0.4 km, according to Torres-Orozco et al. (2026). Based on these scenarios, localities located south and southeast of the volcano were identified as having greater exposure, as they coincide with the preferential dispersion direction of the volcanic deposits.

These results show that volcanic risk does not depend solely on volcanic hazard, but also on the social and demographic conditions of the exposed populations, meaning that social vulnerability has a significant impact on risk estimation. The main contribution of this work lies in the generation of cartography that integrates hazard and vulnerability for three eruptive scenarios of Pico de Orizaba volcano.

The resulting risk maps constitute a decision-support tool for risk management and reduction, as they allow clear identification of the zones and localities that require

priority attention. In this way, the research provides relevant information that can be used by the competent authorities to design response plans in the event of an eruptive event, and likewise to contribute to strengthening the resilience of the most vulnerable populations in the surroundings of Pico de Orizaba volcano.

Capítulo 1. Introducción

Antecedentes

En México, la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) constituye una provincia geológica caracterizada por una particular historia evolutiva. Se define por sus características litológicas, estructurales y tectónicas (Ortega-Gutiérrez, 1991). De acuerdo con Gómez-Tuena et al. (2005), la FVTM corresponde a un arco magmático continental que se extiende desde la costa del Pacífico hasta el Golfo de México y presenta una orientación predominante E-O en sus sectores central y oriental. Su origen y evolución están relacionados con la dinámica de subducción de las placas de Rivera y Cocos bajo la placa norteamericana, así como con los cambios de la geometría y posición del arco magmático a lo largo del tiempo.

La mayoría de los volcanes se ubica cerca de los límites de las placas tectónicas; sin embargo, también existen algunos en medio de las placas tectónicas relacionados con anomalías denominadas “puntos calientes” o “hotspots” (Que Salinas et al., 2022).

Al menos la mitad de la población de México vive a menos de 100 km de un volcán activo, principalmente debido a la fertilidad de los suelos y las condiciones climáticas favorables, que han propiciado el establecimiento de la población (Espinasa-Pereña et al. 2021). Con 60 millones de personas en riesgo, México ocupa el cuarto lugar entre los países con el mayor número de personas expuestas a peligros volcánicos, después de Indonesia, Filipinas y Japón (Espinasa-Pereña et al., 2021).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la entidad jurídica responsable del monitoreo de los fenómenos naturales que pudieran poner en peligro la vida y propiedad de la población, incluidas erupciones volcánicas. Individualmente, los estados con volcanes activos dentro de su territorio también realizan operaciones de monitoreo, generalmente a través de los esfuerzos de una pequeña comunidad de geocientíficos en las universidades locales; existen observatorios locales para el volcán Colima en la frontera del estado Colima - Jalisco, Citlaltépetl y San Martín Tuxtla en Veracruz, y el Chichón y Tacaná en Chiapas (Espinasa-Pereña et al., 2021).

Hasta el año 2020, se tenían en constante monitoreo 6 volcanes en México: Popocatepetl, Colima, Citlaltépetl (Pico de Orizaba), San Martín Tuxtla, Tacaná y Chichón. De los anteriores volcanes, uno que destacó en el Siglo XX, el Chichonal, en Chiapas, casi sin previo aviso generó una erupción que es reconocida como el desastre volcánico que generó mayores daños en la historia de México. El magma

hizo contacto con el agua, provocando una explosión hidromagmática violenta que destruyó por completo el domo central y generó oleadas de piroclásticos. Durante su trayecto, el flujo alcanzó cerca de 8 km, y causó grandes afectaciones, entre ellas más de 2,000 personas que resultaron víctimas de dicho siniestro, además de 9 poblados sepultados (Espinasa-Pereña et al., 2021).

Por su parte, el Pico de Orizaba o Citlaltépetl es un volcán activo, pero actualmente se encuentra en estado de reposo. Para caracterizar la magnitud de sus erupciones se utiliza el Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés), propuesto por Newhall y Self (1982), el cual permite comparar la magnitud de las erupciones explosivas. El índice considera principalmente el volumen de material expulsado, la altura de la columna eruptiva y la duración de la erupción, y utiliza una escala de 0 a 8, en la que los valores mayores representan erupciones de mayor magnitud y explosividad.

Los registros históricos presentan actividad eruptiva predominante explosiva con VEI entre 0 y 2. Sin embargo, hay evidencia de eventos de mayor magnitud, con eventos eruptivos que alcanzaron valores de VEI 3 y VEI 4. Se destaca una erupción pliniana asociada a un VEI de 5, remontándose a hace más de 9,000 años de acuerdo al Global Volcanism Program (s. f.). Además, en el Pico de Orizaba existe evidencia del colapso de domos y de la formación de flujos piroclásticos, e incluso de colapsos de parte del edificio volcánico, resultando en afectaciones en cientos de kilómetros cuadrados (Que Salinas et al., 2022).

Actualmente, en las cercanías del Pico de Orizaba habitan más de medio millón de personas, incluyendo las que viven en los pueblos que se ubican sobre las faldas del volcán, en altitudes por encima de los 3,000 metros (Que Salinas et al., 2022).

El monitoreo volcánico del Pico de Orizaba incluye la red de datos sísmicos del Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV) del Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana (UV), que emplea 8 estaciones de banda ancha ubicadas a lo largo del estado. Estos datos contribuyen a la elaboración de los mapas de peligros, estos son principalmente elaborados por esfuerzos académicos de proyectos particulares, en especial el mapa de peligros del Citlaltépetl fue elaborado por Sheridan et al. (2001).

En este contexto, si bien existe un vasto conocimiento sobre los peligros volcánicos asociados al Pico de Orizaba, persiste la falta de integración de estos estudios con una evaluación formal del riesgo, particularmente en el tema de vulnerabilidad y exposición de la población. Esta situación deja en evidencia la necesidad de fortalecer los análisis de riesgo volcánico, con el objetivo de contribuir a una gestión eficiente de la reducción del riesgo de desastres.

Si bien se cuenta con mapas que modelan los alcances de los peligros volcánicos y delimitan las zonas más propensas, dichos mapas fueron elaborados principalmente desde un punto geológico y con fines científicos, limitando la capacidad de ser aplicados en la planificación territorial y en la toma de decisiones. Por ello la incorporación de la estimación de la vulnerabilidad pretende conseguir una gestión del riesgo, capaz de responder cuando un fenómeno impacta en un área, tener su tiempo de recuperación para después orientarse hacia la prevención, mitigación y prevención. También, se busca promover una mejora continua en cada etapa del proceso, esperando que el sistema evolucione y contribuya a minimizar los riesgos en el territorio.

Planteamiento del problema

En los alrededores del Pico de Orizaba se estima que la mayoría de las personas que habitan y desarrollan sus actividades cotidianas no tienen una percepción clara del nivel de exposición del riesgo volcánico al que se encuentran sujetos. Aunado a esto, los trabajos en materia de peligro volcánico realizados para el Pico de Orizaba se realizaron hace más de una década, por lo que en el transcurso del tiempo desde que se realizaron ha habido un incremento en la tasa demográfica en los alrededores del aparato volcánico, debido a que la vulnerabilidad depende de la exposición al fenómeno, la infraestructura y la capacidad para aminorar los daños.

Esta desactualización limita la comprensión de los posibles alcances de los fenómenos volcánicos y el posible impacto en las comunidades. Además, la ausencia de una evaluación de la vulnerabilidad (capaz de estimar el grado de propensión del sistema a sufrir daños ante un evento eruptivo) impide la elaboración de los mapas de riesgos, los cuales determinan la probabilidad de daños y pérdidas.

Como consecuencia, se dificulta la toma de decisiones oportunas en caso de emergencia y debilita la gestión del riesgo volcánico en la región.

Objetivo General

- Estimar el riesgo asociado a tres escenarios eruptivos de actividad pliniana y subpliniana en el volcán Pico de Orizaba, considerando la vulnerabilidad social de las comunidades ubicadas dentro de un radio de 50 km a partir del cráter.

Objetivos Particulares

- Identificar los principales peligros asociados al volcán Pico de Orizaba, determinando aquellos con mayor impacto potencial sobre comunidades cercanas.
- Estimar el peligro ante depósitos de caída de ceniza basado en los mapas de isopacas de Torres-Orozco et al. (2026).
- Evaluar la vulnerabilidad social de las comunidades ubicadas dentro de un radio de 50 km del cráter, a partir de variables sociodemográficas.
- Estimar la vulnerabilidad total en un radio de 50 km a partir del cráter del Pico de Orizaba.
- Estimar el riesgo en la zona de estudio a través de matrices de riesgo que integran peligro, vulnerabilidad y exposición.
- Integrar y zonificar los resultados del análisis de peligros y vulnerabilidad en la elaboración de cartografía temática que represente las zonas con mayor nivel de riesgo ante un posible evento eruptivo.

Hipótesis

La desactualización de los mapas de peligro volcánico del Pico de Orizaba y la ausencia de una evaluación integral del riesgo limitan la estimación del posible impacto de los fenómenos volcánicos en las comunidades cercanas al Pico de Orizaba, lo que lleva a un incremento de la vulnerabilidad y exposición ante un posible evento volcánico.

La integración de la información de vulnerabilidad aunado con el peligro volcánico en un SIG permitirá identificar las zonas con mayor riesgo, logrando una mejor evaluación del mismo y visualizarlo en una cartografía que sea una herramienta fundamental para la toma de decisiones.

Justificación

El volcán Pico de Orizaba, también conocido como Citlaltépetl, representa un volcán de gran relevancia para el país, al ser un volcán activo y haber tenido actividad eruptiva reciente en 1687 con un VEI 2. No obstante, los estudios enfocados a la evaluación del riesgo volcánico en su entorno son limitados. Pese a la presencia de comunidades asentadas dentro del área de estudio, delimitada mediante un radio de 50 km alrededor del cráter del Pico de Orizaba, estimado desde las distancias máximas de los peligros volcánicos analizados, existe una escasez de investigación que integren el análisis de los peligros volcánicos con la evaluación de la vulnerabilidad física y social de la población expuesta, generando una pobre gestión del riesgo en esta zona (Zavaleta Melo, 2025).

La carencia de la difusión de información sobre el riesgo volcánico ha derivado una baja percepción del peligro que representa para la población local. Esta situación se ve agravada por la ausencia de protocolos de acción establecidos para responder ante una emergencia volcánica, así como por la falta de personal capacitado que pueda reaccionar de manera oportuna y adecuada en escenarios de crisis. Adicionalmente, la carencia de la especificación de zonas seguras y de infraestructura equipada para soportar la crisis incrementa la vulnerabilidad de las comunidades ante un evento eruptivo.

Como bien se sabe, el volcán Pico de Orizaba es un volcán activo en estado de reposo, pero con actividad efusiva presente, lo que subraya la necesidad de fortalecer acciones preventivas y de preparación ante desastres. La falta de información cartográfica actualizada que identifique las zonas de mayor riesgo limita la capacidad de planificar respuestas efectivas y reducir los posibles impactos.

Por lo anterior, el presente estudio adquiere relevancia de carácter social y científico, al proponer un análisis del riesgo volcánico que considere la interacción entre los peligros volcánicos, la vulnerabilidad social de las comunidades localizadas dentro de un radio de 50 km del cráter. La elaboración de un mapa de riesgo capaz de ser reproducible y establecer las bases de la difusión científica permitirá contribuir al fortalecimiento del conocimiento sobre el volcán Pico de Orizaba, así como servir de apoyo para la gestión del riesgo, la toma de decisiones y la implementación de estrategias de prevención y respuesta ante emergencias volcánicas.

Para su presentación este trabajo se desarrolla en siete capítulos. En el primer capítulo se plantean los objetivos de la investigación y se justifica su elaboración. El segundo capítulo aborda las bases de la vulcanología, así como las definiciones de

los conceptos fundamentales empleados a lo largo del estudio. En el tercer capítulo describe la zona de estudio, orientando al lector mediante la caracterización detallada del área estudiada.

El cuarto capítulo expone la metodología realizada para el cumplimiento de los objetivos planteados, mientras que el quinto capítulo presenta los resultados obtenidos considerando su aplicación. Finalmente, en los capítulos sexto y séptimo se desarrollan las discusiones y las conclusiones derivadas de los resultados. En las últimas secciones del escrito se incluyen los anexos y tablas que funcionan como complementos, su función es ampliar y ejemplificar ciertos apartados del estudio.

Capítulo 2. Marco Teórico

Volcanismo y gases volcánicos

El término “**volcán**” tiene como origen Italia, y se basa en una isla con el nombre de “Vulcano”, dicha isla se pensaba que era la chimenea de la fragua del Dios romano del fuego, Vulcanus, también conocido como Volcanus o Vulkan. En aquellos tiempos se creía que los fragmentos de lava caliente y de las nubes de polvo o ceniza emitidos de Vulcano provenían de la fragua de Vulcanus (o Vulkan), cuando pegaban rayos para Júpiter, rey de los dioses y armas para Marte, Dios de la guerra (Crystalinks, s. f.).

Un volcán es una estructura o un punto de la superficie terrestre a través de la cual tiene lugar la salida de magma al exterior y, ocasionalmente, de otros materiales de origen no magmático. La acumulación de estos productos emitidos alrededor del centro emisor puede dar lugar a relieves positivos con morfologías diversas. La actividad volcánica constituye una manifestación de la dinámica interna de la Tierra y puede presentarse mediante procesos eruptivos de intensidad y duración variables (Martí et al., 2012).

Procesos eruptivos

La actividad eruptiva comprende el conjunto de procesos asociados con la emisión de materiales volcánicos en estado sólido, líquido y gaseoso hacia la superficie terrestre. Dependiendo de su duración y características, estos procesos se

organizan jerárquicamente en cinco unidades: pulso, fase, erupción, época y periodo eruptivo, ordenadas de menor a mayor duración (Martí et al., 2012).

Pulso eruptivo: Emisión discreta o corta en el tiempo de materiales volcánicos, su duración va desde segundos hasta algunos minutos.

Fase eruptiva: Está constituido por el conjunto de pulsos que son del mismo estilo eruptivo, pueden durar minutos, horas o algunos días.

Erupción: Es la actividad eruptiva base, puede durar días, meses e incluso años.

Época eruptiva: comprende varias erupciones, durando centenares o miles de años, entre cada uno incluso se pueden destruir y formar nuevos edificios volcánicos.

Periodo eruptivo: Es el resultado de varias épocas eruptivas, diferenciadas por lapsos de tiempo considerablemente largos, lo suficiente como para que se presenten fenómenos tectónicos como: plegamientos, fallas, fracturas, etc. Su duración es la mayor de todas, pues va desde los miles hasta los millones de años y se forman regiones o campos volcánicos (Martí et al., 2012).

Tipos de actividad volcánica

El tipo de actividad eruptiva está determinado por el contenido de volátiles disueltos en el magma, su velocidad de ascenso en el magma y su evolución al ascender a superficie. Otro factor que también influye en el tipo de actividad eruptiva es el contenido de agua que haya en la zona por donde fluirá el magma hacia el exterior. En función de los factores antes mencionados, se pueden distinguir dos tipos de actividad volcánica: efusiva y explosiva (Martí et al., 2012).

Actividad efusiva

La actividad efusiva se caracteriza por ser una erupción relativamente tranquila y continua de lava. El magma contiene un bajo contenido de volátiles y presenta una alta velocidad de ascenso, lo que favorece la desgasificación del magma y evita que la presión ejercida por las burbujas de gas dentro del conducto volcánico sea suficiente para provocar su fragmentación y expulsión al aire (Martí et al., 2012).

Se genera por:

- Emisión de magmas básicos, con un bajo contenido de gases disueltos.
- Desgasificación de magmas ácidos debido a un escape progresivo de volátiles por medio de fumarolas o similares.
- Evento previo con una actividad eruptiva explosiva, liberando en este evento gran parte del contenido gaseoso del magma dentro del conducto volcánico.

Actividad Explosiva

La actividad explosiva se caracteriza por la fragmentación y expulsión del material magmático y piroclásticos de manera muy violenta. Se asocian a magmas ricos en contenido de volátiles cuya expansión genera un aumento de presión dentro del conducto hasta provocar la fragmentación del magma y la liberación repentina de los gases hacia la superficie. Asimismo, pueden producirse explosiones de tipo hidromagmáticas, es decir en algún punto hay una interacción entre el agua y el magma, esta interacción provoca una explosión mayor y también ocurre una fragmentación del magma y de las rocas circundantes (Martí et al., 2012).

Tipos de volcanes

Los volcanes pueden clasificarse de acuerdo con diferentes características, como su morfología, composición, procesos eruptivos y ambiente de formación. A continuación, se menciona una clasificación de acuerdo con su forma exterior. (Cas et al., 2024).

Volcán compuesto (estratovolcán): presenta una morfología exterior cónica, las paredes exteriores son empinadas, principalmente está compuesto por capas de lava y piroclásticos que se van alternando entre sí. Generalmente posee un cráter en la cima y puede presentar uno o más conductos (Cas et al., 2024). Algunos ejemplares en el país son el Popocatepetl, Colima y Pico de Orizaba.

Volcán escudo: Construido con base en una sucesión de lavas fluidas, principalmente basálticas, formando un edificio simétrico y de forma circular a elíptica. Con pendientes suaves de poca pendiente, menores de 10° y a su vez

asemeja la forma de escudo. Se construye lentamente, ya que, durante las erupciones, las lavas salen del conducto central hacia todas las direcciones. Con el tiempo forman edificios con grandes dimensiones (Cas et al., 2024).

Caldera volcánica: Son poligenéticos, constan de múltiples puntos de erupción. Por lo general carecen de un cono topográficamente imponente y, en casos extremos, forman grandes y amplias depresiones volcanotectónicas (Cas et al., 2024).

Volcán Somma: previamente fue una caldera volcánica pero después de cierto periodo eruptivo es ocupado por un cono central nuevo, es decir, se forma un nuevo edificio volcánico dentro de la caldera (Sieron, s. f.).

Volcán Tuya: son volcanes subglaciales, se forman al momento en que la lava fluye por debajo de un glaciar, cuando la lava choca con el hielo, se forman capas almohadillas. En este proceso, el hielo se derrite lentamente y la lava se va enfriando y endureciendo poco a poco, dando lugar a capas de hyalocastito. Cuando el hielo se termina de derretir, la lava continúa fluyendo y se apila, ya que el volcán está rodeado por hielo, de tal manera que se forman montañas con cimas casi planas y flancos casi verticales (Sieron, s. f.).

Cono de escoria: contruidos a base de fragmentos de lava emitidos por una única chimenea volcánica. Al acumularse alrededor de la zona de emisión dan paso a un pequeño cono de escorias de pocas dimensiones (Cas et al., 2024). Algunos ejemplares en México son el Parícutín y el Macuítépetl. Asimismo, una gran parte del Campo Volcánico Michoacán- Guanajuato está constituido por conos de escoria.

Domo de lava: Se forman con base en pequeñas masas de lavas con una viscosidad demasiado altas impidiendo el flujo a grandes distancias, cuando estas lavas son expulsadas se depositan en la cima de la chimenea. Muchos de los domos crecen desde adentro partiendo de la expansión del material (Cas et al., 2024).

Maars: edificadas en fases de actividad freatomagmática. El cráter está excavado por debajo del nivel topográfico, formado por depósitos de oleadas y flujos piroclásticos, suelen tener una altura muy baja (Martí et al. 2012).

Anillos de Toba: también se edifican en función de la actividad freatomagmática, formados por depósitos piroclásticos de tipo brecha, oleadas y flujos piroclásticos. Presentan un cráter amplio y un cono de poca altura, con flancos que presentan pendientes en torno a 10° (Martí et al., 2012).

Estilos Eruptivos

Durante una erupción volcánica, un volcán puede presentar diferentes estilos eruptivos, los cuales están determinados principalmente por las propiedades del magma, su contenido de volátiles, viscosidad, velocidad de ascenso y mecanismos de fragmentación. Algunos estilos reciben su nombre de los volcanes o regiones donde fueron descritos inicialmente, como los estilos hawaiano, estromboliano, vulcaniano, peleano, pliniano y surtseyano (Cas et al., 2024).

Hawaiana: son erupciones de baja intensidad, con baja explosividad y una continua emisión de magma en pequeños volúmenes. Caracterizada por erupciones efusivas basálticas, muy fluidas y un contenido bajo de gases.

Este tipo de erupción puede dirigirse a más zonas de debilidad alrededor de la cima o en fisuras aparte del cráter central (Sieron, s. f.).

Peleana: denominadas así por el Monte Pelée. Este tipo de erupciones es capaz de crear columnas eruptivas de gran tamaño, emitiendo una gran cantidad de gases, polvo y fragmentos de lava, mismos que son creados por el colapso del domo de lava y lanzados por el cráter del volcán.

Antes del evento eruptivo, el domo de lava crece, pierde estabilidad y genera flujos piroclásticos, con unas velocidades similares a los 150 km/h. En este tipo de eventos la presión se acumula más y se libera en un solo evento eruptivo y no en varios eventos (Sieron, s. f.).

Vulcaniana: el término proviene del volcán “Vulcano”. Suelen ser explosiones con columnas de 5 - 10 km. Un comienzo de la actividad vulcaniana es la creación del domo de lava, además de la formación de flujos piroclásticos al crecer. Los depósitos cerca del cráter se componen de grandes bloques y bombas volcánicas, la mayoría de los depósitos son cenizas finas (Sieron, s. f.).

Estromboliana: se caracterizan por ser violentas y explosivas, de corta duración de emisión de lava de viscosidad intermedia, muchas veces arrojada al aire (cientos de metros de altura de columnas eruptivas).

La acumulación de gases forma burbujas que poco a poco van creciendo, estas mismas se elevan dentro de la columna de lava, cuando llegan a la superficie estallan ruidosamente y a su vez arrojan magma.

Las altas presiones de gas ocasionan que las erupciones sean explosivas y esporádicas, puede generar peligros importantes dependiendo del contexto, especialmente por bombas, lapilli, caída de tefra y flujos de lava.

Pliniana: El término "pliniano" agrupa erupciones o fases eruptivas caracterizadas por tasas de emisión elevadas, que sostienen columnas eruptivas robustas y ascendentes que atraviesan la troposfera hasta alcanzar la estratosfera, generando penachos bien definidos a favor del viento y áreas de dispersión de depósito que van de 500 a 5000 km², con una distancia media del espesor (bt) de 2 a 10 km (Cas et al., 2024; Pyle, 1989). Estas erupciones suelen corresponder a niveles VEI 5-6, y han sido documentadas tanto en tiempos históricos como recientes, incluyendo eventos como el Vesubio (79 d.C.), Mt. St. Helens (1980), El Chichón (1982) y Pinatubo (1991) (Cas et al., 2024). La mayoría de estas erupciones se origina en respiraderos centrales asociados a conductos cilíndricos, aunque en algunos casos la actividad puede distribuirse a lo largo de fisuras lineales de varios kilómetros de longitud (Cas et al., 2024).

Freatomagmática Surtseyana: Las erupciones freatomagmáticas surgen de la interacción directa entre el magma y el agua, ya sea superficial o subterránea. Esta interacción puede generar una fragmentación explosiva del magma debido a la rápida vaporización del agua, produciendo ceniza fina y otros depósitos piroclásticos. El estilo surtseyano es característico de erupciones que ocurren en ambientes con presencia de agua somera, particularmente en islas volcánicas, aunque también puede desarrollarse en ambientes continentales. Entre sus características se encuentra la formación de oleadas piroclásticas, que pueden desplazarse radialmente y generar depósitos con estructuras de dunas (Sieron, s. f.).

Freática: En las erupciones freáticas, el agua interactúa indirectamente con una fuente de calor, generalmente asociada a un cuerpo magmático, sin que exista participación directa de magma juvenil en los productos expulsados. En contraste, las erupciones freatomagmáticas implican la interacción directa entre el magma y el agua, lo que produce la fragmentación y expulsión de material magmático juvenil, además del vapor generado durante la interacción (Cas et al., 2024).

La actividad freática puede producir explosiones capaces de fragmentar y expulsar roca preexistente, así como generar oleadas piroclásticas, lahares, avalanchas y proyectiles balísticos, además de liberar gases potencialmente tóxicos. Asimismo, este tipo de actividad puede estar relacionada con cambios en el sistema hidrotermal y, en determinados contextos, preceder a una actividad magmática posterior (Sieron, s. f.).

Peligros volcánicos

Son todos aquellos productos sólidos, líquidos y gaseosos expulsados durante una erupción. Se pueden diferenciar entre los volátiles, gases que se separan del magma, y los que se depositan (Martí et al., 2012).

Dependiendo de la literatura consultada, se pueden encontrar como materiales, productos, fenómenos o peligros volcánicos, etc. Conforme a con Ferrés-López y Caballero-García (2025) se distinguen 7 peligros, cada uno distinto en función de las características del magma y de las interacciones de este con otros materiales, durante la salida a la superficie.

Dichos peligros asociados son:

Flujos de lava

Los flujos de lava son coladas o derrames de roca fundida en erupciones efusivas que pueden tener temperaturas de 700 a 1200°C, estos pueden ser expulsados desde el cráter volcánico o en estructuras fisúrales, su viscosidad depende directamente de su composición y contenido de volátiles, siendo más viscosos los flujos con mayor cantidad de sílice. La distribución de estos depósitos se encuentra determinado por la topografía, su viscosidad y cantidad. La emisión de los flujos de lava atrae sin lugar a duda riesgos asociados principalmente con la pérdida de suelos fértiles, soterramiento, la quema de áreas de cultivo, pastizales o bosques. Se tienen registros de casos con pérdida de infraestructura, sin embargo, por la velocidad asociada al flujo de lavas es posible que las personas y animales mantengan su distancia de las zonas afectadas. Caso contrario para las depresiones, barrancas o valles, pues el emplazamiento del material va a modificar la topografía de la zona y a su vez traerá afectaciones para la red de drenaje para las áreas más alejadas (Ferrés-López & Caballero-García, 2025).

Caída de piroclastos y ceniza

Ferrés-López y Caballero-García (2025) señalan que durante las erupciones explosivas el magma y las rocas del conducto se fragmentan, generando piroclastos de diferentes tamaños. Los fragmentos mayores pueden desplazarse mediante trayectorias balísticas o incorporarse a otros procesos volcánicos, mientras que los de menor tamaño son transportados por los gases y forman parte de las columnas eruptivas. Cuando la columna alcanza una densidad similar a la de la atmósfera, su ascenso se detiene y se forma una zona de paraguas, desde donde el viento controla la dispersión de las partículas.

El lapilli, con tamaños de 2 a 64 mm, y la ceniza, con diámetros menores a 2 mm, son transportados por los vientos y posteriormente depositados sobre la superficie. Su distribución y espesor dependen principalmente de la distancia al centro emisor, el tamaño y densidad de las partículas, así como de la magnitud e intensidad de la erupción (Ferrés-López & Caballero-García, 2025). Este espesor se representa comúnmente mediante isopacas, definidas como curvas de contorno que conectan puntos de igual espesor estratigráfico de un depósito (Schlumberger, s.f.).

La caída de piroclastos constituye uno de los peligros volcánicos de mayor alcance, debido a su capacidad para afectar extensas áreas. Sus principales impactos incluyen irritación de ojos y vías respiratorias, afectaciones a suelos, agricultura, pastizales y ganado, así como contaminación de recursos hídricos y aumento del escurrimiento superficial. En la infraestructura puede provocar el colapso de techos por acumulación de material y afectar vías de comunicación por la reducción de visibilidad y pérdida de tracción. Asimismo, la ceniza puede interferir con sistemas eléctricos y de comunicación, además de representar un riesgo para la aviación al ocasionar daños en los motores de las aeronaves (Ferrés-López & Caballero-García, 2025).

Emisión de fragmentos balísticos

Los proyectiles balísticos son fragmentos de gran tamaño producidos durante erupciones explosivas, con diámetros superiores a 6.4 cm y que pueden alcanzar varios metros. Son expulsados desde el centro eruptivo y siguen trayectorias aproximadamente parabólicas, modificadas por la resistencia del aire (Ferrés-López & Caballero-García, 2025). Pueden clasificarse como bombas volcánicas, cuando son expulsadas en estado fundido o semilíquido y se solidifican durante su trayectoria, o como bloques volcánicos, cuando proceden de rocas previamente solidificadas.

Su alcance depende principalmente de la energía de la erupción y generalmente se limita a algunos kilómetros alrededor del centro emisor, aunque pueden incrementarse durante erupciones de gran magnitud. Debido a sus altas velocidades y energía de impacto, los proyectiles balísticos representan un peligro para la población, infraestructura y aeronaves, pudiendo ocasionar lesiones graves, daños estructurales e incluso la perforación de techos (Ferrés-López & Caballero-García, 2025).

Corrientes de densidad piroclástica

Según Ferrés-López y Caballero-García (2025), las corrientes de densidad piroclástica son una mezcla de partículas piroclásticas, como cenizas, pómez y bloques, y gases que se desplazan por las laderas de un volcán a velocidades de entre 100 y 550 km/h, a temperaturas cercanas a los 700 °C, y cuya trayectoria puede verse alterada por la topografía circundante. La proporción entre las partículas sólidas y el gas determina el tipo de flujo. Cuando predomina la fase sólida (piroclastos), se generan flujos piroclásticos, mientras que una mayor proporción de gas produce oleadas piroclásticas. Ambos pueden presentarse durante una misma erupción.

Uno de los principales mecanismos de formación de estos eventos es el colapso de una columna eruptiva generada durante una erupción explosiva, cuando esta no posee energía suficiente para mantenerse o cuando su densidad es demasiado alta. Existen otros mecanismos de formación, como el colapso de un domo, la interacción freatomagmática o el contacto con agua (Ferrés-López & Caballero-García, 2025).

Su alcance está fuertemente relacionado con el volumen y la masa del flujo, así como con la altura a la que ocurre el colapso. Las partes más concentradas, que forman flujos piroclásticos, tienden a desplazarse por depresiones o barrancas. En cambio, las partes más diluidas, que generan oleadas piroclásticas, presentan un menor control topográfico, por lo que pueden afectar extensiones de terreno mayores. Es importante mencionar que otra parte de las corrientes corresponde a nubes de gases y ceniza fina, capaces de alcanzar varios kilómetros de altura e incluso desprenderse del flujo. Esta corriente se denomina nube de fénix (Ferrés-López & Caballero-García, 2025).

Debido a su elevada temperatura, las corrientes de densidad piroclástica representan uno de los principales peligros tanto para la población como para la infraestructura. La presión dinámica ejercida sobre las estructuras puede provocar colapsos, mientras que las altas temperaturas pueden ocasionar incendios y daños en la infraestructura. Asimismo, su elevada temperatura puede causar lesiones graves o la muerte de personas y animales, además de destruir las estructuras y otros elementos que encuentre a su paso (Ferrés-López & Caballero-García, 2025).

Emisión de gases

La desgasificación volcánica es el proceso mediante el cual los gases disueltos en el magma se liberan durante su ascenso hacia la superficie. La disminución de la presión favorece su expansión y contribuye tanto al ascenso del magma como a la explosividad de las erupciones. Este proceso también puede presentarse en zonas

periféricas del edificio volcánico, donde los gases ascienden a través de fracturas y fisuras, dando lugar a fumarolas (Ferrés-López & Caballero-García, 2025).

El vapor de agua (H₂O) constituye el componente más abundante de las emisiones volcánicas, seguido por el dióxido de carbono (CO₂) y los compuestos de azufre, principalmente dióxido de azufre (SO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). También pueden emitirse otros gases en menores concentraciones, incluidos halógenos como el ácido fluorhídrico (HF) y el ácido clorhídrico (HCl) (Schiavo et al., 2021).

La emisión de gases volcánicos representa un peligro para la salud humana y el medio ambiente, ya que algunos pueden provocar asfixia, irritación de las vías respiratorias, corrosión de materiales y formación de lluvia ácida, con efectos negativos sobre la vegetación, los cultivos y los recursos hídricos (Schiavo et al., 2021).

Riesgo Volcánico

Según la Real Academia Española la palabra **riesgo** hace referencia a la proximidad de un daño, desgracia o contratiempo que puede afectar la vida humana. Desde una perspectiva más analítica, el riesgo puede definirse como la probabilidad de que un fenómeno cause daños en un lugar y periodos determinados, dependiendo tanto de la peligrosidad del evento como de la exposición y vulnerabilidad de los elementos amenazados. Para este trabajo se retoma la expresión que relaciona estos factores propuesta por Jácome-Paz y Novelo-Casanova (2025):

$$\text{RIESGO} = \text{PELIGRO} \times \text{EXPOSICIÓN} \times \text{VULNERABILIDAD}$$

El concepto de **peligro** se define como la contingencia inminente de perder una cosa o de que ocurra un daño. Se refiere a un evento capaz de ocasionar pérdidas de diversa magnitud en el lugar donde ocurre, cuya interpretación implica la presencia del ser humano para determinar qué constituye un daño. En este sentido, el **peligro natural** se define como “la probabilidad de que se produzca, dentro de un periodo determinado y en una zona dada, un fenómeno natural potencialmente dañino” (Aneas de Castro, 2000).

Por su parte, la **exposición** se centra en la relación de proximidad entre el individuo o grupo de personas y el peligro asociado, es decir, la ubicación, posición o localización. Asimismo, se refiere a la relación de proximidad con el espacio de

seguridad puesto que este último constituye un elemento de resiliencia, pero su localización interviene con el grado de exposición (Aznar-Crespo & Aledo, 2020). La **vulnerabilidad** nace en función de la presencia de condiciones inseguras asociadas a la exposición de una población al enfrentarse a un peligro, el cual se desarrolla como elemento detonante que da lugar al desastre.

El **desastre**, en términos generales, se refiere a una interrupción grave en el funcionamiento de una comunidad que ocasiona pérdidas humanas, materiales o ambientales y que supera la capacidad de respuesta local, requiriendo apoyo externo (Jácome-Paz & Novelo-Casanova, 2025).

El impacto del desastre no se concibe únicamente como consecuencia de fuerzas naturales, sino como el resultado de la interacción de diferentes variables. En este sentido, poblaciones marcadas por susceptibilidades previas relacionadas con el tejido social como la pobreza, marginación, viviendas frágiles, exposición geográfica, incapacidad institucional, puede verse afectada por amenazas de origen natural, socioambiental o antrópico. Aunado a esto, la percepción que la población tenga sobre el grado de riesgo al que está expuesta, así como sus capacidades para responder y sobreponerse a los daños, influirá en la magnitud y evolución del desastre (Jácome-Paz & Novelo-Casanova, 2025).

En este contexto, la resiliencia adquiere especial importancia ya que se refiere a la capacidad de un sistema, grupo, comunidad o sociedad para resistir, responder, adaptarse y recuperarse ante un daño potencial. De este modo, la resiliencia permite afrontar los efectos de una amenaza y favorecer la recuperación, así como la transformación positiva ante situaciones de crisis (Jácome-Paz & Novelo-Casanova, 2025).

Jácome-Paz y Novelo-Casanova (2025) retoman una clasificación de los riesgos basada en el tipo de fenómeno perturbador que los origina, entre los que se incluyen los riesgos geológicos, hidrometeorológicos, químicos, tecnológicos, sanitarios, ecológicos, socio-organizativos y astronómicos.

Evaluación del Riesgo

La evaluación del riesgo se puede realizar de manera cuantitativa o cualitativa, dependiendo del tipo de información disponible y del objetivo de la estimación. Las matrices de riesgo constituyen una herramienta para la evaluación y gestión del riesgo. Una matriz de riesgo es una herramienta de gestión que permite registrar y conocer los riesgos relevantes que podrían afectar el logro de las metas y objetivos,

proporcionando un panorama general de los mismos e identificando sus áreas de oportunidad (Contraloría Municipal del Honorable Ayuntamiento del Municipio de Puebla, 2016).

La matriz de riesgo constituye una herramienta que permite gestionar, organizar e interpretar los fenómenos en función de los niveles de riesgo tolerables, y con ello evitar pérdidas y mitigar los desastres. Estas matrices permiten relacionar los niveles de peligro y vulnerabilidad para estimar el nivel de riesgo, cuyos resultados pueden representarse mediante mapas. La clasificación obtenida puede variar de acuerdo con los criterios empleados y con el propósito para el cual se haya elaborado la evaluación, así como el impacto que pueda representar (Jácome-Paz & Novelo-Casanova, 2025). Un ejemplo de esta matriz se aprecia en la Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de matriz de riesgo. Se contemplan 3 niveles de peligro y 3 niveles de vulnerabilidad.

		Peligro o amenaza		
		Bajo	Medio	Alto
Vulnerabilidad	Baja			
	Media			
	Alta			

Vulnerabilidad

Se define:

“Como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas. En términos generales pueden distinguirse dos tipos: la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social” (Escamilla Bouchán et al., 2011, p.4).

Inicialmente se consideraba que la vulnerabilidad estaba ligada a la resistencia física de las estructuras, poco a poco se han ido integrando las características sociales y ambientales. Si se habla de fenómenos naturales y sus impactos en la sociedad se vincula con la susceptibilidad, la sensibilidad y la falta de resiliencia, es decir la capacidad del sistema para recuperarse y adaptarse a eventos extremos.

Para hablar de vulnerabilidad, es necesario crear una percepción multidisciplinaria que abarque temas físicos, sociales y ambientales, de este modo se hace una integración completa de los riesgos, peligros y desafíos asociados a un fenómeno.

Con lo anterior, es posible determinar que la vulnerabilidad no es más que el grado de susceptibilidad al que se encuentra propenso un sistema a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un peligro y se ve determinada por factores físicos, sociales, económicos y ambientales. Además, es un componente importante para el riesgo y el componente principal para la determinación del nivel del impacto de los desastres (Jácome-Paz & Novelo-Casanova, 2025).

La Estrategia Internacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2009) engloba en 4 dimensiones los factores que generan vulnerabilidades: físicos, sociales, ambientales y económicos. Con esto, se distinguen diferentes tipos de vulnerabilidades como lo son: físicos, sociales, políticas, económicas, sistémicas entre otras. La evaluación de cada una y su unión o suma en un territorio ante un fenómeno en común da como resultado la vulnerabilidad total. Sin embargo, su análisis se hace individualmente. Para efectos de la presente investigación, y de acuerdo con la metodología empleada, la estimación se limita a vulnerabilidad social, puesto que es el componente considerado para la caracterización del riesgo volcánico.

Vulnerabilidad física

Se refiere a la localización de los asentamientos humanos en zonas de riesgo, y a las deficiencias de sus estructuras físicas para absorber los efectos de esos riesgos (Wilches-Chaux, 1993).

Frente al riesgo de terremoto, por ejemplo, la vulnerabilidad física se traduce, primero, en la localización de la comunidad en cercanías a fallas geológicas activas y, segundo, en la ausencia de estructuras sismo-resistentes en las edificaciones (Wilches-Chaux, 1993).

Está dirigida hacia la fragilidad de las estructuras ante la alteración de un fenómeno. Es necesario para cada peligro una evaluación de los diferentes factores de las estructuras y la resistencia en presencia de un impacto que sea amenazante.

Vulnerabilidad social

Vaiciulyte et al. (2025) señalan que la vulnerabilidad social es un concepto estrechamente relacionado con predisposiciones, susceptibilidades, fragilidades, debilidades, deficiencias o carencias de capacidades, que aumentan la probabilidad

de experimentar consecuencias negativas cuando se está expuesto a un fenómeno natural (sismo, huracanes, erupciones volcánicas), socioambientales (inundaciones, deslizamientos, erosión), o antropogénicos (guerras, transporte y almacenamiento de sustancias tóxicas, derrames).

Considerando al sistema humano como la suma del individuo o un grupo y sus instituciones, se han propuesto 3 ejes de investigación en el campo de la vulnerabilidad.

- El papel que juega la población de forma individual.
- La estructura, organización y funcionamiento de las instituciones involucradas en la gestión del riesgo.
- La sociedad civil, considerada como un sistema donde pueden surgir interacciones y reacciones, debido a la percepción colectiva del riesgo, contexto socioeconómico, aspectos culturales y psicológicos

Es importante subrayar que se usa un enfoque diferente cada vez que se evalúa la vulnerabilidad social y va a depender de los indicadores que se eligen y evalúen de acuerdo con la percepción que tengan las personas y no del contexto socioeconómico. Según Sánchez y Egea (2011), el contexto ambiental (que en última instancia determina la amenaza y la exposición) y social (antecedentes culturales e históricos) determinan los efectos específicos y la influencia de los factores de la vulnerabilidad. Estas variables suelen identificarse como factores socioculturales. El considerar estas variables genera un campo más claro sobre la percepción del riesgo que tiene la población.

Uno de los métodos más conocidos y utilizados para evaluar la vulnerabilidad social es el Índice de Vulnerabilidad Social (SoVI), el cual considera 30 variables socioeconómicas que contribuyen a caracterizar la capacidad de una comunidad para prepararse, responder y recuperarse frente a distintas amenazas (Cutter et al., 2003).

Partiendo del análisis de indicadores socioeconómicos y sociodemográficos se han desarrollado diversos estudios con diferentes aproximaciones y metodologías, cuyo propósito es zonificar a una población, ya sea a escala local, regional o nacional, dentro de una escala de vulnerabilidad social (Vaiciulyte et al., 2025).

El SoVI puede utilizar indicadores nacionales como los índices de pobreza, marginación, analfabetismo, producto interno bruto, para zonificar nacional o regionalmente una zona de estudio. Estos indicadores pasan por alto aspectos socioculturales y dinámicos de la población, pueden dar una idea inicial de las características de una población o una región y pueden ayudar a comprender las principales vulnerabilidades, (Vaiciulyte et al., 2025)

Capítulo 3. Área de estudio

El Pico de Orizaba se localiza en los territorios de los estados de Puebla y Veracruz, en el límite de la FVTM, y es considerado un área de gran importancia para la captación de agua y la recarga de acuíferos (CONANP, 2015).

De acuerdo con la CONANP (2015), las principales vías de comunicación se encuentran en el estado de Puebla; sin embargo, existen diversos caminos de terracería que conducen al Parque Nacional Pico de Orizaba. Algunas de estas rutas se muestran en la Figura 1. En el estado de Puebla, el municipio de Atzitzintla cuenta con una carretera secundaria proveniente de La Esperanza, que ingresa por el sur y conecta con la cabecera municipal en dirección norte.

Otra carretera secundaria proveniente de Veracruz llega al municipio y se ramifica hacia el norte y noroeste en dirección al Pico de Orizaba. En Tlachichuca, la carretera estatal Ciudad Serdán–Tlachichuca–Guadalupe Victoria conecta con la carretera federal a Veracruz, mientras que otra vía estatal proveniente de San Salvador El Seco atraviesa San Nicolás Buenos Aires y se conecta con la carretera municipal. De estas vías parten caminos secundarios hacia Paso Nacional y otras localidades, mientras que algunas poblaciones se comunican mediante caminos de terracería y brechas (CONANP, 2015).

El Pico de Orizaba, cuyo nombre en náhuatl significa “Cerro de la estrella”, se localiza en las coordenadas 19°01' N y 97°16' O y alcanza una altitud de 5,610 m s.n.m. según INEGI. Es un estratovolcán ubicado entre la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana, cuyo origen se relaciona con la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Norteamericana (Alcalá-Reygosa et al., 2020). Además, constituye una barrera topográfica entre los estados de Puebla y Veracruz.

Ubicación del Pico de Orizaba



Figura 1. Mapa de ubicación del Pico de Orizaba en el centro-oriental de México. El mapa general muestra su localización dentro del territorio nacional, así como la extensión de la FVTM y algunos de los principales volcanes que la conforman. El mapa de detalle muestra el entorno del volcán y las principales carreteras de acceso al Pico de Orizaba.

Historia Eruptiva

El Pico de Orizaba tiene una historia eruptiva que revela una intensa actividad efusiva y explosiva durante los siglos XVI y XVII y principalmente actividad fumarólica en los pasados 300 años (Carrasco-Núñez & Rose, 1995). Carrasco-Núñez y Ban (1994) realizaron un detallado estudio estratigráfico, donde llegaron a la conclusión de que su construcción había ocurrido en 4 fases eruptivas. Como se visualiza en la Figura 2.

Empezando por la etapa de evolución más antigua a la más reciente se tendría entonces el cono Torrecillas, el cono Espolón de Oro, domos silíceos periféricos y el cono Citlaltépetl.

- 1) El cono Torrecillas: inició su formación hace 0.65 ± 0.71 Ma (Höskuldsson, 1993), con la emisión de lavas de andesitas basálticas con olivino, denominadas Pilancón; estas fueron seguidas por las lavas andesíticas y dacíticas Jamapa y por las lavas Torrecillas, que consisten en andesitas con dos piroxenos, brechas y dacitas de anfíbol, fechadas en aproximadamente 0.29 ± 0.5 Ma (Carrasco-Núñez, 2000), y culminaron con la emisión de andesitas con dos piroxenos. Estas emisiones dieron origen al primer estratovolcán, conocido como Torrecillas, con un volumen aproximado de 270 km^3 . Posteriormente, la etapa constructiva de este volcán finalizó con el colapso del edificio, asociado con la formación de una caldera cuyos vestigios se encuentran al sur del cráter actual. El colapso del flanco noreste del cono Torrecillas generó una avalancha de escombros, conocida como Jamapa, que se desplazó aproximadamente 75 km hacia el este, a lo largo del río Jamapa (Höskuldsson et al., 1990; Carrasco-Núñez et al., 1993).
- 2) El cono Espolón de Oro: inició su formación con la emisión de lavas andesíticas con plagioclasas y anfíbol, que se denominan Paso de Buey, continuó con emisión de lavas dacíticas de anfíbol conocidas como Espolón de Oro (Alcalá-Reygosa et al., 2020). Después, se formó lo que se conoce como el Carnero, que se ubica en el flanco oeste con la emisión lateral de lavas andesítico-basálticas de olivino. La parte norte del volcán se emitió entre 0.15 y 0.09 Ma. Siendo una secuencia piroclástica alternada con lavas andesíticas denominada Alpanahua. Para finalizar esta etapa, Carrasco-Núñez et al. (1993) denominaron la siguiente etapa como Tetelzingo, resultado de una avalancha de escombros, la cual se transformó en un lahar cohesivo, debido a la alteración hidrotermal intensa del edificio volcánico, y también por la presencia de un glaciar. Este lahar, viajó 85 km desde el origen, alcanzó a cubrir 143 km^2 y se estimó un volumen de 1.8 km^3 .
- 3) Domos silíceos periféricos: Durante la construcción del cono Espolón de Oro se emplazaron dos domos, Tecomate ubicado al noroeste y Colorado al suroeste. El primero consiste en lavas riolíticas de obsidiana, el segundo está conformado por lavas dacíticas y flujos piroclásticos. A estos dos domos, le siguieron los domos Sillatepec y Chichihuale, al noroeste del cráter. Para finalizar, se formó el complejo de domos Chichimeco, conformado por domos y lavas andesíticas de anfíbol, cubiertos por un flujo piroclástico de escoria, datado en $8\,630 \pm 90$ años AP (Carrasco-Núñez et al., 1993).
- 4) Cono Citlaltépetl: Inició su formación hace casi 16,500 AP, dentro de los restos del cono Espolón de Oro. La actividad de esta etapa se caracterizó por la emisión de lavas dacíticas de hornblenda, conocida como Malacara, que recorrieron 13 km en el flanco suroeste del cráter. Seguidas por las lavas

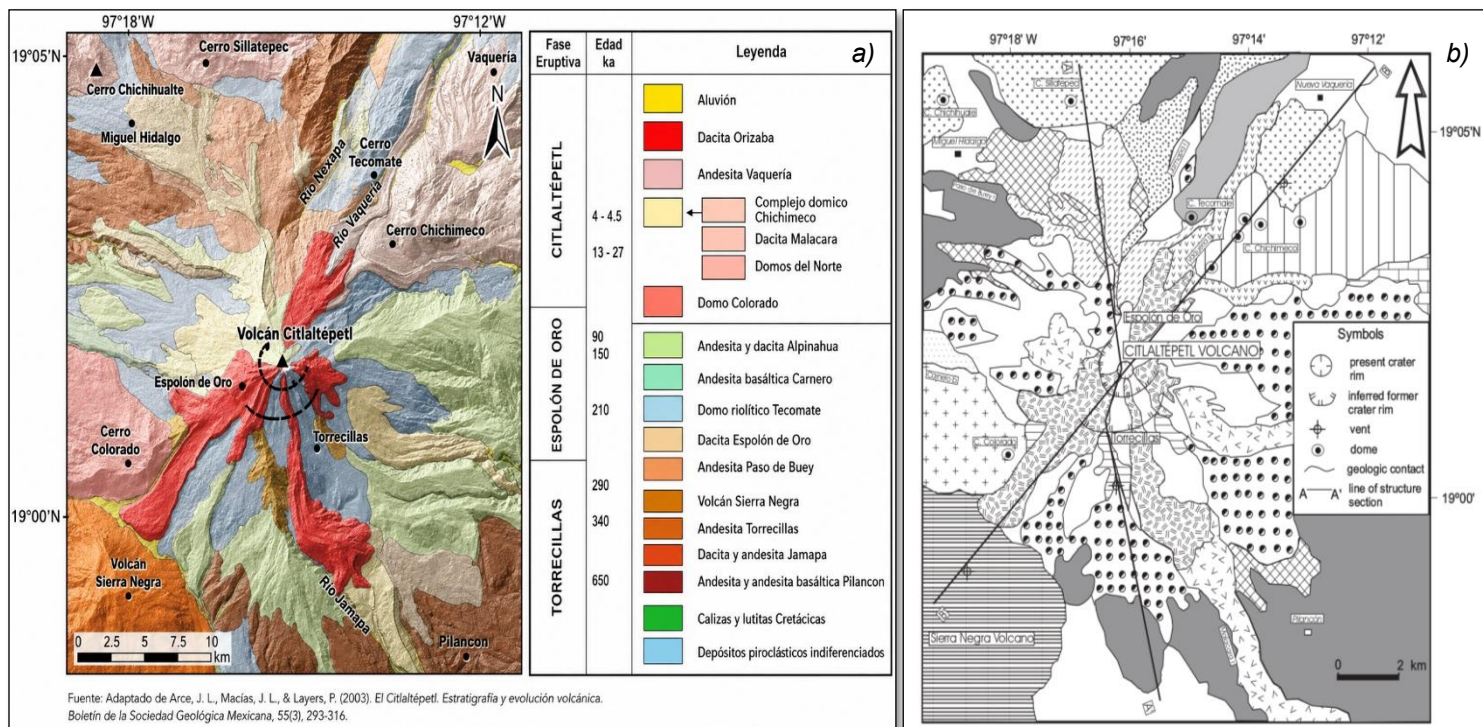


Figura 2. a) Mapa geológico del Pico de Orizaba adaptado por Arce, Macías y Layer (2003). b) Del lado derecho se encuentra Mapa estructural del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Tomado de Carrasco-Núñez (2000).

andesíticas Vaquería, compuesto por lavas andesíticas, ubicadas en el flanco noroeste del cráter. El cono actual, se construyó con la emisión hacia el suroeste y noroeste, de lavas dacíticas, conocidas como Orizaba. La formación del cono de las Citlaltépetl está asociada a erupciones efusivas, pero también a erupciones explosivas. De acuerdo con el registro estratigráfico, se sabe que existen al menos 3 eventos explosivos mayores.

- 1) La erupción que produjo flujos de pómez en el sector oriental del volcán, hace 13,000 años aproximadamente.
- 2) La secuencia eruptiva Citlaltépetl, con diversas caídas de pómez y flujos piroclásticos, ocurrida hace 8,500 y 9,000 años (Carrasco-Núñez & Rose, 1995)
- 3) Una serie de flujos de bloques y cenizas, expuestos en el flanco oeste y sureste ocurrido hace 4,100 años. s (Macías, 2005).

B)

Actividad Reciente

Las erupciones históricas del Pico de Orizaba incluyen emisiones de ceniza entre 1533 y 1539, así como emisiones de lava y ceniza en 1545 y flujos de lava en 1566. Posteriormente, se registraron emisiones de ceniza entre 1569 y 1589, además de eventos reportados en 1613, 1687 y 1846. La actividad eruptiva más reciente documentada ocurrió entre 1864 y 1867, periodo durante el cual se reportaron fumarolas, sonidos asociados con un sismo y emisiones de ceniza (De la Cruz-Reyna & Carrasco-Núñez, 2002).

Después de este periodo de actividad eruptiva, las manifestaciones más recientes relacionadas con el volcán corresponden principalmente a procesos de remoción y movilización de materiales previamente depositados en sus laderas. Estos procesos pueden desarrollarse en cauces y pendientes del edificio volcánico y dar lugar a flujos de escombros o lahares. Un evento destacado ocurrió en 1920, cuando un sismo de magnitud 6.7 desencadenó un flujo de escombros con un volumen estimado de $44 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Castañeda Bastida et al., 2018).

Otro evento relevante ocurrió el 5 de junio de 2003. En esta ocasión no se presentaron manifestaciones volcánicas, sino un fenómeno hidrometeorológico asociado con varios días de lluvias intensas. El evento generó flujos de agua y sedimentos que descendieron por diversos cauces del flanco sur del Pico de Orizaba. El flujo de mayor magnitud se concentró en el cauce que corresponde a la barranca Infiernillo, la barranca del Muerto y, en su parte baja, al río Chiquito. El evento ocasionó inundaciones y daños en las zonas bajas, además de afectar un poliducto de hidrocarburos en la población de Balastrea (Rodríguez et al., 2006).

Posteriormente, en agosto de 2012, se registró otro evento asociado con fenómenos hidrometeorológicos. Durante el paso del huracán Ernesto por Veracruz, las intensas precipitaciones provocaron un flujo de detritos en el flanco norte-noreste del Pico de Orizaba, relacionado con el sistema de drenaje del glaciar Jamapa. El evento corresponde a un lahar que se desplazó por la barranca Jamapa y que posteriormente fue reconstruido y modelado mediante evidencia dendrogeomorfológica y modelación numérica (Franco-Ramos et al., 2020; Sieron et al., 2021).

Estos antecedentes muestran que, además de los peligros asociados directamente con la actividad eruptiva, las condiciones del edificio volcánico y la presencia de materiales susceptibles de movilización pueden favorecer la ocurrencia de flujos de escombros y lahares. En los alrededores del volcán, estos procesos pueden originarse principalmente por precipitaciones intensas o por la fusión parcial de la

masa de hielo ubicada en la cumbre. De acuerdo con información de CENAPRED, más de 750,000 personas viven en un radio de aproximadamente 40 km alrededor del cráter del Pico de Orizaba, lo que evidencia la exposición de una población considerable ante los peligros asociados con el volcán.

En relación con la evaluación de los peligros volcánicos, Sheridan et al. (2001) elaboraron el Mapa de Peligros del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba), tomando en consideración la información geológica y volcanológica disponible sobre la historia eruptiva del volcán. El mapa fue elaborado mediante diferentes tipos de modelación y simulación con SIG, con el propósito de delimitar las zonas susceptibles de ser afectadas por distintos fenómenos volcánicos. El resultado se ve en la Figura 3.

La zona roja corresponde al nivel de mayor peligrosidad debido a su proximidad al cráter. Puede ser afectada por erupciones de cualquier tipo, incluidas aquellas de pequeña magnitud, que presentan una mayor frecuencia de ocurrencia. Entre los fenómenos considerados para esta zona se encuentran los flujos de lava, la caída de ceniza y bloques, los flujos piroclásticos y los flujos de lodo (Sheridan et al., 2001).

Por su parte, la zona naranja corresponde a un nivel de peligro intermedio y puede ser alcanzada principalmente por erupciones de mayor magnitud y menor frecuencia. Esta zona puede ser afectada por los mismos peligros considerados para la zona roja, con excepción de la caída de bloques incandescentes y los flujos de lava, cuya probabilidad de ocurrencia es muy baja (Sheridan et al., 2001).

La zona amarilla representa el área de menor peligro. Esta zona podría ser afectada por erupciones de gran magnitud, cuya ocurrencia es poco frecuente. Puede presentar los mismos tipos de peligros considerados para la zona naranja; sin embargo, los flujos de material incandescente que han alcanzado esta zona presentan intervalos de recurrencia de alrededor de 9,000 años. El mapa fue elaborado en 2001 a escala 1:250,000 por Sheridan et al. (2001).

MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN CITLALTÉPETL (PICO DE ORIZABA)

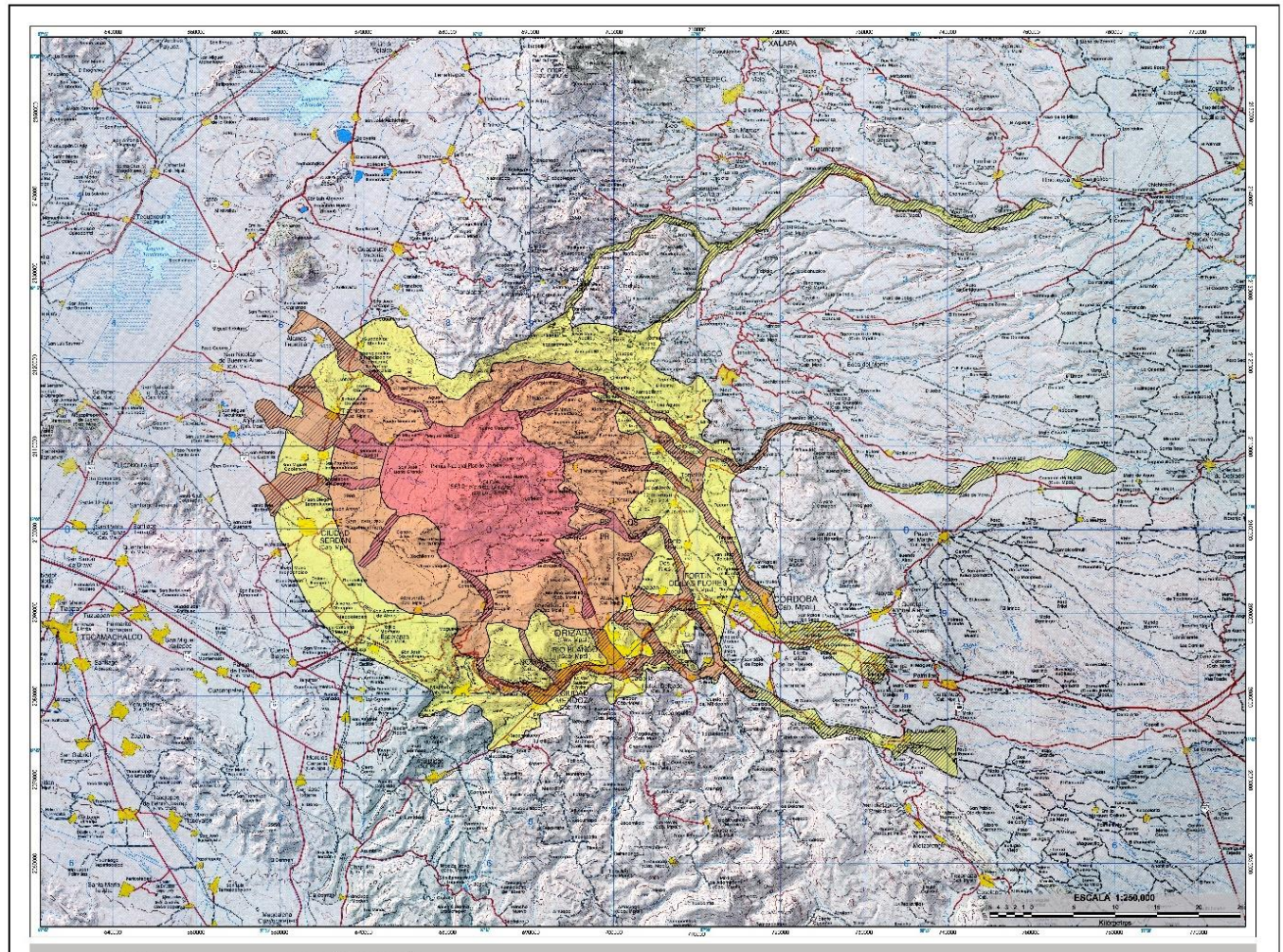


Figura 3. Mapa de peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Tomado de “Mapa de peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba)”, por Sheridan et al. (2001).

Estudios previos

El Pico de Orizaba ha sido objeto de múltiples estudios geológicos y volcanológicos. Las primeras observaciones geológicas del volcán fueron realizadas durante una excursión por Waitz (1910–1911). Posteriormente, Yáñez-García y García-Durán (1982) y Negendank et al. (1985) realizaron estudios de carácter geológico regional. A estos trabajos siguieron los estudios de Robin y Cantagrel (1982), quienes desarrollaron investigaciones relacionadas con la estratigrafía y la evolución del Pico de Orizaba. Asimismo, se realizaron estudios de carácter petrológico por Kudo et al. (1985), Singer y Kudo (1986) y Calvin et al. (1989). Posteriormente, Höskuldsson y Robin (1993), Siebe et al. (1993), Carrasco-Núñez et al. (1993), Carrasco-Núñez y Rose (1995), De la Cruz-Reyna y Carrasco-Núñez (2002) y Macías (2005) contribuyeron al conocimiento de la historia eruptiva y evolución

volcánica del Pico de Orizaba, así como a la caracterización de sus depósitos y de los peligros asociados a su actividad.

En cuanto al monitoreo y evaluación de la actividad actual, el CENAPRED considera al Pico de Orizaba un volcán activo y mantiene su vigilancia instrumental desde 1998. Entre los parámetros monitoreados se encuentran los sismos volcanotectónicos, las variaciones hidrogeoquímicas en manantiales cercanos, la deformación de los flancos del volcán y la emisión de fumarolas. De acuerdo con la información reportada por esta institución, estos parámetros no han mostrado cambios relevantes que indiquen una modificación significativa de la actividad del volcán.

A pesar de la información geológica y volcanológica disponible, Sieron et al. (2017) señalaron que el Pico de Orizaba contaba con un monitoreo básico y destacaron la necesidad de mejorar el conocimiento relacionado con los peligros volcánicos. Asimismo, el mapa de peligros disponible para el volcán corresponde a un trabajo publicado hace más de una década (Sheridan et al., 2001), por lo que resulta necesario actualizar y complementar la información disponible. En este sentido, estudios posteriores han incorporado información sobre la distribución de volcanes monogenéticos, fechamientos de depósitos, composición química, morfología volcánica, perfiles estratigráficos y características de la geología regional, contribuyendo al conocimiento del vulcanismo de la región de Veracruz.

En este contexto, Zavaleta Melo (2025) analizó los mapas de peligro volcánico por caída de piroclastos elaborados con la información publicada sobre la actividad eruptiva del Pico de Orizaba. El estudio estimó la vulnerabilidad física y social en un radio de 25 km alrededor del cráter y, con base en esta información, elaboró cartografía de riesgo para dos escenarios eruptivos.

El primer escenario se basó en una erupción ocurrida hace aproximadamente 8,270 años, caracterizada por la emisión de una columna eruptiva de 25.41 km de altura, un volumen aproximado de 0.14 km³ y un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) de 4 (Zavaleta Melo, 2025). El segundo escenario correspondió a una erupción de tipo pliniano, para la cual se estimó una columna eruptiva de 27.8 km de altura, un volumen total de emisión de 0.44 km³ y un VEI de 4.44 (Zavaleta Melo, 2025).

La modelación de ambos escenarios permitió identificar diferencias en la distribución espacial del riesgo entre los estados de Veracruz y Puebla. De acuerdo con Zavaleta Melo (2025), Veracruz presentó una mayor afectación debido a la cantidad de localidades ubicadas dentro de las zonas clasificadas con niveles de riesgo extremo, muy alto y alto, mientras que Puebla presentó una menor afectación tanto en extensión territorial como en número de localidades. El estudio también identificó limitaciones en la disponibilidad de información relacionada con variables

sociales, entre ellas la etnicidad, la edad, la discapacidad, el nivel educativo y el acceso a servicios médicos, las cuales fueron consideradas para la caracterización de la vulnerabilidad de la población.

Más recientemente, Torres-Orozco et al. (2026) realizaron una reconstrucción estratigráfica, sedimentológica, petrográfica y geoquímica de las erupciones holocenas Citlaltépetl Inferior y Citlaltépetl Superior del Pico de Orizaba. Comenzando desde el análisis de depósitos de caída y corrientes de densidad piroclástica, los autores caracterizaron ambos eventos como erupciones explosivas multifásicas con características eruptivas contrastantes. Asimismo, estimaron parámetros eruptivos como la altura de columna, la tasa de emisión de masa, el volumen eruptivo y la magnitud. Las fases de caída analizadas corresponden a estilos subplinianos a plinianos, con alturas de columna de aproximadamente 21 a 30 km (Torres-Orozco et al., 2026).

El estudio también generó mapas de distribución de los depósitos de caída y de las corrientes de densidad piroclástica, con los cuales se reconocieron diferentes estilos y procesos eruptivos, así como variaciones en la dispersión y el alcance de los depósitos. Esta información resulta relevante para la evaluación del peligro volcánico, ya que permite considerar diferentes estilos eruptivos y sus características de dispersión al establecer escenarios de peligro. En este sentido, los resultados de Torres-Orozco et al. (2026) proporcionan una base estratigráfica y volcanológica reciente para incorporar distintos estilos eruptivos en la construcción de escenarios de peligro por caída de ceniza en el Citlaltépetl.

Capítulo 4. Metodología

El enfoque principal del capítulo cuatro es describir la metodología empleada a lo largo de la investigación, detallando los procedimientos, técnicas y herramientas utilizadas. En este capítulo se justifican los criterios considerados para la delimitación de la zona de estudio, así como las distinciones establecidas para diferenciar las variables analizadas y la definición de los rangos aplicados.

Dentro de este proceso, el SIG constituyó una herramienta fundamental para la organización, procesamiento, análisis e integración espacial de la información, permitiendo relacionar los diferentes componentes considerados en la estimación del riesgo volcánico. Mediante el uso del SIG se integraron los datos correspondientes al peligro, la exposición y la vulnerabilidad, además se genera la cartografía para su representación y análisis. En la Figura 4 se contempla el esquema general de la metodología empleado, en el que se sintetiza el flujo de trabajo y el papel de los SIG como herramienta de integración y análisis a lo largo de las diferentes etapas de la investigación.

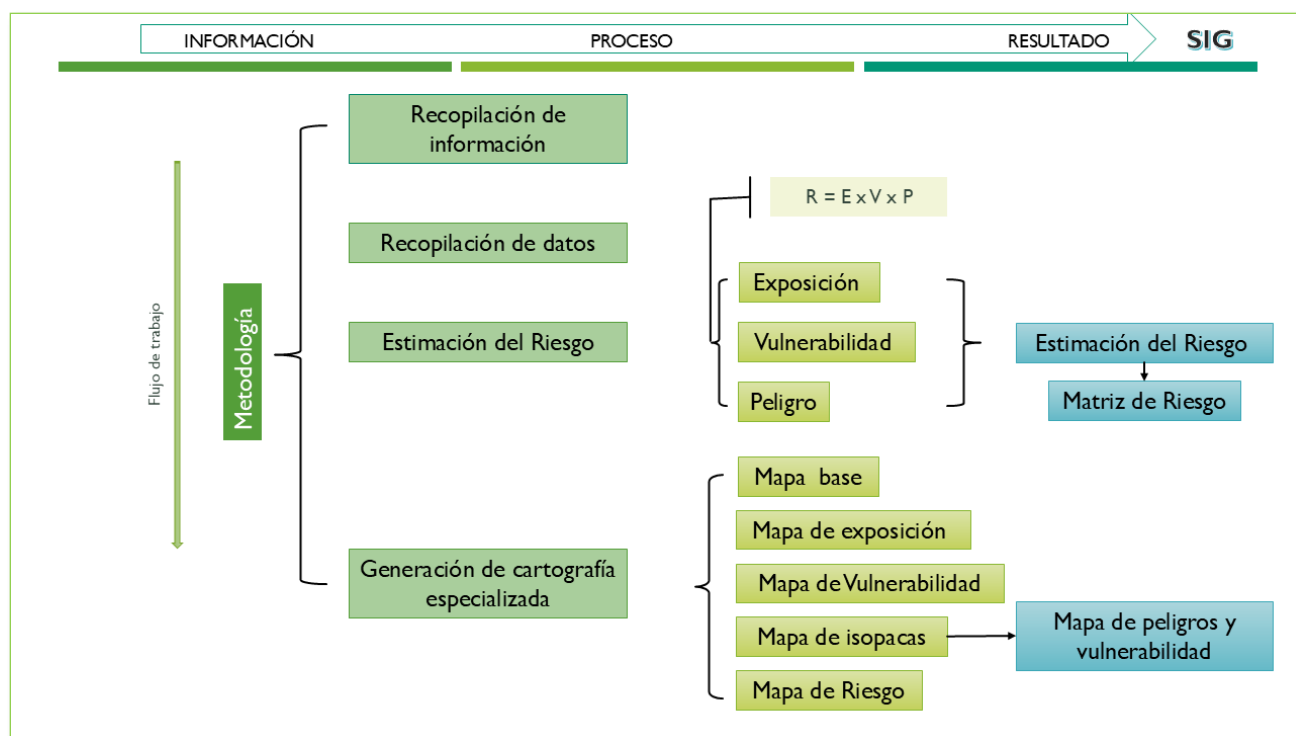


Figura 4. Esquema de metodología. El esquema sintetiza el flujo de trabajo seguido para la recopilación, procesamiento e integración de la información relacionada con el peligro, la exposición y la vulnerabilidad, así como los principales productos obtenidos durante el desarrollo de la investigación. Elaboración propia.

Recopilación de información

En esta etapa de la investigación, se realizó la recopilación de información bibliográfica y estadística que describe los conceptos básicos de vulcanología que son importantes para la caracterización volcánica del Pico de Orizaba, posteriormente, se desarrolla la historia eruptiva del Pico de Orizaba, especificando los peligros volcánicos asociados al volcán.

Finalmente, se consultaron los conceptos más importantes, peligro, vulnerabilidad, exposición y riesgo.

Dentro de las principales fuentes consultadas fueron:

- Servicio Geológico Mexicano
- CENAPRED
- Evaluación del Riesgo Geológico. Libro de Enseñanza recién publicado: *Jácome Paz, M. P. (Coord.). (2025). Evaluación de riesgo geológico: libro de enseñanza. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica.* <https://doi.org/10.22201/igef.9786076420515e.2024>
- El estudio del vulcanismo activo en el observatorio sismológico y vulcanológico del centro de ciencias de la tierra de la Universidad Veracruzana.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Repositorio de datos

Los datos iniciales fueron extraídos principalmente de INEGI, a partir de 12 cartas topográficas a escala 1:50,000: E14B35, E14B36, E14B37, E14B45, E14B46, E14B47, E14B55, E14B56, E14B57, E14B65, E14B66, E14B67.

De estas cartas se extrajeron archivos en formato vectorial tipo shape, los cuales contienen información geoespacial usadas en el análisis de la zona de estudio. Entre las principales capas extraídas se encuentran:

- Localidades (incluyen número de habitantes, nombres de las localidades y clasificación entre rural y urbana).
- Infraestructura (servicios médicos).
- Red de transporte (caminos, carreteras, vías férreas y aeropuertos).
- Datos hídricos (corrientes de agua, tanques de almacenamiento, localización de pozos).

Iniciando desde estas variables se elaboraron mapas de exposición, que permiten identificar la infraestructura más crítica de la zona, la red hidrológica, las poblaciones con mayor concentración poblacional y las principales rutas de evacuación.

Por otro lado, para el análisis de vulnerabilidad social se utilizaron los datos a nivel de Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), obtenidos del Sistema de Consulta de Información Censal (SCINCE), correspondiente al año 2020. De este repositorio se descargaron archivos en formato CSV que contienen indicadores expresados en porcentajes, seleccionados con base en su relevancia con el estudio:

- **Discapacidad:** porcentaje de población con alguna limitación física o mental.
- **Nivel Educativo:** porcentaje de población de 15 años o más en condición de analfabetismo. Considerada por la limitación de entender información escrita o la dificultad de comunicarse por escrito.
- **Etnia:** porcentaje de población de 3 años o más que habla alguna lengua indígena. Seleccionada debido a posibles barreras en la comprensión de información oficial emitida principalmente en español.
- **Edad:** porcentaje de población de 0 a 14 años y de 60 años y más. Considerado solamente a los y las personas menores de edad y adultos mayores.
- **Sin Servicios médicos:** porcentaje de la población que no se encuentra afiliada a ningún servicio de salud.

Estos datos constituyen la base para la construcción de los índices de vulnerabilidad social.

Obtención de los componentes del Riesgo

Exposición

Con el fin de delimitar la zona de estudio, se utilizaron los mapas de distribución de depósitos de caída y de corrientes de densidad piroclástica (PDC) de Torres-Orozco et al. (2026). Para los depósitos de caída se consideraron las unidades UC2, UC4 y UC6, correspondientes a fases eruptivas con estilos subpliniano y pliniano. En particular, UC2 se asocia con una columna subpliniana de 21 ± 3.8 km de altura, UC4 con una columna pliniana de 29 ± 0.9 km, UC6 con una columna subpliniana en disminución de 24 ± 0.4 km. Considerando la distribución espacial de estos depósitos se estimaron sus distancias mínima y máxima respecto al cráter, utilizando las elipses de las isopacas como referencia.

Para obtener las distancias de referencia partiendo las elipses, se trazaron líneas secantes que permitieron identificar los puntos de intersección entre la geometría de las isopacas y las líneas de referencia. Posteriormente, mediante una mediatriz

se estableció la dirección perpendicular utilizada para representar la dimensión transversal del depósito. Aprovechando la escala cartográfica se midieron las distancias correspondientes desde el cráter hacia los extremos de cada elipse. De esta manera se obtuvieron las distancias mínima y máxima utilizadas para caracterizar la distribución espacial de cada depósito. El trazo de estas líneas se observar en la Figura 5.

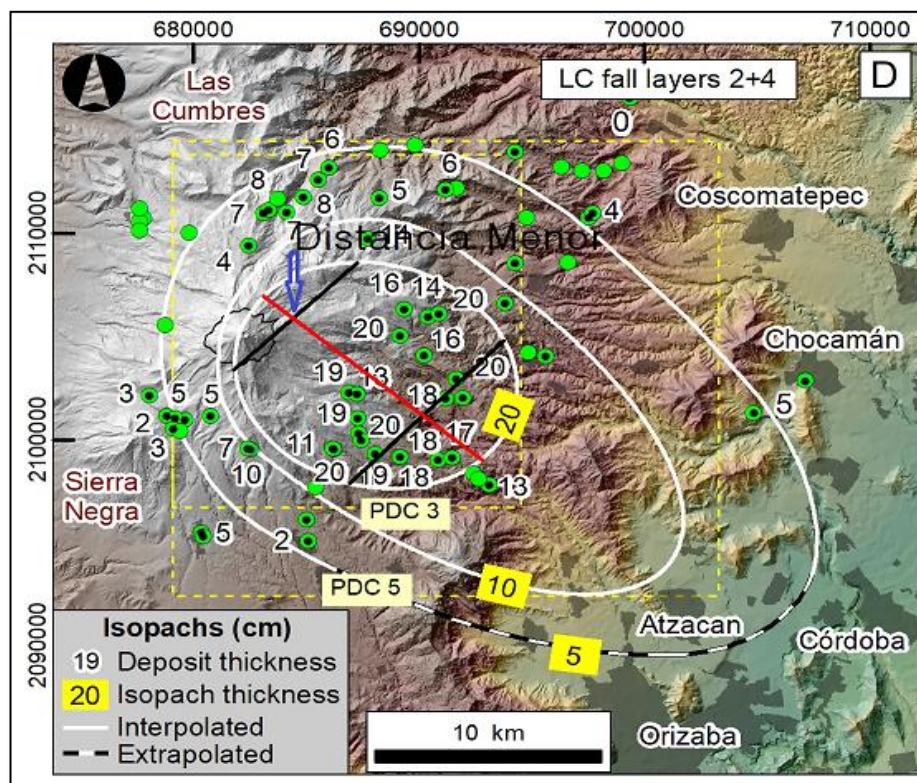


Figura 5. Mapa de distribución de depósitos de caída y de corrientes de densidad piroclástica del Citlaltépetl Inferior (LC). Los números con contorno blanco indican los espesores o tamaños medios de los clastos medidos en campo en los lugares donde los depósitos están expuestos. Los cuadros amarillos muestran los espesores de cada isopaca (Torres-Orozco et al., 2026). Las líneas negras ejemplifican las secantes trazadas para determinar los extremos de las elipses y la línea roja determina la mediatriz trazada para determinar la máxima amplitud de la isopaca. Modificado de (Torres-Orozco et al., 2026).

En la Tabla 2 se exponen las distancias estimadas para cada isopaca. Tomando en cuenta estos valores, se seleccionó la distancia máxima correspondiente al mapa UC Fall Layer 4 E, de aproximadamente 52.3 km, como referencia para la delimitación del área de estudio. Es importante señalar que estas distancias se emplearon únicamente como criterio para establecer la extensión de la zona de estudio. Con base en ello, se generó un *buffer* de 50 km de radio alrededor del cráter del volcán, el cual permitió delimitar el área de mayor influencia considerada para

los escenarios eruptivos analizados y, por consiguiente, la zona de estudio de esta tesis.

Tabla 2. Describe las distancias mínimas y máximas de los mapas de isopacas e isopletras. La Distancia Menor corresponde a la distancia más corta entre el cráter y el borde de la isopaca o isopletra correspondiente, mientras que la Distancia Mayor corresponde a la distancia más larga entre el cráter y dicho borde. Se resalta el mapa de la unidad UC fall layer 4 debido a que posee la mayor distancia calculada y gracias a este cálculo se delimitó a 50 km el área de estudio.

Isolínea	Mapa	Distancia Menor (km)	Distancia mayor (km)
Isopacas 2 Anillo 35 km	UC fall layer 2 D	20	33.2
Isopacas 1 Anillo 40 km	UC fall layer 4 E	22.3	52.3
Isopacas Anillo 30 km	UC fall layer 6 F	11.4	25.7
Isopacas 3 Anillo 40 km	LC fall layer 2 + 4 D	12.7	32.1
Isopletras Anillo 30 km	LC fall layers 2 + 4 Dense clasts E	8.4	26.6
Isopletras Anillo 35 km	LC fall layers 2 + 4 Scoria clasts F	6.6	28.1
Isopletras Anillo 30 km	UC fall layer 2 - Dense Clasts A	12	25.8
Isopletras Anillo 30 km	UC fall layer 2 - Scoria B	9.4	31.1
Isopletras Anillo 30 km	UC fall layer 4 - Dense clasts C	10.8	29.7
Isopletras anillo 30 km	UC fall layer 4 - Scoria D	11.7	29.7
Isopletras Anillo 30 km	UC fall layer 6 - Dense clasts E	10	20.8
Isopletras Anillo 30 km	UC fall layer 6 - Scoria F	10.3	18.8

Nomenclatura e interpretación de las unidades

- **UC (Upper Citlaltépetl) fall layer 2 (UC2)** : Columna de poca intensidad, marca el inicio de la erupción pliniana. Corresponde a una fase subpliniana temprana. Su dispersión principal fue hacia el noreste

- **UC (Upper Citlaltépetl) fall layer 4 (UC4):** Columna pliniana de mayor energía. Presentó la mayor dispersión de los depósitos de caída estudiados, principalmente hacia el este.
- **UC (Upper Citlaltépetl) fall layer 6 (UC6):** corresponde a una fase subpliniana. Los autores interpretan esta fase como el remanente decreciente de la columna Pliniana de UC4
- **LC (Lower Citlaltépetl) fall layer 2 + 4:** Erupción pliniana, dividida por un PDC 3 (oleada) que no interrumpe la columna, solo es un colapso parcial de la misma columna.

Con esta delimitación hecha, se incorporaron las capas vectoriales tipo shapes provenientes de las cartas topográficas de INEGI. De estas capas se extrajo la información tabular en formato CSV correspondiente a las localidades dentro del área limitada por los 50 km.

Con el fin de optimizar el procesamiento y análisis estadístico de los datos, se desarrolló un código en el software RStudio, capaz de estandarizar y analizar la información.

El código implementado permitió:

1. Contabilizar el número total de localidades
2. Clasificar las localidades en rurales y urbanas
3. Calcular el total de población
4. Estandarizar el formato de los archivos CSV
5. Calcular el porcentaje por tipo de localidad
6. Generar gráficos de distribución
7. Identificar las localidades con mayor concentración poblacional
8. Filtrar solo las localidades con más de 20,000 habitantes
9. Generar tablas y gráficos específicos para dichas localidades.

El código desarrollado se incluye en el Anexo 1.

Estimación de vulnerabilidad Social

Para la estimación de la vulnerabilidad social se usaron los datos de los AGEB's, los datos que del csv que se descarga contienen información similar a la Tabla 2:

Tabla 3. Distribución de los datos descargados del SCINCE 2020.

Rango	cvegeo	AGEB urbana	Valor
3	3004400010010	3004400010010	15.3

El primer valor de Rango es un número que trae directamente, cvegeo es la clave que identifica cada unidad territorial en México, los dígitos corresponden a la clave del Estado (30), Municipio (044), Localidad (0010) y AGEB (010). AGEB urbana es la misma clave, pero en algunos csv puede solo mostrar los últimos 3 dígitos, por último, el valor corresponde al porcentaje de la población del AGEB que presenta la característica asociada al indicador seleccionado durante la descarga; por ejemplo, el porcentaje de población no afiliada a servicios de salud (15.3)

Los indicadores se expresaron como porcentajes respecto a la población de cada AGEB, permitiendo comparar las unidades territoriales independientemente de su tamaño poblacional.

Con las poblaciones filtradas y seleccionadas se prosiguió a la descarga de cada una de las variables seleccionadas (discapacidad, etnicidad, nivel educativo, edad y servicios médicos) para cada una de las localidades. Teniendo todos los csv, se inició con la construcción de rangos, el objetivo era establecer rangos de intervalos iguales. De tal manera que los datos de valores continuos se transformaran a categorías cualitativas, facilitando la comparación entre variables y formar niveles de interpretación.

Para la determinación de los rangos, en un mismo Excel se unieron todas las localidades seleccionadas de la misma variable, teniendo el conjunto de datos completo, se identificó el valor mínimo y máximo dentro de todo el conjunto de datos y con ellos se calculó el rango con la siguiente fórmula:

$$\text{Rango total} = \text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo} \dots\dots\dots (1)$$

Después, el rango total se dividió entre el número de clases o categorías elegidas (Muy bajo, Bajo, Medio y Alto), para ello se usó la siguiente fórmula:

$$\text{Tamaño del intervalo} = \text{Rango total} / \text{Número de clases} \dots\dots\dots(2)$$

Con este procedimiento se logró establecer intervalos de igual amplitud. Los intervalos se definieron considerando el valor mínimo, incrementando sucesivamente el tamaño del intervalo hasta cubrir el rango total. De esta manera, los datos se clasificaron en cuatro categorías (muy bajo, bajo, medio y alto), cada una con igual amplitud.

Una vez realizada la clasificación individual de cada uno de los indicadores, se asignaron valores numéricos de acuerdo con el nivel de vulnerabilidad obtenido: 1 para Muy Bajo, 2 para Bajo, 3 para Medio y 4 para Alto. Esta asignación permitió representar numéricamente el nivel de vulnerabilidad de cada AGEB para cada uno de los indicadores analizados. Posteriormente, los resultados de las clasificaciones se integraron en una nueva base de datos, en la cual se concentraron los AGEB y los valores correspondientes a cada indicador. Desde la base recién creada, se realizó la suma de los valores asignados a cada indicador para cada AGEB, con el propósito de integrar en un único valor los diferentes componentes considerados en la estimación de la vulnerabilidad social. Como resultado, se obtuvo un valor acumulado de vulnerabilidad para cada AGEB, el cual posteriormente fue utilizado para establecer la clasificación de la vulnerabilidad total.

Con los valores acumulados se realizó una segunda clasificación siguiendo el mismo procedimiento empleado para la clasificación individual de los indicadores. En primer lugar, se identificaron los valores máximo y mínimo del conjunto de datos y se determinó un nuevo rango mediante la **Fórmula 1**. Posteriormente, para la construcción de los niveles de vulnerabilidad total, el nuevo rango se dividió entre el número de categorías establecidas, utilizando la **Fórmula 2**, con lo cual se determinó el tamaño del intervalo correspondiente a cada categoría.

En resumen, la clasificación final de la vulnerabilidad total se obtuvo mediante la integración de los diferentes indicadores. Primero, cada indicador fue clasificado individualmente en cuatro niveles y convertido a una escala numérica de 1 a 4. Posteriormente, los valores correspondientes a los distintos indicadores fueron sumados para cada AGEB y el resultado de esta suma fue clasificado nuevamente en tres categorías: baja, media y alta. De esta manera, la clasificación final representa el comportamiento conjunto de los indicadores seleccionados para cada AGEB.

Caracterización de peligro volcánico

Para iniciar con la caracterización del peligro, es importante señalar que, si bien se utilizaron como referencia los mapas de peligro elaborados por Torres-Orozco et al. (2026), en los cuales se caracterizan tanto PDC's como los depósitos de caída asociados a los eventos del Citlaltépetl Inferior y Superior, para la estimación del peligro en este trabajo se consideraron únicamente las isopacas correspondientes a los depósitos de caída ceniza del evento del Citlaltépetl Superior.

La selección de este evento se debe a que sus depósitos de caída presentan una mayor extensión espacial desde el centro emisor hacia la periferia, permitiendo representar una zona de afectación más amplia. Asimismo, la distribución espacial de estos depósitos comprende las áreas de afectación asociadas a los PDC considerados en el estudio, por lo tanto, su incorporación como un componente independiente fue descartado. De igual manera, los PDC y los depósitos de caída asociados al Citlaltépetl Inferior fueron descartados, debido a que su zona de afectación se encuentra comprendida dentro de la extensión representada por el evento del Citlaltépetl Superior. Con base en estos criterios, la caracterización del peligro se realizó en función de las isopacas de los depósitos de caída correspondientes al Citlaltépetl Superior. En la Tabla 4 se exponen las principales características de los escenarios seleccionados para el desarrollo de los mapas de riesgo, cuyos parámetros fueron obtenidos de Torres-Orozco et al. (2026).

Tabla 4. Describe las principales características para los 3 eventos analizados.

Escenario	Edad	Estilo eruptivo	Altura de columna	Dispersión principal	Área reportada
UC2	~9200 cal BP	Subpliniano	21 ± 3.8 km	Noreste	200–650 km ² para isopacas de 4–8 cm
UC4	~9200 cal BP	Pliniano	29 ± 0.9 km	Este	160–1500 km ² para isopacas de 5–30 cm
UC6	~9200 cal BP	Subpliniano en disminución	24 ± 0.4 km	Este	60–430 km ² para isopacas de 5–20 cm

Los escenarios eruptivos considerados fueron los siguientes:

- UC (Upper Citlaltépetl) fall layer 2, más adelante identificado como UC2.
- UC (Upper Citlaltépetl) fall layer 4, más adelante identificado como UC4.

- UC (Upper Citlaltépetl) fall layer 6, más adelante identificado como UC6.

Una vez establecidos los escenarios eruptivos se procedió con la estimación del peligro, para ello se inició con la digitalización de las isopacas obtenidas del mapa de peligros de Torres-Orozco et al. (2026), con el objetivo de obtener tres parámetros principales: área, downwind (DW) y crosswind (CW).

El primer parámetro se obtuvo mediante la generación de polígonos que delimitaron el área de cada una de las isopacas. Posteriormente, en la tabla de atributos de cada polígono, se calculó el área correspondiente.

El parámetro DW se determinó utilizando inicialmente la herramienta “Extraer vértices”, aplicada sobre los polígonos de cada isopaca, con el fin de generar vértices distribuidos alrededor de la elipse. Posteriormente, tomando como referencia el punto correspondiente al centro del volcán, se empleó la herramienta “Matriz de distancia”, la cual permitió calcular la distancia entre el cráter y cada uno de los vértices generados. Finalmente, se seleccionó la distancia máxima registrada entre el cráter y el borde de la elipse, correspondiente a la dirección de máxima dispersión del depósito.

Para la obtención del parámetro CW se utilizó la herramienta “Geometría mínima delimitadora”, la cual genera una geometría simple que envuelve el polígono seleccionado. Este procedimiento permitió obtener un ajuste de la amplitud máxima de la elipse en dirección perpendicular al downwind. Con los datos reflejados en la tabla de atributos de la geometría generada, se obtuvo la medida correspondiente a la máxima amplitud transversal del depósito.

Los parámetros anteriores fueron empleados para realizar la interpolación de las isopacas. Debido a que se contaba con tres escenarios de peligro y que los espesores mínimos disponibles correspondían a 4 y 5 cm, se realizó una interpolación con el objetivo de estimar la isopaca asociada a depósitos de 1 cm de espesor, considerando la tendencia de los datos existentes.

La interpolación se llevó a cabo mediante la elaboración de gráficas de espesor contra área, espesor contra DW y espesor contra CW. Empleando dichas relaciones se obtuvieron funciones de ajuste de tipo exponencial. Cabe señalar que este método fue seleccionado debido a que este comportamiento ha sido documentado en la literatura, demostrando que los depósitos de tefra presentan una disminución del espesor con respecto a la distancia y área cubiertos, este comportamiento puede ser descrito mediante funciones exponenciales (Pyle, 1989; Fierstein y Nathenson, 1992). Además, este tipo de ajuste permite representar el adelgazamiento progresivo de los depósitos volcánicos y ha sido empleado para la reconstrucción de isopacas y la estimación de parámetros eruptivos.

Finalmente, las ecuaciones obtenidas permitieron estimar las características geométricas de las isopacas de 1 cm para cada uno de los escenarios eruptivos analizados. El siguiente paso fue obtener el valor del eje mayor de cada elipse, pues con el método anterior obtuvimos solo el CW que se tomó como el eje menor de la elipse y el área correspondiente pero el DW corresponde solo a la distancia entre el volcán y la máxima distancia horizontal de la elipse. La representación gráfica se puede ver en la ilustración 6.

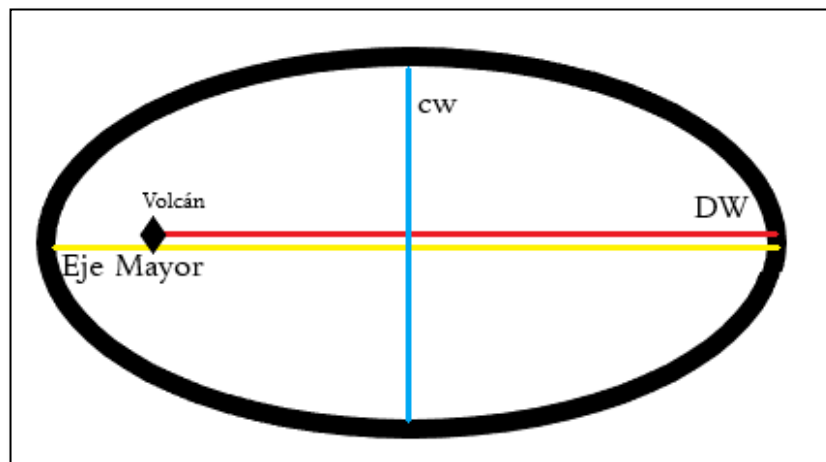


Figura 6. Diagrama de ejes de las elipses. La línea azul corresponde al crosswind, la línea roja al downwind, la línea amarilla al eje mayor completo y el rombo indica la posición del volcán Pico de Orizaba.

El cálculo de este valor se obtuvo mediante la ecuación del área de la elipse, solo haciendo el despeje para obtener el valor del eje mayor.

$$\text{Área} = \pi * \frac{a}{2} * \frac{b}{2} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

donde a es el eje mayor y b el eje menor

$$a = \frac{4 * \text{Área}}{\pi * b} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Al obtener este valor se aseguraba mantener el valor del CW, DW y área estimada.

Ahora bien, una vez que se estimaron las isopacas correspondientes al espesor de 1 cm, fue necesario establecer una escala de peligro asociada a la caída de ceniza. Dado que no hay una clasificación universal que relacione directamente los espesores de acumulación con los niveles de peligro, se desarrolló una escala propia basada en los impactos documentados en la literatura científica para distintos escenarios de caída de ceniza.

Para la construcción de esta escala, se revisaron diversos estudios relacionados con la evaluación de efectos físicos y económicos generados por la acumulación de

ceniza volcánica. Entre las principales referencias utilizadas se encuentran los trabajos de Blong (1996), que documenta los efectos de la caída de ceniza sobre la infraestructura, los servicios y las actividades humanas; Wilson et al. (2015), analizan las consecuencias de diferentes espesores de depósito en las personas, la infraestructura, la agricultura, las construcciones y en lo económico; Jenkins et al. (2015), quienes evalúan la vulnerabilidad y los impactos potenciales asociados a los distintos escenarios de caída de ceniza; y Blong et al. (2017), que recopila y sintetiza los principales efectos observados en varios eventos eruptivos alrededor del mundo.

Empezando desde la comparación de los umbrales de impacto reportados por estos autores, se identificaron rangos de espesores asociados a incrementos en la gravedad de los impactos, incluyendo problemas leves de salud, interrupciones en el transporte, daños en la agricultura y ganadería, afectaciones a la infraestructura, posibles fallas estructurales y los impactos económicos en diferentes sectores. Con base en estos parámetros se definieron categorías de peligro, con el objetivo de representar de manera consistente el aumento del riesgo conforme se incrementa la acumulación de ceniza.

Clasificación de niveles de peligro

Para cada escenario se obtuvieron isopacas complementarias. En el escenario UC2 al finalizar el proceso de determinar isopacas correspondientes a 1,4,5, 6, 8 y 10 cm; para el escenario UC4 se obtuvieron isopacas de 1,5, 10, 20 y 30 cm; mientras que para el escenario UC6, se generaron isopacas de 1, 5, 10 y 20 cm.

Tomando en consideración las isopacas fue necesario establecer las zonas con diferentes niveles de peligro. Sin embargo, no hay una clasificación universal que indique la relación del nivel de peligro conforme la variación del espesor. Por ello, la clasificación propuesta en este estudio se fundamentó tomando en consideración el rango de afectación reportados en la literatura para la caída de ceniza volcánica, donde el incremento del espesor del depósito se asocia con mayores impactos sobre la población, la infraestructura crítica, agricultura, ganadería y actividades económicas (Blong, 1996; Jenkins et al., 2012; Jenkins et al. 2014; Jenkins et al. 2015 y Blong et al., 2017).

Con base en estos antecedentes y considerando los espesores disponibles para los escenarios analizados, se establecieron cuatro niveles de peligro: Bajo, Medio, Alto y Muy Alto. Para su delimitación se utilizaron como principales umbrales las isopacas de 1, 5 y 10 cm, debido a que estos valores permiten diferenciar rangos con un incremento progresivo en la magnitud de los impactos asociados a la

acumulación de ceniza. La clasificación adoptada no pretende establecer una relación universal entre espesor y nivel de peligro, sino proporcionar un criterio homogéneo para la caracterización y comparación espacial de los escenarios eruptivos considerados en este estudio.

Asimismo, la selección de los intervalos se realizó considerando la distribución de las isopacas reconstruidas por Torres-Orozco et al. (2026). El escenario UC4 presenta la mayor acumulación, con una isopaca máxima de 30 cm, seguido por UC6, con 20 cm, mientras que UC2 presenta un espesor máximo de 10 cm. Esta distribución permitió establecer intervalos comunes para los tres escenarios y, de esta manera, mantener un criterio de clasificación comparable entre ellos.

La dirección de dispersión utilizada en esta investigación corresponde a la distribución observada en los depósitos de caída reconstruidos por Torres-Orozco et al. (2026), por lo cual se representa la dispersión asociada a las condiciones atmosféricas existentes durante las erupciones estudiadas. Esta dirección no se asume necesariamente equivalente a los patrones actuales de viento. En consecuencia, los escenarios desarrollados se basan en la distribución espacial de depósitos documentada y no constituyen una simulación de la dispersión bajo condiciones meteorológicas actuales.

Los intervalos de espesor utilizados para definir cada nivel de peligro, así como los principales impactos asociados con la acumulación de tefra reportados en la literatura, se plantean en la Tabla 5.

Tabla 5. Principales impactos asociados a diferentes espesores de acumulación de ceniza reportados en la literatura.

<i>Espesor de acumulación</i>	<i>Principales impactos</i>
1–10 mm	Molestias respiratorias y oculares, especialmente en población vulnerable; reducción de la visibilidad y afectaciones al transporte. Puede presentarse contaminación de agua, interrupción de algunos servicios e inconvenientes en actividades cotidianas y económicas. En agricultura pueden presentarse afectaciones a cultivos y ganado, dependiendo de las características de la ceniza.
10–50 mm	Afectaciones importantes al transporte terrestre y aéreo, disminución de la funcionalidad de infraestructura y equipos sensibles, incremento de las necesidades de limpieza y posibles interrupciones en servicios de agua, electricidad y drenaje. En agricultura pueden presentarse daños en cultivos y pastizales, así como problemas para el ganado por contaminación de agua y alimento.

<i>Espesor de acumulación</i>	<i>Principales impactos</i>
50–100 mm	Acumulación considerable de ceniza y aumento de las cargas sobre techos y otras estructuras. Se incrementan los daños a infraestructura, las interrupciones de servicios y las dificultades para el transporte. Las actividades agrícolas pueden sufrir pérdidas importantes y los volúmenes de ceniza requieren mayores recursos y tiempo para su remoción.
>100 mm	Daños severos a infraestructura y edificaciones vulnerables, con posibilidad de daño estructural dependiendo de las características de la construcción, densidad y humedad de la ceniza. Puede producirse enterramiento o pérdida de cultivos, daños a vegetación, interrupciones prolongadas de servicios y transporte, y elevados costos de limpieza, recuperación y pérdidas económicas.

Determinación del Riesgo volcánico

Para la construcción de la matriz de riesgo se consideraron los niveles de vulnerabilidad y peligro previamente establecidos. Debido a que la vulnerabilidad fue clasificada en 3 categorías (Baja, Media y Alta) y el peligro en 4 categorías (Bajo, Medio, Alto y Muy alto), se generó una matriz de 3 x 4 clases.

Para realizar la estimación del riesgo, a cada categoría se le asignó un valor numérico ordinal. Para la vulnerabilidad se le asignaron valores de 1, 2 y 3 a las categorías Baja, Media y Alta, respectivamente. De manera similar, para el peligro se realizó lo mismo, 1, 2, 3 y 4 para las categorías Bajo, Medio, Alto y Muy alto.

Una vez reclasificadas ambas variables, el riesgo volcánico se estimó mediante la suma de los valores de peligro y vulnerabilidad para cada AGEB analizada. De esta manera, los valores resultantes pueden variar entre 2 y 7, donde el valor mínimo corresponde a la combinación de vulnerabilidad y peligro bajo, mientras que el valor máximo corresponde a la combinación de vulnerabilidad alta y peligro muy alto.

Para hacer explícito el procedimiento utilizado para la estimación del riesgo, la Tabla 6 presenta la matriz resultante de combinar las categorías de peligro y vulnerabilidad. Cada celda representa la suma de los valores asignados a ambas variables y permite identificar los valores de riesgo obtenidos para las diferentes combinaciones posibles.

Tabla 6. Matriz de combinación de los niveles de peligro y vulnerabilidad para la estimación del riesgo volcánico.

	NIVEL	VULNERABILIDAD		
		BAJO (1)	MEDIO (2)	ALTO (3)
PELIGRO	BAJO (1)	2	3	4
	MEDIO (2)	3	4	5
	ALTO (3)	4	5	6
	MUY ALTO (4)	5	6	7

En función de los valores obtenidos mediante la matriz, se establecieron 3 categorías de riesgo: Bajo, Medio y Alto. Los umbrales utilizados para delimitar cada categoría se plantean en la Tabla 7.

Tabla 7. Umbrales para la clasificación del riesgo volcánico.

Intervalo	Nivel de Riesgo
2 – 3	Bajo
4 – 5	Medio
6 – 7	Alto

Generación de cartografía especializada

Mapa Base

Como origen para el análisis espacial se utilizó el centro geométrico del cráter del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), con coordenadas geográficas 19.03° N, -97.27° W, tomadas del Global Volcanism Program. Esta ubicación fue proyectada al sistema ITRF2008 / UTM zona 14N (EPSG:6369) para la generación de anillos de distancia.

Como base cartográfica para la visualización del relieve en el entorno del Pico de Orizaba, se generó un modelo de sombreado (*hillshade*) elaborado por medio de un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido de INEGI, correspondiente a los estados de Veracruz y Puebla, con una resolución espacial de 15 m (versión 4.0).

El hillshade se generó en QGIS mediante la herramienta de renderizado "Mapa de sombras" (*Hillshade*), configurando los siguientes parámetros: una altitud solar de 30°, un azimut de 315° (correspondiente a una iluminación desde el noroeste), y un factor de exageración vertical (Factor Z) de 1.8 con el fin de resaltar la morfología del edificio volcánico y su red de barrancas radiales sin distorsionar significativamente la escala real del terreno. Adicionalmente, se activó la opción de iluminación multidireccional, la cual combina múltiples ángulos de luz para atenuar

las sombras extremas generadas por una fuente de iluminación única, produciendo un resultado más homogéneo y natural.

Para integrar el hillshade como capa base sin que compitiera visualmente con los datos temáticos superpuestos (localidades, infraestructura, isopacas, entre otros), se ajustó el modo de mezcla de la capa a "Multiplicar", y se afinaron los parámetros de contraste (-12) y brillo mediante la pestaña de representación de capas, con el objetivo de mantener un tono neutro y discreto que funcionara como fondo de referencia topográfica en el conjunto de mapas temáticos elaborados para este trabajo.

Con el fin de analizar la exposición espacial de las localidades circundantes al volcán Pico de Orizaba, se generaron buffers concéntricos de 25, 30, 40 y 50 km a partir del cráter, utilizando el sistema de referencia ITRF2008 / UTM zona 14N (EPSG:6369). Posteriormente, se realizó un cruce espacial entre los anillos de distancia y la capa de localidades, permitiendo clasificar cada asentamiento en función de su proximidad al centro emisor.

Asimismo, se utilizaron los mapas de peligros volcánicos elaborados por Torres-Orozco et al. (2026) para digitalizar las elipses correspondientes al alcance máximo estimado de los depósitos de caída. Este procedimiento permitió establecer un segundo criterio espacial para delimitar con mayor precisión la zona de estudio de mayor relevancia. Para ello, se emplearon herramientas de digitalización vectorial y generación de buffers en el ambiente SIG.

Mapas de exposición

Una vez definido el buffer de 50 km como límite espacial de la zona de estudio, se revisó la información contenida en las bases de datos correspondientes a las 12 cartas topográficas 1:50,000 empleadas. Después de esta revisión, se seleccionaron las variables consideradas con mayor relevancia, particularmente aquellas relacionadas con la infraestructura crítica, sistemas de transporte, recursos hídricos y la distribución de la población.

Se incorporaron al SIG las capas vectoriales en formato shapefile correspondientes a la infraestructura de servicios médicos, red de transporte (camino, carreteras, vías férreas y aeropuertos) y elementos relacionados con el abastecimiento de agua, tales como corrientes superficiales, pozos y tanque de almacenamiento. Estas variables fueron seleccionadas debido a su relevancia en el funcionamiento de las actividades humanas y su potencial afectación ante fenómenos volcánicos como la caída de ceniza y las corrientes de densidad piroclástica.

Posteriormente, las capas correspondientes a cada temática fueron unificadas mediante herramientas de unión vectorial, generando una única capa para cada variable. En el caso de las localidades, fue necesario homologar la estructura de las tablas de atributos de las 12 cartas topográficas, asegurando que todas contuvieran los mismos campos en el mismo orden. Este paso permitió evitar pérdidas o inconsistencias con la información durante la integración de todas las cartas.

Una vez unificadas, todas las capas fueron recortadas utilizando como delimitante el buffer de 50 km, conservando únicamente los elementos que se encontraban contenidos dentro del área de estudio. Con esto, fue posible visualizar el grado de exposición de cada variable.

Para el análisis de la población se generaron mapas de localidades rurales y urbanas y por medio de filtros de selección se identificaron aquellas localidades con una población superior a 20,000 habitantes, considerando su relevancia en términos de concentración poblacional.

Finalmente, los resultados fueron representados mediante mapas de exposición, los cuales muestran la distribución de la infraestructura crítica y elementos expuestos dentro de la zona de estudio. Se realizaron ajustes de diseño para facilitar la interpretación de los resultados y su posterior integración con datos de vulnerabilidad.

Mapas de Vulnerabilidad

Para la elaboración de los mapas de vulnerabilidad social se calcularon previamente los rangos correspondientes a cada AGEB con base en los indicadores sociales analizados. Posteriormente, se generó un archivo CSV independiente para cada indicador, conteniendo únicamente los campos: localidad, rango, cvegeo, AGEB urbana, valor, clasificación y nivel.

Cada archivo CSV fue incorporado al entorno SIG y vinculado espacialmente mediante la clave geométrica (cvegeo), permitiendo asociar cada AGEB con su respectiva geometría y asignar los valores de vulnerabilidad correspondientes.

Posteriormente, mediante herramientas de filtrado espacial y selección por atributos, se identificaron las localidades con mayor concentración poblacional. Finalmente, se realizaron los procesos de simbología, clasificación temática y diseño cartográfico para la representación espacial de cada indicador de vulnerabilidad social.

Mapas de isopacas

Los mapas de isopacas se elaboraron empleando como base los mapas obtenidos de Torres-Orozco et al. (2026). Después se digitalizó cada isolínea correspondiente a los depósitos de caída.

Con el fin de generar isopacas complementarias para cada escenario eruptivo, inicialmente se estimaron los parámetros geométricos de las isopacas que ya se tenían como base. Para ello, al ser aproximaciones elípticas se obtuvieron los valores de la longitud de la máxima dispersión desde el cráter hacia el extremo más alejado de la elipse DW y ancho máximo perpendicular a la dirección de dispersión CW.

Una vez obtenidos los valores de DW y CW, así como el área de cada isopaca, se realizaron los cálculos mencionados en subtemas anteriores y esos datos se exportaron al SIG, como referencia espacial se utilizó el cráter del volcán como punto de origen. Mediante la herramienta “crear capa de puntos” se estableció el centro emisor y posteriormente se generaron las elipses correspondientes a cada espesor, utilizando los valores calculados de CW, área y eje mayor respectivamente. Cada elipse fue orientada de acuerdo con la dirección principal de dispersión.

Una vez generadas las elipses, estas fueron convertidas a capas vectoriales independientes y organizadas según su espesor. Posteriormente, mediante herramientas de edición vectorial se verificó la correcta superposición y jerarquía de las isopacas, asegurando que el DW y demás parámetros fueran correctos.

Mapas de peligro

Para la elaboración de los mapas de peligros, las isopacas fueron transformadas de geometría en línea a polígonos utilizando las herramientas “polígonos a partir de capas de líneas” y “líneas a polígonos”. Debido a que algunas geometrías no se encontraban cerradas, fue necesario emplear la herramienta “disolver” para realizar las correcciones geométricas.

Posteriormente, se generaron polígonos que representan las áreas comprendidas entre las isopacas. A cada polígono se le asignó un nivel de peligro mediante la edición de la tabla de atributos, considerando la clasificación establecida por los espesores de depósito. Finalmente, los polígonos fueron simbolizados y organizados para obtener la zonificación de peligro correspondiente a cada escenario eruptivo.

Mapas de riesgos

Con el objetivo de identificar las áreas con mayor riesgo , se integraron los mapas de peligro y vulnerabilidad social. El peligro se definió tomando en cuenta la distribución de los depósitos de caída UC2, UC4 y UC6, los cuales presentan diferentes características de extensión, espesor y dispersión. El escenario UC2 corresponde a una fase subpliniana con dispersión preferente hacia el noreste, mientras que UC4 y UC6 presentan una dispersión principalmente hacia el este; UC4 constituye el depósito de mayor extensión y espesor (Torres-Orozco, et al., 2026). Al considerar las isopacas, se decidió clasificar en 4 categorías las zonas de peligro: bajo, medio, alto y muy alto, que a su vez se les asignaron valores ordinales de 1 a 4, respectivamente. De manera similar, la vulnerabilidad fue clasificada en 3 niveles: baja, media y alta, con valores de 1,2 y 3.

La relación entre ambas variables se estableció mediante la herramienta “unir atributos por localización” utilizando como capa de entrada la capa de vulnerabilidad y como capa de unión las zonas de peligro. Se empleó la configuración “intersecta” para identificar las AGEB que presentaban superposición con una o más zonas de peligro.

Considerando que una misma AGEB podía intersectar más de una categoría de peligro, se aplicó la estadística “máximo”, asegurando que tome el nivel inmediato más alto presente dentro de su superficie, con ello se evita la subestimación del riesgo. Posteriormente, se calculó el riesgo, mediante la suma de los valores de peligro y vulnerabilidad asignados a cada AGEB, empleando la calculadora de campos de QGIS.

$$R = P + V$$

Donde

R = corresponde al índice de riesgo,

P = presenta el nivel de peligro

V = el nivel de vulnerabilidad.

Finalmente, los valores obtenidos fueron reclasificados para generar los mapas de riesgo de los escenarios eruptivos analizados

Capítulo 5. Resultados

En la Tabla 8 se muestra un resumen de los datos obtenidos gracias al análisis de las capas vectoriales en formato *shapefile*, procesadas en RStudio. La Figura 7 muestra una gráfica de pastel que representa la distribución porcentual de la población, diferenciando entre población urbana y rural. Por su parte, la Figura 8 presenta el resultado del filtro aplicado a las localidades con una población superior a **20,000 habitantes**, dentro del área de estudio. De este modo, se identificaron las localidades consideradas para la estimación de la vulnerabilidad.

Total, de población: 1,495,320

Total de localidades: 495

Tabla 8. Resultados del procesamiento de datos en RStudio.

<i>Tipo de localidad</i>	<i>Cantidad de localidades por tipo</i>	<i>Número de habitantes</i>	<i>Porcentaje de habitantes</i>
Rural	358	313,498	21%
Urbana	137	1,181,822	79%

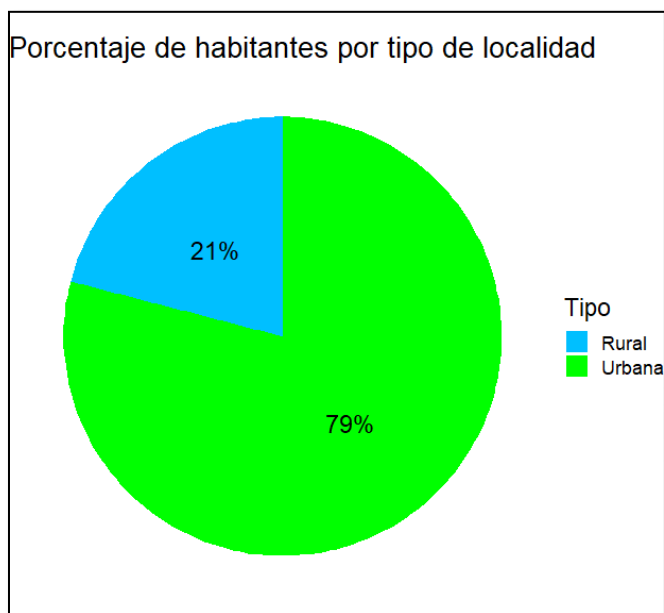


Figura 7. Gráfica de pastel que distingue los porcentajes de la población entre localidades urbanas y rurales.

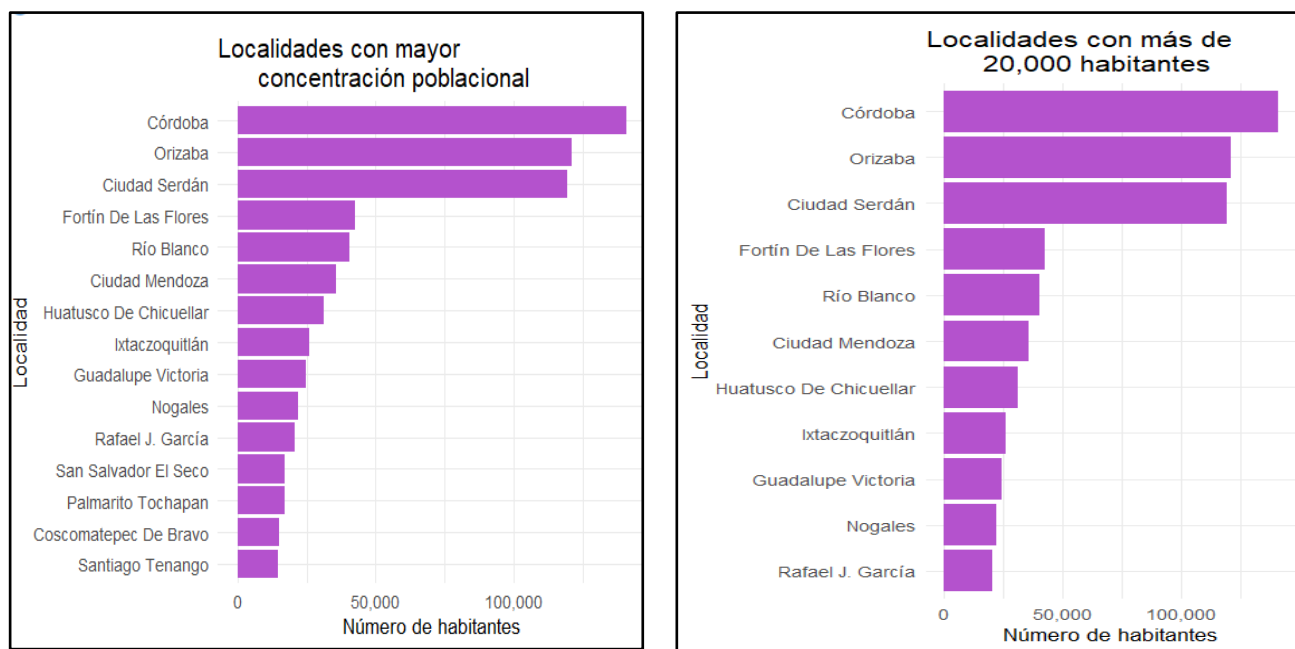


Figura 8. En la gráfica de la izquierda se enlistan las localidades con mayor concentración poblacional dentro del rango de 50 km establecidos en la zona de estudio. En la gráfica de la derecha se filtran las localidades de la gráfica anterior para obtener solo las que poseen una cantidad de habitantes igual o mayor a 20,000 habitantes.

Mapecto de la exposición

Para documentar los elementos expuestos se realizó un análisis de SIG y los resultados se plasmaron en cartografía especializada.

Partiendo de la identificación de las localidades ubicadas dentro del radio de 50 km alrededor del Pico de Orizaba (Figura 8), se procedió a representar espacialmente su distribución y magnitud poblacional mediante un mapa temático (Figura 9).

El mapa de la Figura 9 presenta la distribución espacial de las localidades expuestas dentro de un radio de 50 km alrededor del Pico de Orizaba, clasificadas según su número de habitantes, tomando en cuenta la zonificación de localidades presentada en la Figura 8. Esta representación tiene como objetivo identificar visualmente los asentamientos humanos que se encuentran en mayor cercanía al volcán y, por tanto, potencialmente más vulnerables ante peligros volcánicos. Se percibe que el sector sureste concentra las localidades con mayor población —consistente con la presencia de Córdoba, Orizaba y Ciudad Serdán entre las localidades de mayor magnitud poblacional (Figura 8)— mientras que en los sectores noroeste y noreste predominan localidades de menor tamaño y concentración poblacional.

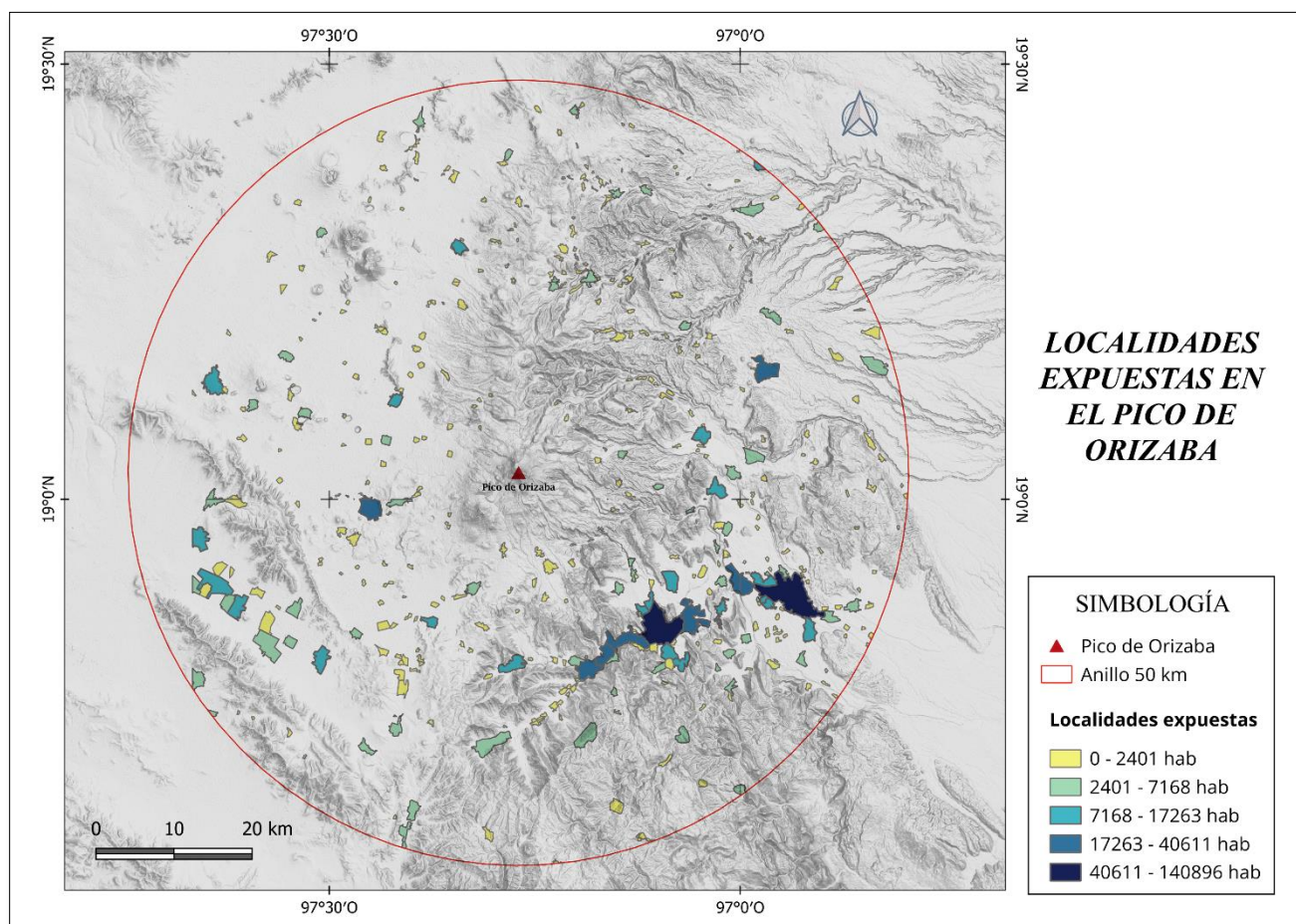


Figura 9. Mapa de zonificación de las localidades expuestas dentro del radio de 50 km. Se distingue a partir de un degradado de colores para enfatizar las localidades de menor a mayor concentración poblacional, se contabilizan poco más de 400 localidades asentadas dentro del área de estudio. Elaboración propia.

La Figura 10 presenta la distribución espacial de las localidades expuestas dentro del área de afectación por depósitos de caída de ceniza de 5 cm de espesor, correspondiente al escenario UC4, de acuerdo con Torres-Orozco et al. (2026). Esta zona de depósito, delimitada mediante una elipse, permite identificar qué asentamientos se encuentran dentro del área de mayor exposición ante este escenario específico.

Se aprecia que, el sector sureste concentra las localidades de mayor población dentro del radio de 50 km (Figura 9), y que hay localidades con gran concentración poblacional dentro del área de depósitos de caída. Es importante recordar que este es el evento de mayor extensión entre los tres escenarios considerados, de manera que esta elipse funge como filtro para determinar las localidades empleadas en la estimación de vulnerabilidad.

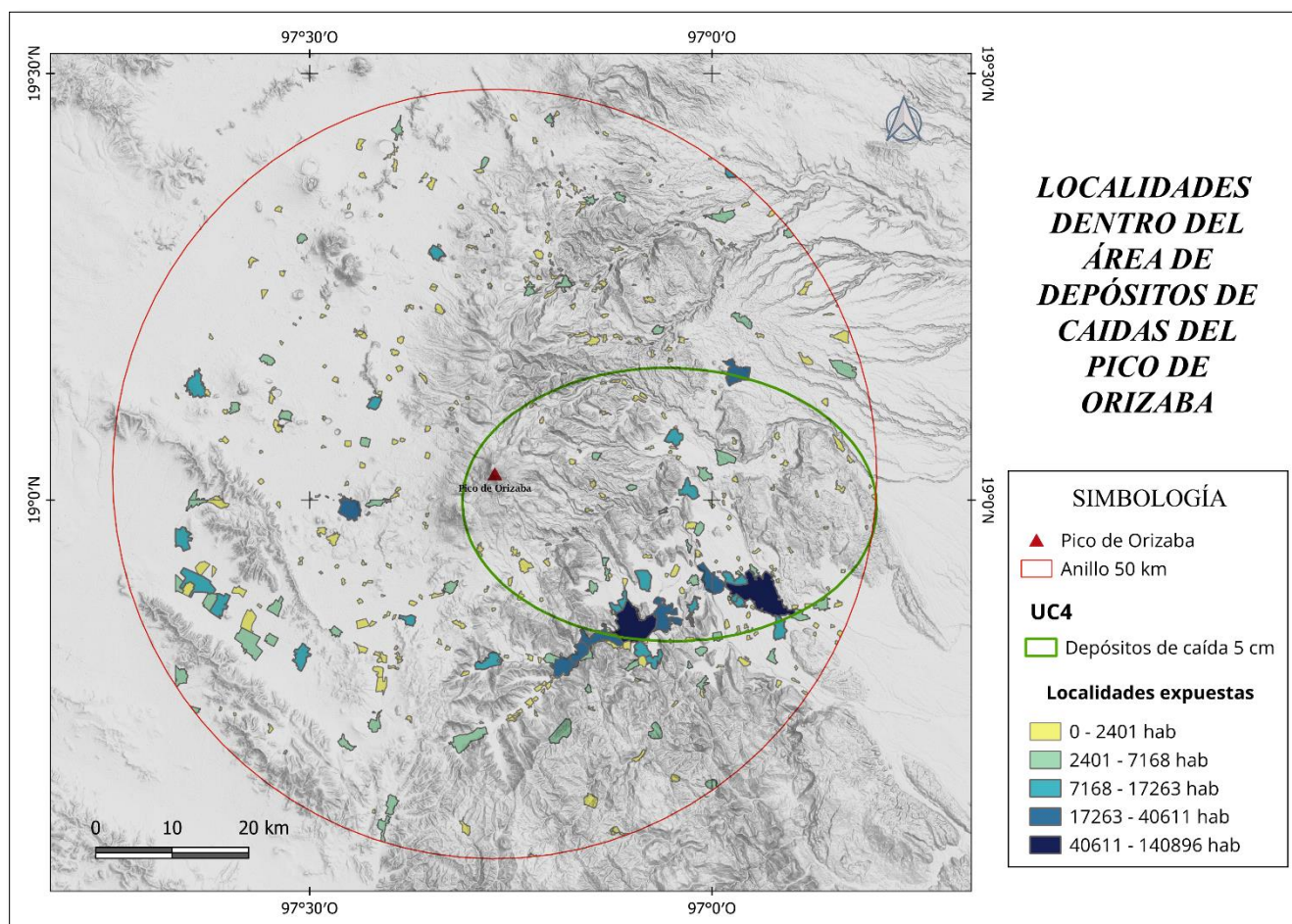


Figura 10. Distribución espacial de las localidades expuestas dentro del área de depósitos de caída de ceniza de 5 cm de espesor, correspondiente al escenario UC4 de acuerdo con Torres-Orozco et al. (2026). Dentro de un radio de 50 km alrededor del Pico de Orizaba. Las localidades se clasifican según su número de habitantes. Elaboración propia.

Con el fin de identificar con mayor precisión las localidades de mayor concentración poblacional que se encuentran dentro del área de depósitos de caída del escenario UC4, la Figura 11 presenta su distribución espacial con etiquetas identificativas. Se advierte que Córdoba, Fortín de las Flores, Orizaba, Río Blanco, Ixtaczoquitlán y Huatusco de Chicuellar se ubican dentro del límite de la elipse de depósito, mientras que Ciudad Serdán, Nogales y Ciudad Mendoza a pesar de encontrarse dentro del radio de 50 km y presentar una concentración poblacional considerable, quedan fuera del área de afectación por este escenario específico. Sin embargo, debido a la cercanía y al estar en la dirección preferencial de la zona de afectación señalada de la elipse, también se consideró Nogales y Ciudad Mendoza para la estimación de la vulnerabilidad social. En consecuencia, al final se consideraron Córdoba, Fortín de las Flores, Orizaba, Río Blanco, Ixtaczoquitlán, Huatusco de Chicuellar, Nogales y Ciudad Mendoza para los siguientes procesos.

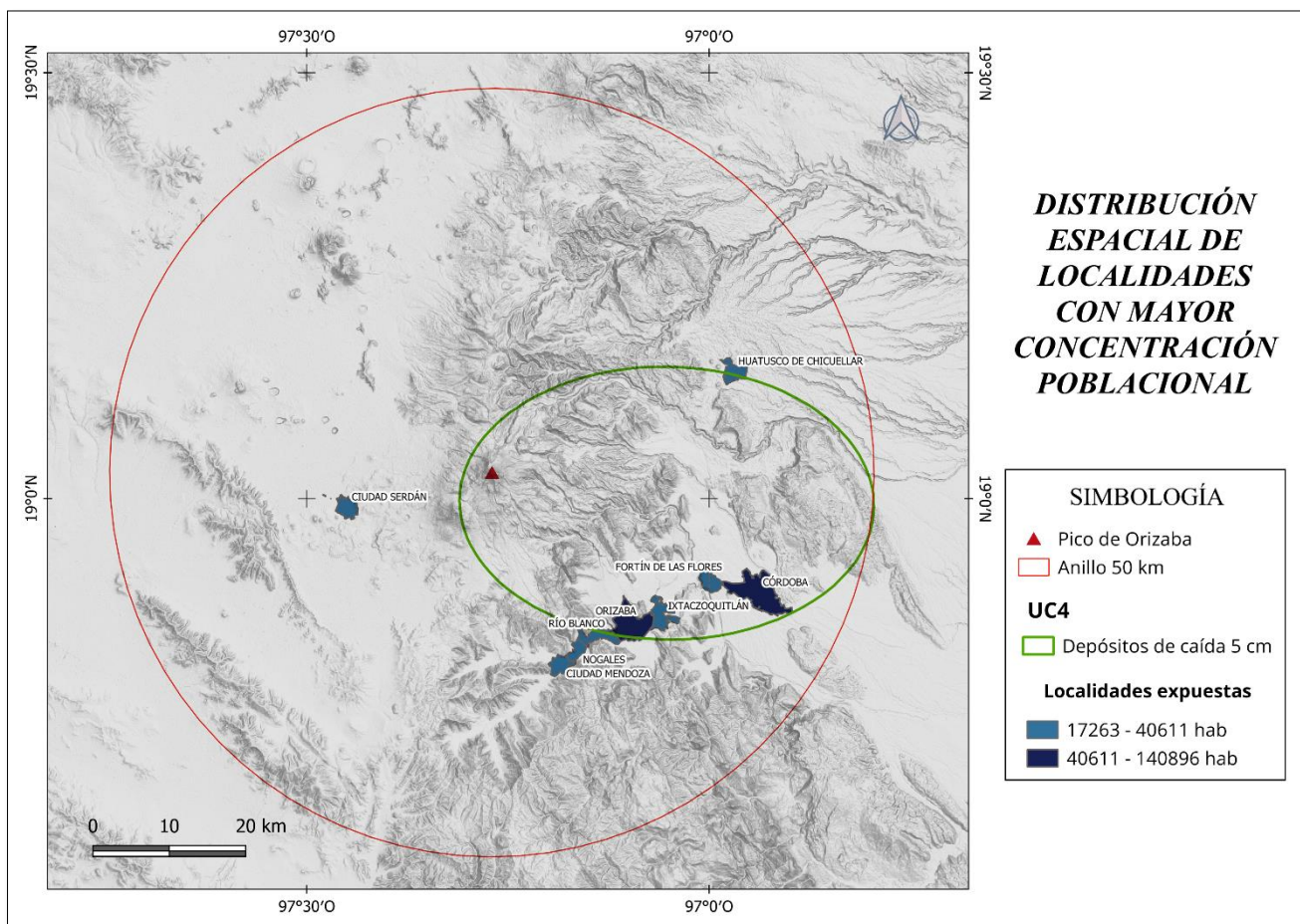


Figura 11. Distribución espacial de las localidades con mayor concentración poblacional (mayores a 20,000 habitantes) y muestra la dirección preferencial delimitando la zona en la elipse de color verde. Elaboración propia.

Con el fin de identificar los elementos de infraestructura crítica presentes en el entorno del Pico de Orizaba, la Figura 12 presenta la ubicación de servicios médicos, vías férreas, carreteras, caminos y el aeropuerto nacional dentro de un radio de 50 km alrededor del volcán. Se contempla que los servicios médicos se concentran principalmente en el sector norte y noroeste, mientras que la infraestructura de comunicación terrestre (carreteras y vías férreas) se distribuye principalmente hacia el sur y sureste del área de estudio, conectando con el aeropuerto nacional ubicado en este mismo sector. Esta distribución de infraestructura crítica resulta relevante para el análisis de vulnerabilidad, dado que estos elementos condicionan tanto la capacidad de respuesta ante una emergencia como las posibles rutas de evacuación disponibles.

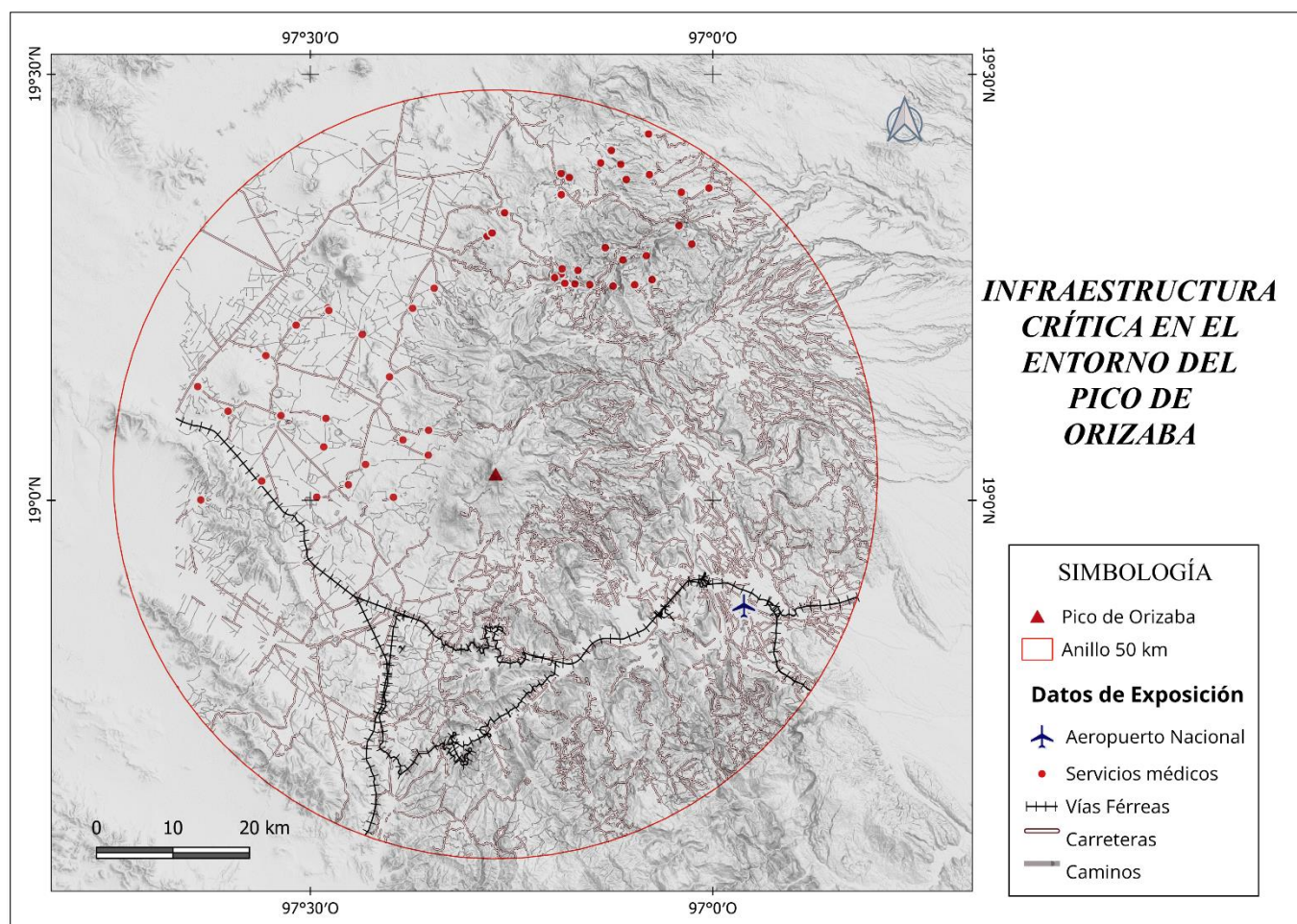


Figura 12. Mapa que describe la infraestructura con mayor importancia en la zona, como son los sistemas de transporte (caminos de terracería, brechas y veredas; carreteras federales, estatales y municipales, vías férreas y el Aeropuerto Nacional Juan Antonio Perdomo Díaz). También muestra los servicios médicos que pueden ser hospitales, centros de salud y centros de rehabilitación, excluyendo los consultorios que brindan servicios particulares, clínicas dentales o de belleza. Elaboración propia.

La Figura 13 presenta la distribución espacial de las infraestructuras hídricas dentro de un radio de 50 km alrededor del Pico de Orizaba, incluyendo pozos de extracción de agua, corrientes de agua y tanques de agua (elevados y superficiales). Se distingue que estos elementos se distribuyen de manera heterogénea en el área de estudio, concentrándose principalmente en los sectores norte y sureste, en correspondencia con las zonas de mayor densidad de localidades identificadas previamente (Figuras 9 y 11). Esta distribución permite tener un panorama general de la infraestructura hídrica presente en el entorno del volcán, la cual podría verse afectada ante un escenario de caída de ceniza.

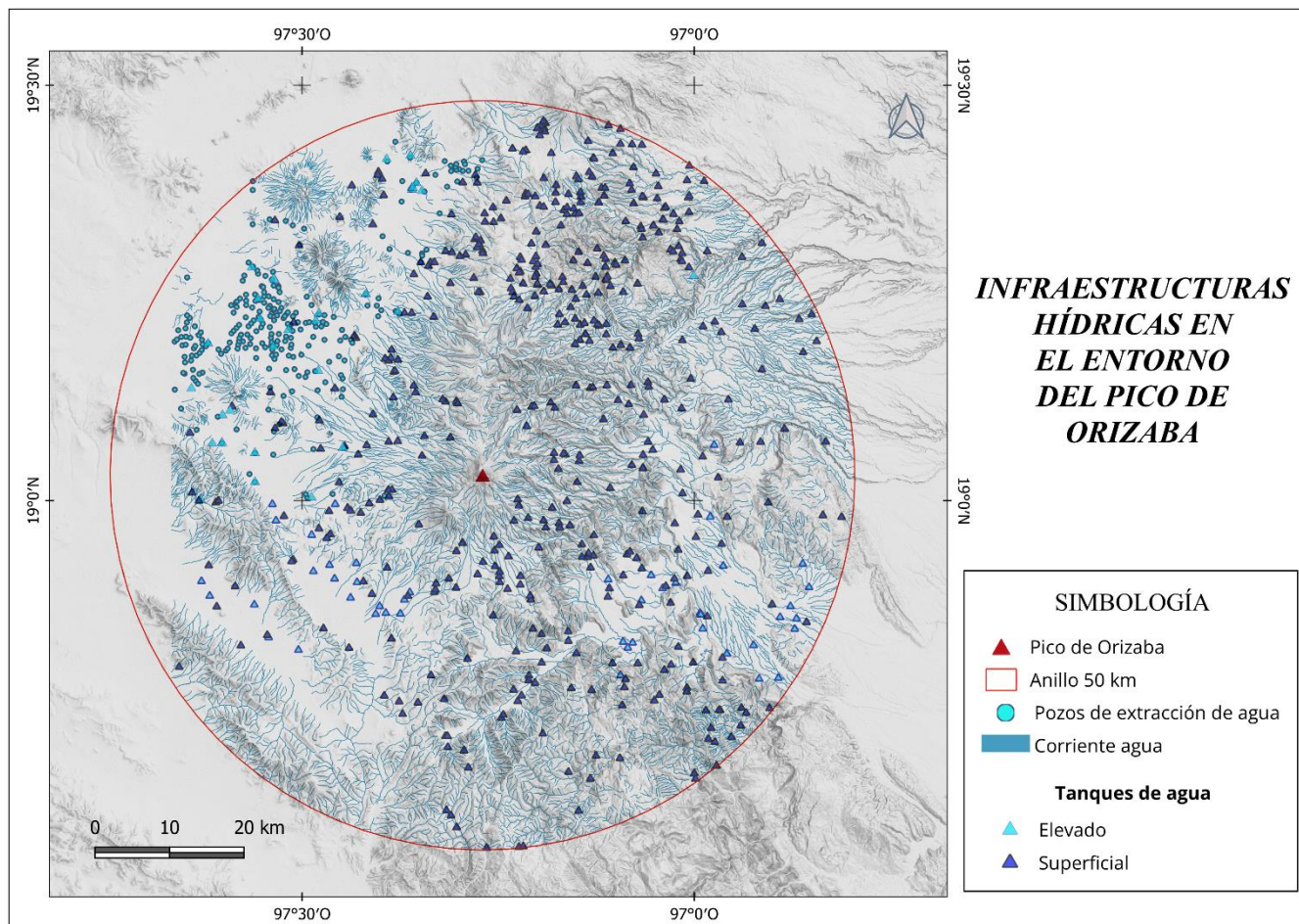


Figura 13. Distribución espacial de infraestructuras hídricas (pozos de extracción de agua, corrientes de agua y tanques de agua elevados y superficiales) dentro de un radio de 50 km alrededor del Pico de Orizaba.

Vulnerabilidad Social

Como resultado de la clasificación individual de los indicadores de vulnerabilidad social, se establecieron cuatro categorías de vulnerabilidad: muy bajo, bajo, medio y alto. Debido a que cada indicador presenta valores mínimos y máximos diferentes, los intervalos correspondientes a cada categoría varía entre indicadores. En la Tabla 9 se exhiben los rangos obtenidos para los seis indicadores sociales, así como el valor numérico asignado a cada categoría. Estos valores fueron posteriormente empleados para integrar los diferentes indicadores mediante su suma para cada AGEb y obtener la clasificación de vulnerabilidad total.

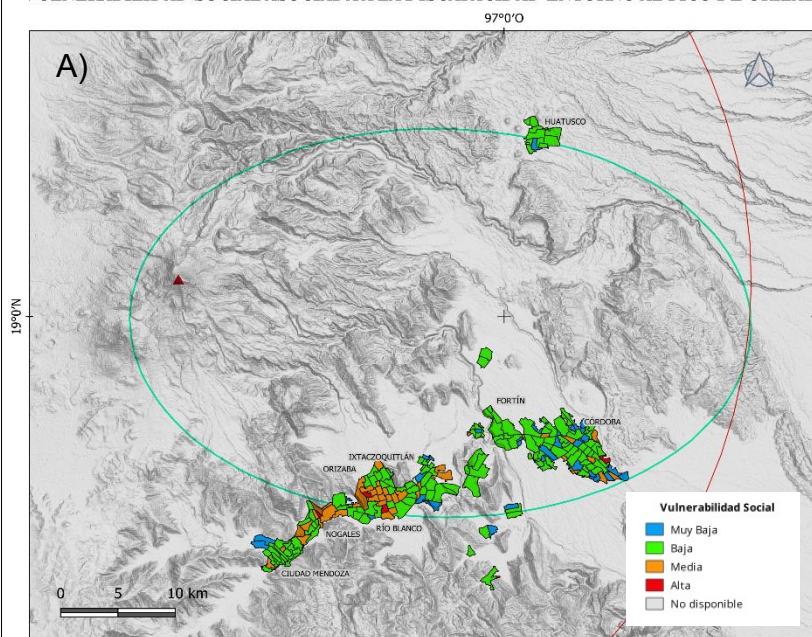
Tabla 9. Rangos de vulnerabilidad utilizados para la clasificación de los indicadores de vulnerabilidad social.

Indicador	Rangos de Vulnerabilidad Social			
	Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)
% de la población con discapacidad	0 a ≤ 3.1	> 3.1 a ≤ 6.2	> 6.2 a ≤ 9.2	> 9.2 a 12.3
% de la población de 60 años y más	1.7 a ≤ 9.3	> 9.3 a ≤ 16.9	> 16.9 a ≤ 24.5	> 24.5 a 30.4
% de la población de 0 a 14 años	13 a ≤ 19.1	> 19.1 a ≤ 24.8	> 24.8 a ≤ 30.4	> 30.4 a 36.1
% de la población de 15 años y más analfabeta	0 a ≤ 6.9	> 6.9 a ≤ 13.7	> 13.7 a ≤ 20.6	> 20.6 a 27.4
% de la población de 3 años y más que habla alguna lengua indígena	0 a ≤ 7.2	> 7.2 a ≤ 14.3	> 14.3 a ≤ 21.5	> 21.5 a 28.6
% de la población sin afiliación a servicios de salud	5 a ≤ 19.7	> 19.7 a ≤ 34.3	> 34.3 a ≤ 49	> 49 a 58.6

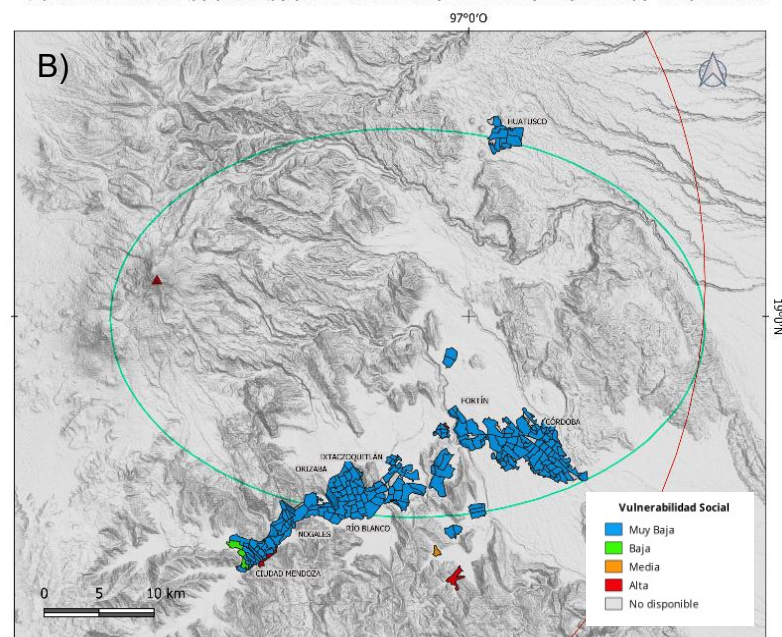
Nota: Los valores entre paréntesis corresponden a la puntuación asignada a cada categoría de vulnerabilidad. Los intervalos fueron obtenidos mediante el método de intervalos iguales, comenzando desde los valores mínimo al máximo de cada indicador.

Para la estimación de la vulnerabilidad social se elaboró de nuevo cartografía especializada para plasmar los resultados obtenidos y mejorar la visualización de los datos.

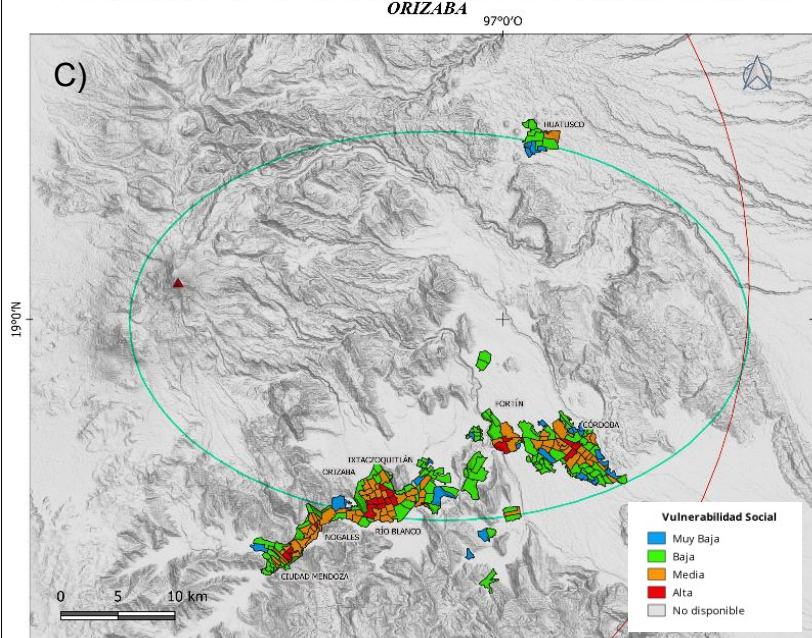
VULNERABILIDAD SOCIAL ASOCIADA A LA DISCAPACIDAD ENTORNO AL PICO DE ORIZABA



VULNERABILIDAD SOCIAL ASOCIADA A LA ETNICIDAD ENTORNO AL PICO DE ORIZABA



VULNERABILIDAD SOCIAL ASOCIADA A ADULTOS MAYORES ENTORNO AL PICO DE ORIZABA



VULNERABILIDAD SOCIAL ASOCIADA A MENORES DE EDAD ENTORNO AL PICO DE ORIZABA

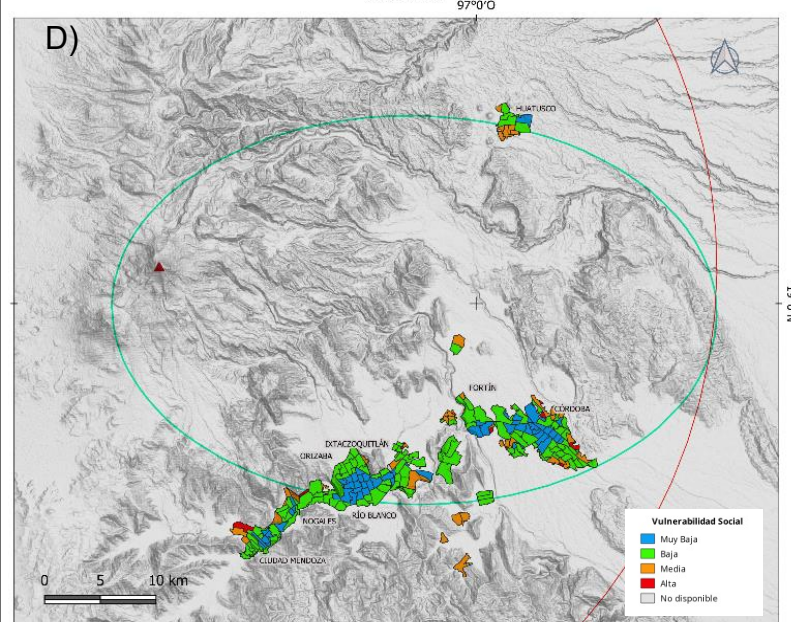


Figura 14 (Parte I). Distribución espacial de la vulnerabilidad social en el entorno del Pico de Orizaba, asociada a: A) discapacidad, B) etnicidad, C) adultos mayores y D) menores de edad. Elaboración propia.

VULNERABILIDAD SOCIAL ASOCIADA A LA EDUCACIÓN EN TORNO AL PICO DE ORIZABA

VULNERABILIDAD SOCIAL POR FALTA DE AFILIACIÓN A SERVICIOS DE SALUD

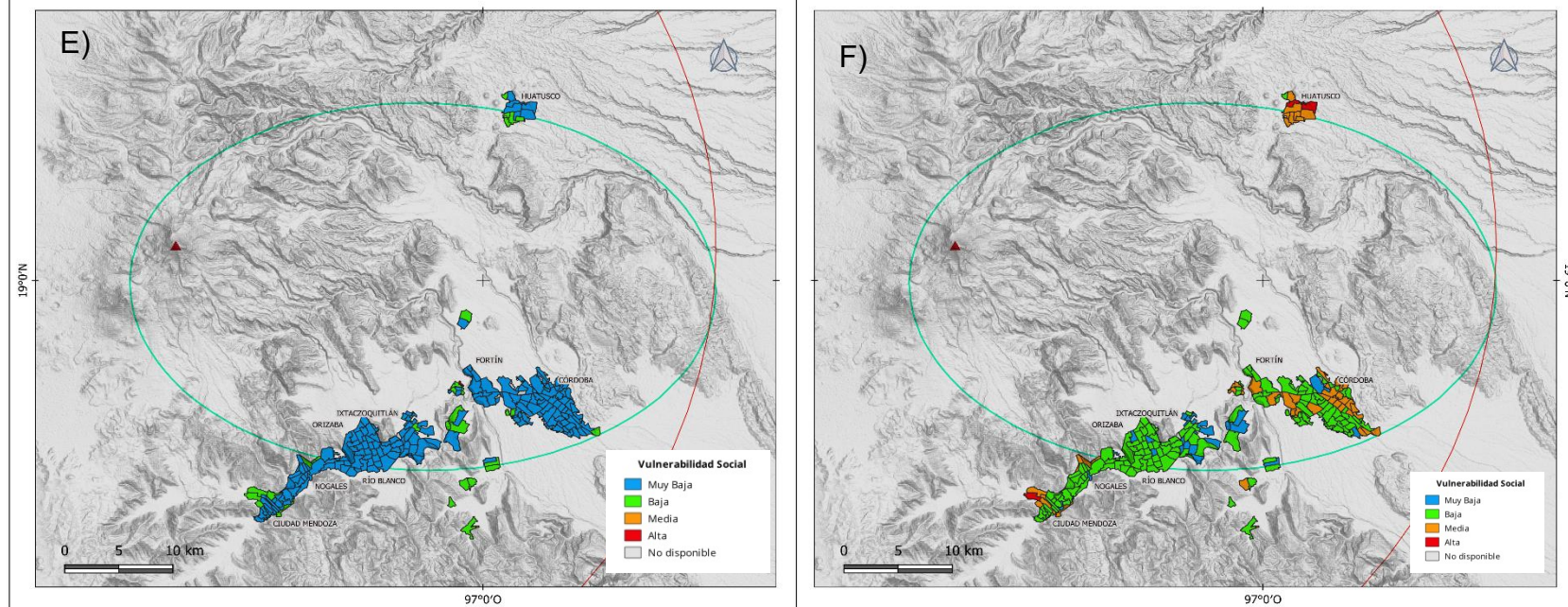


Figura 14 (Parte II). Distribución espacial de la vulnerabilidad social en el entorno del Pico de Orizaba, asociada a: E) educación, F) no afiliados a servicios de salud.

Mapa 14 (Parte I)_A. Discapacidad

El mapa 14A presenta la distribución del porcentaje de la población que presenta alguna discapacidad dentro del área delimitada como la zona de mayor afectación para caída de ceniza, considerando localidades con más de 20,000 habitantes. La clasificación de vulnerabilidad social se dividió en 4 niveles (Muy Baja, Baja, Media, Alta), representadas mediante una gradación de colores.

Los resultados para este indicador muestran una mayor tendencia hacia niveles de vulnerabilidad social bajos y muy bajos, observándose la concentración más importante de este nivel en localidades como Huatusco de Chicuellar, Fortín de las Flores, Córdoba, Ixtaczoquitlán y una parte de Ciudad Mendoza. Por otro lado, localidades como Orizaba, Río Blanco y Nogales presentan valores un poco más altos, registrando niveles de vulnerabilidad social media.

De igual manera, se identifican localidades con niveles de vulnerabilidad social alta distribuidas de manera muy dispersas y con menor presencia dentro del área de estudio. Finalmente, hay presencia de zonas sin disponibilidad de información censal, las cuales se ven en color gris.

Mapa 14 (Parte I)_B. Población hablante de lengua indígena

El mapa 14B presenta la distribución del porcentaje de la población de tres años y más que hablan alguna lengua indígena dentro del área delimitada como la zona de mayor afectación para caída de ceniza, considerando localidades con más de 20,000 habitantes.

Los datos al igual que el mapa anterior tiene una muy marcada predominancia hacia niveles de vulnerabilidad social muy baja en la mayoría de las localidades analizadas. Esta distribución indica que el porcentaje de población perteneciente a grupos étnicos o hablantes de alguna lengua indígena es relativamente reducido dentro de las localidades analizadas.

Por otro lado, únicamente se identifican casos muy aislados y dispersos donde se ven niveles de vulnerabilidad social alta y baja, mientras que los niveles medios de vulnerabilidad son prácticamente nulos. También se identifican algunas zonas sin información censal.

Mapa 14 (Parte I)_C. Población adulta mayor

El mapa 14C presenta la distribución del porcentaje de la población adulta mayor dentro del área delimitada como la zona de mayor afectación para caída de ceniza, considerando localidades con más de 20,000 habitantes.

Los resultados muestran una predominancia de niveles de vulnerabilidad social bajos y medios en la mayoría de las localidades analizadas. Sin embargo, se identifican concentraciones donde predominan los niveles de vulnerabilidad muy bajos y bajos son en localidades como Huatusco de Chicuellar, Fortín de las Flores e Ixtaczoquitlán, indicando una concentración relativamente menor de población adulta mayor. La población en edad laboral también puede influir en el riesgo debido a posibles afectaciones a las actividades económicas; sin embargo, este factor corresponde a una dimensión diferente y no fue evaluado mediante este indicador.

Por otro lado, en localidades como Ciudad Mendoza, Orizaba, Córdoba se identifican concentraciones de vulnerabilidad social alta, indicando una mayor concentración de población adulta mayor. Del mismo modo, se visualizan algunas localidades con distribución dispersa de vulnerabilidad media, localizadas principalmente en Nogales y alrededores. También se identifican algunas zonas sin información censal.

Mapa 14 (Parte I)_D. Población menor de edad

El mapa 14D presenta la distribución del porcentaje de la población menor de edad dentro del área delimitada como la zona de mayor afectación para caída de ceniza, considerando localidades con más de 20,000 habitantes.

Los resultados indican una mayor tendencia hacia niveles de vulnerabilidad social bajos y muy bajos en gran parte de las localidades, las mayores concentraciones se ubican en Córdoba, Orizaba, Fortín de las Flores e Ixtaczoquitlán. Determinando en estas localidades una menor presencia de población infantil.

Córdoba y Huatusco de Chicuellar son las localidades donde se aprecian conjuntos de zonas con niveles de vulnerabilidad social media, las demás zonas con este mismo nivel se distribuyen a los alrededores de las demás localidades. Por otro lado, las localidades asociadas a vulnerabilidad social alta presentan una distribución más puntual y dispersa, destacando algunos sectores cercanos a Ciudad Mendoza.

Por último, se identifican áreas sin información censal.

Mapa 14 (Parte II)_E. Analfabetismo

El mapa 14E presenta la distribución del porcentaje de la población de 15 años y más que presenta analfabetismo dentro del área delimitada como la zona de mayor afectación para caída de ceniza, considerando localidades con más de 20,000 habitantes.

Los resultados de este indicador presentan una gran homogeneidad pues muestran una muy marcada tendencia a niveles de vulnerabilidad social muy baja,

principalmente en localidades como Córdoba, Fortín de las Flores, Orizaba, Ixtaczoquitlán, Río Blanco y Nogales. De igual manera, se aprecian localidades con vulnerabilidad social baja distribuidas de manera aislada alrededor de las anteriores localidades.

En contraste, los niveles de vulnerabilidad social media y alta tienen una presencia muy limitada, casi nula dentro de las localidades analizadas. Con esto es posible asumir que las condiciones educativas en gran parte de las localidades evaluadas son relativamente favorables en comparación con otros indicadores sociales. Por último, se identifican áreas sin información censal.

Mapa 14 (Parte II)_F. Población sin afiliación a servicios médicos

El mapa 14F presenta la distribución del porcentaje de la población que no se encuentra afiliado a ningún servicio médico dentro del área delimitada como la zona de mayor afectación para caída de ceniza, considerando localidades con más de 20,000 habitantes.

Este mapa muestra una distribución más inclinada hacia los niveles de vulnerabilidad social baja, concentrándose principalmente en las localidades como Córdoba, Fortín de las Flores, Orizaba, Río Blanco, Orizaba, Nogales y Ciudad Mendoza. Los niveles de vulnerabilidad media se distinguen en principalmente en Huatusco de Chicuellar, Córdoba y Fortín de las Flores.

También, muestran zonas con vulnerabilidad social alta, particularmente en zonas de Huatusco de Chicuellar y Ciudad Mendoza, evidenciando una mayor proporción de población que no afiliación a instituciones de salud. Por otra parte, las áreas con vulnerabilidad muy baja se perciben de manera más dispersa y en menor proporción. Finalmente, existen partes si información censal.

Vulnerabilidad total

Una vez integrados los valores de los seis indicadores para cada AGEB, se obtuvo un valor acumulado de vulnerabilidad social. Después, con estos valores se determinaron nuevos intervalos mediante el mismo procedimiento de clasificación, estableciendo tres categorías: baja, media y alta. El valor máximo observado en la suma de los valores de los seis indicadores fue 18, por lo que los rangos y la puntuación asignada a cada categoría se exponen en la Tabla 10.

Tabla 10. Rangos de clasificación de la vulnerabilidad total.

	Rango de Vulnerabilidad Total		
	Bajo (1)	Medio (2)	Alto (3)
Vulnerabilidad Total	6 a ≤ 10	>10 a ≤ 14	>14 a 18

Nota: Los valores entre paréntesis corresponden a la puntuación asignada a cada categoría de vulnerabilidad. Los intervalos fueron obtenidos mediante el método de intervalos iguales comenzando desde los valores mínimos al máximo de cada indicador.

El mapa 15 presenta la distribución de la vulnerabilidad total, contemplando todos los indicadores sociales anteriormente mapeados. La clasificación de vulnerabilidad total se dividió en tres categorías (Baja, Media y Alta), representadas mediante distintos colores.

Los datos muestran una predominancia de vulnerabilidad baja y media. Las zonas con mayor presencia de vulnerabilidad baja están en las localidades como Córdoba, Fortín de las Flores, Ixtaczoquitlán y parte de Orizaba, reflejando mejores condiciones sociales en comparación a otras áreas.

Por otra parte, la concentración de vulnerabilidad media está presente en otros sectores, tal como Huatusco de Chicuellar, Río Blanco, Nogales, Ciudad Mendoza y una parte de Orizaba, reconociendo algunos limitantes sociales que incrementan los niveles de vulnerabilidad en la población que radica en estas zonas. También, las localidades con vulnerabilidad alta son escasas y se advierten de manera aislada, sobre todo al sur del mapa. Por último, se identifican algunas áreas donde no se tiene información censal, las cuales se presentan en color gris, denotando su ausencia en las localidades analizadas.

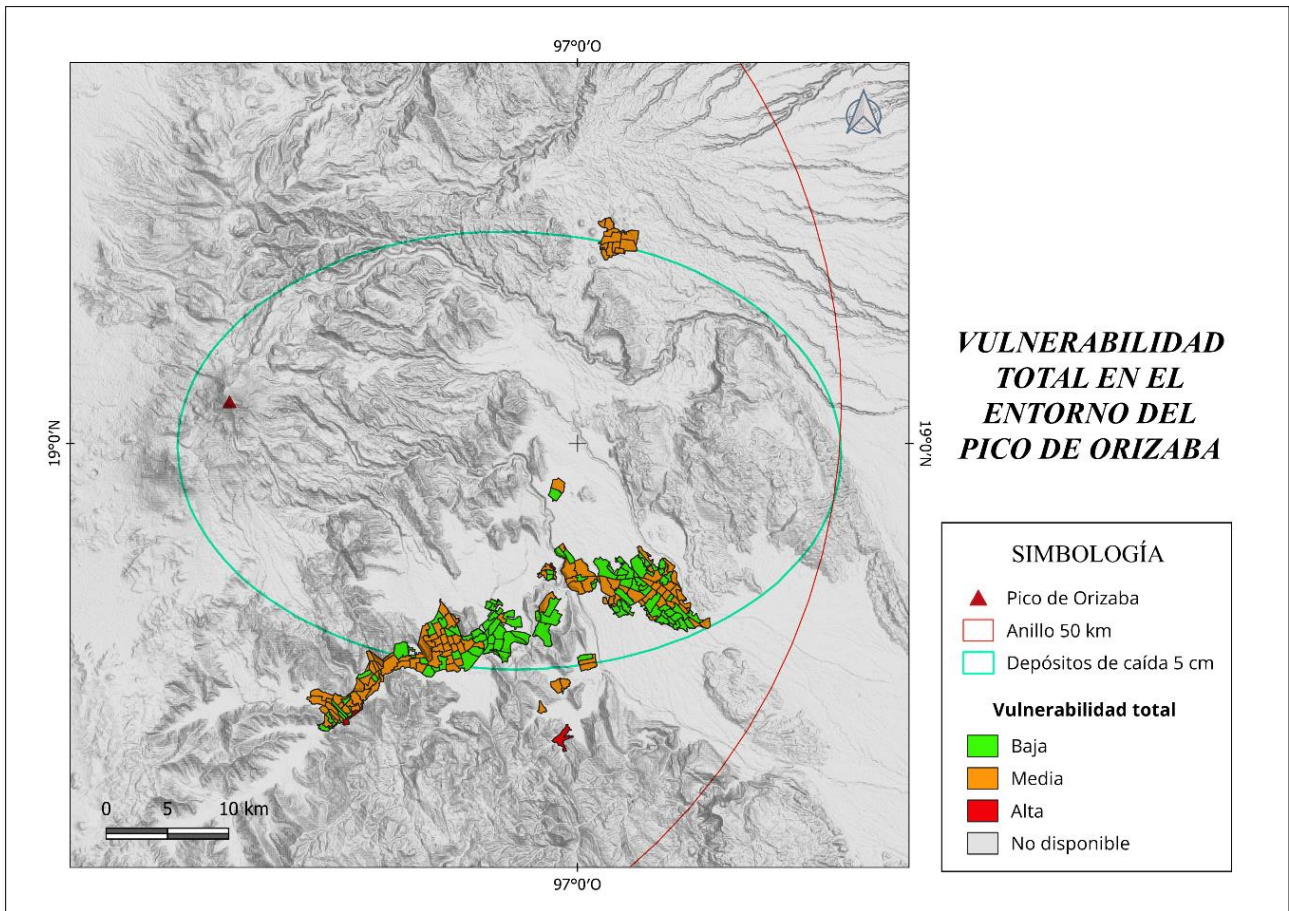


Figura 15. Mapa de vulnerabilidad total, contempla todos los indicadores sociales anteriormente mostrados. Elaboración propia.

Zonificación de peligros volcánicos

Para representar el peligro volcánico por depósitos de caída del Citlaltépetl Superior o Upper Citlaltépetl se digitalizó el mapa de isopacas de Torres-Orozco et al. (2026). Este mapa se realizó con base en datos de campo recolectados por los autores de dicho trabajo. Se aprecian 3 eventos eruptivos y por ello, 3 mapas diferentes.

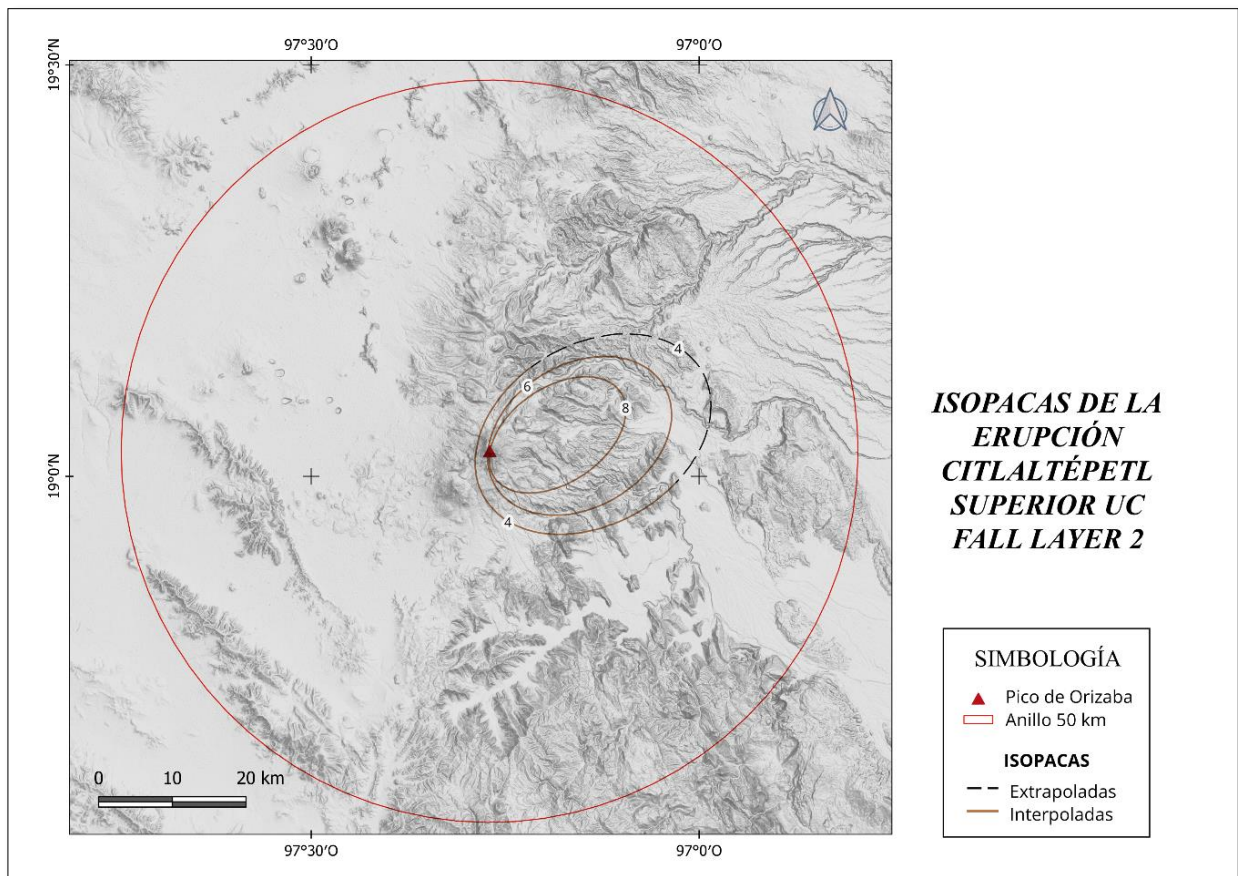


Figura 16. Mapa realizado con base en los mapas de peligros de Torres-Orozco et al. (2026). Primer evento eruptivo.

El mapa 16 presenta el primer escenario eruptivo, muestra la distribución de los depósitos de la columna subpliniana hacia el N-E, favorecidas posiblemente por la dirección del viento. Las isopacas marcan los depósitos alcanzados con espesores de 4, 6 y 8 cm. El alcance máximo estimado en QGIS para estos datos hacia el N-E es de 30 km aproximadamente desde el cráter hacia la elipse correspondiente al depósito de 4 cm.

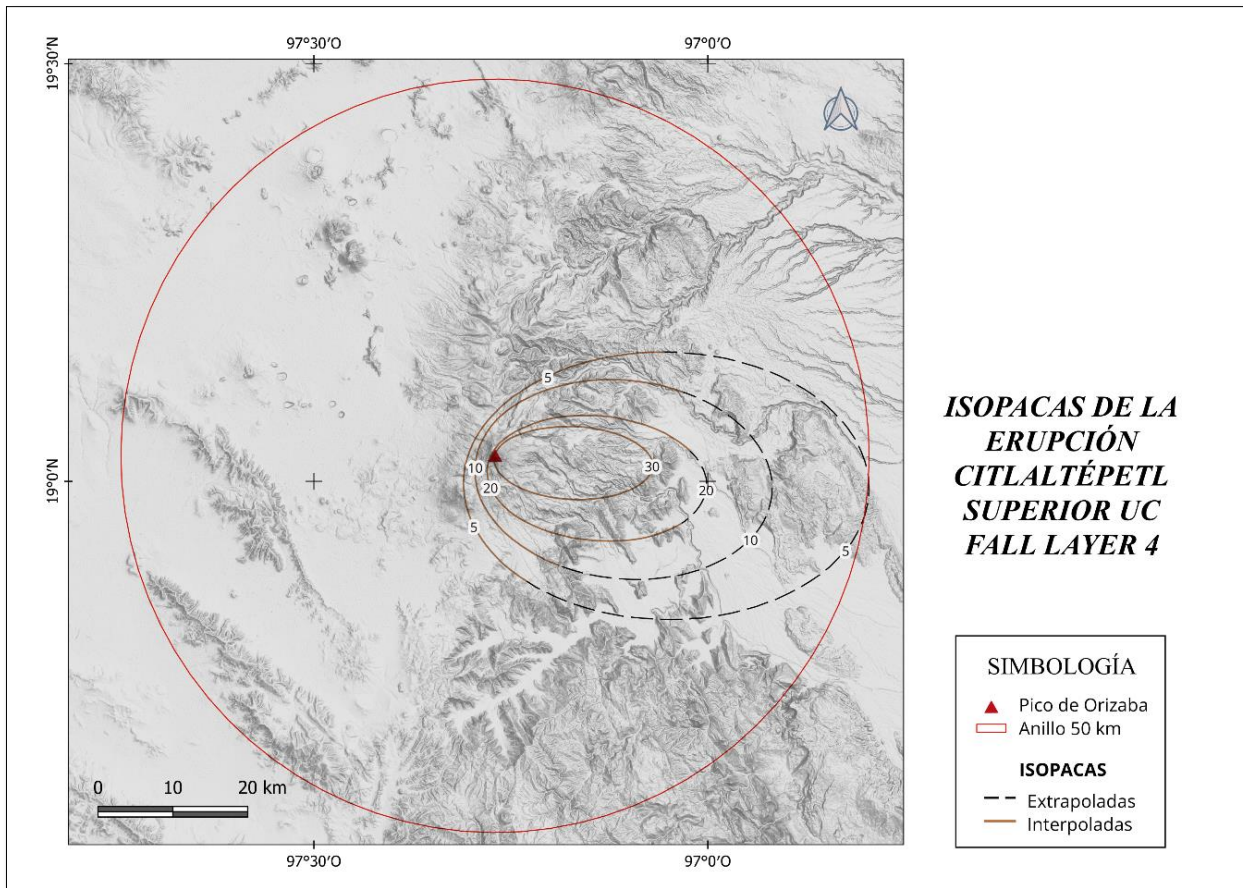


Figura 17. Mapa realizado con base en los mapas de peligros de Torres-Orozco et al. (2026). Segundo evento eruptivo.

El mapa 17 representa el segundo escenario eruptivo, las isopacas muestran los depósitos de la columna pliniana, se identifica como un evento considerablemente mayor, con un alcance superior y con una orientación N-E, presuntamente favorecidas por la dirección del viento. Las isopacas marcan la distribución de los depósitos alcanzados con espesores de 5, 10, 20 y 30 cm.

El alcance máximo estimado en QGIS con base en estos datos hacia el N-E es de 50 km aproximadamente, desde el cráter hacia la isopaca que corresponde al depósito de 5 cm.

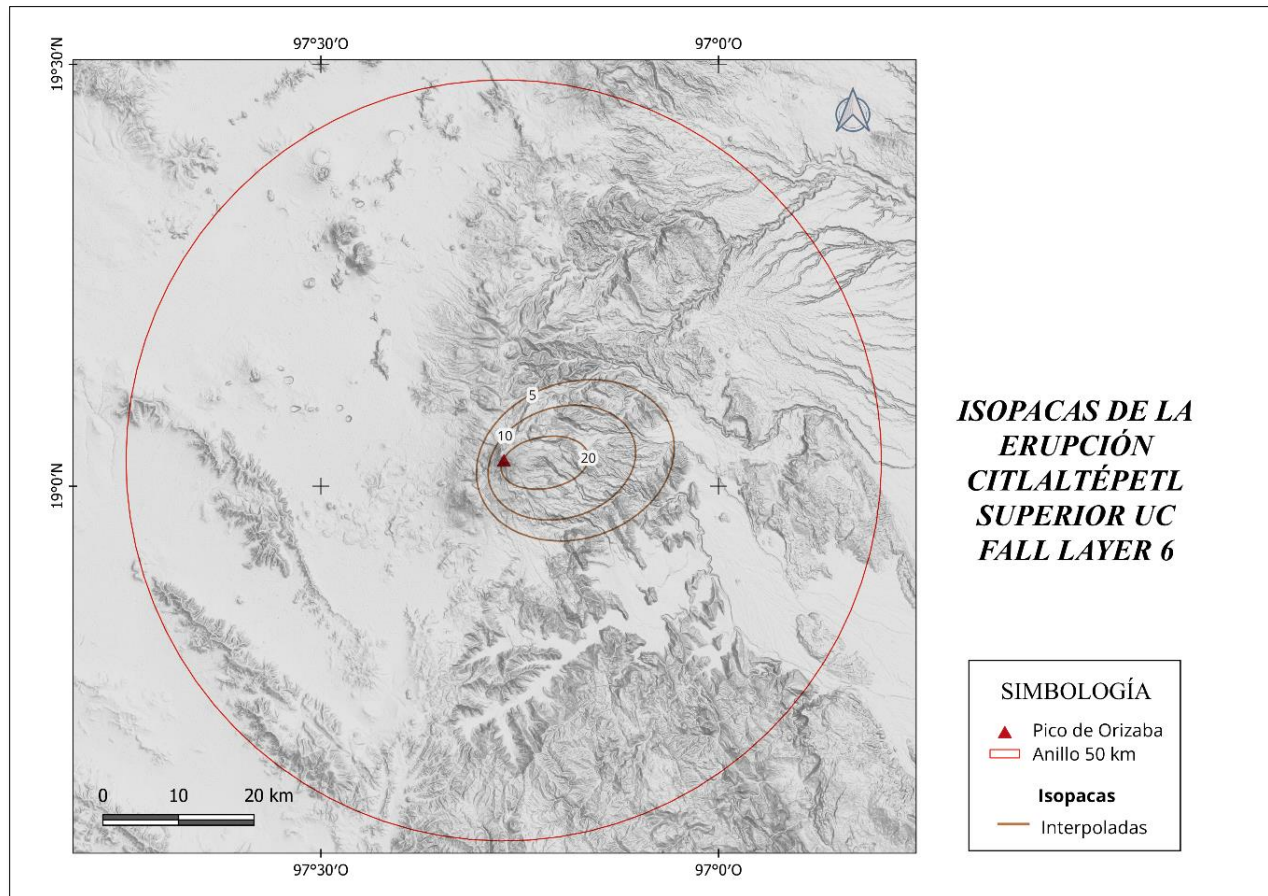


Figura 18. Mapa realizado con base en los mapas de peligros de Torres-Orozco et al. (2026). Tercer evento eruptivo.

El mapa 18 se considera un tercer evento eruptivo, en esta ocasión se muestra la distribución de una columna subpliniana con una cantidad de energía disipada y comenzando a colapsar. La distribución también muestra una dirección preferencial hacia el N-E, favorecidas por la dirección del viento. Las isopacas muestran la distribución de los depósitos de espesores de 5, 10 y 20 cm.

El alcance máximo estimado en QGIS con estos datos es de 22.6 km desde el cráter hacia la elipse correspondiente a los depósitos de 5 cm.

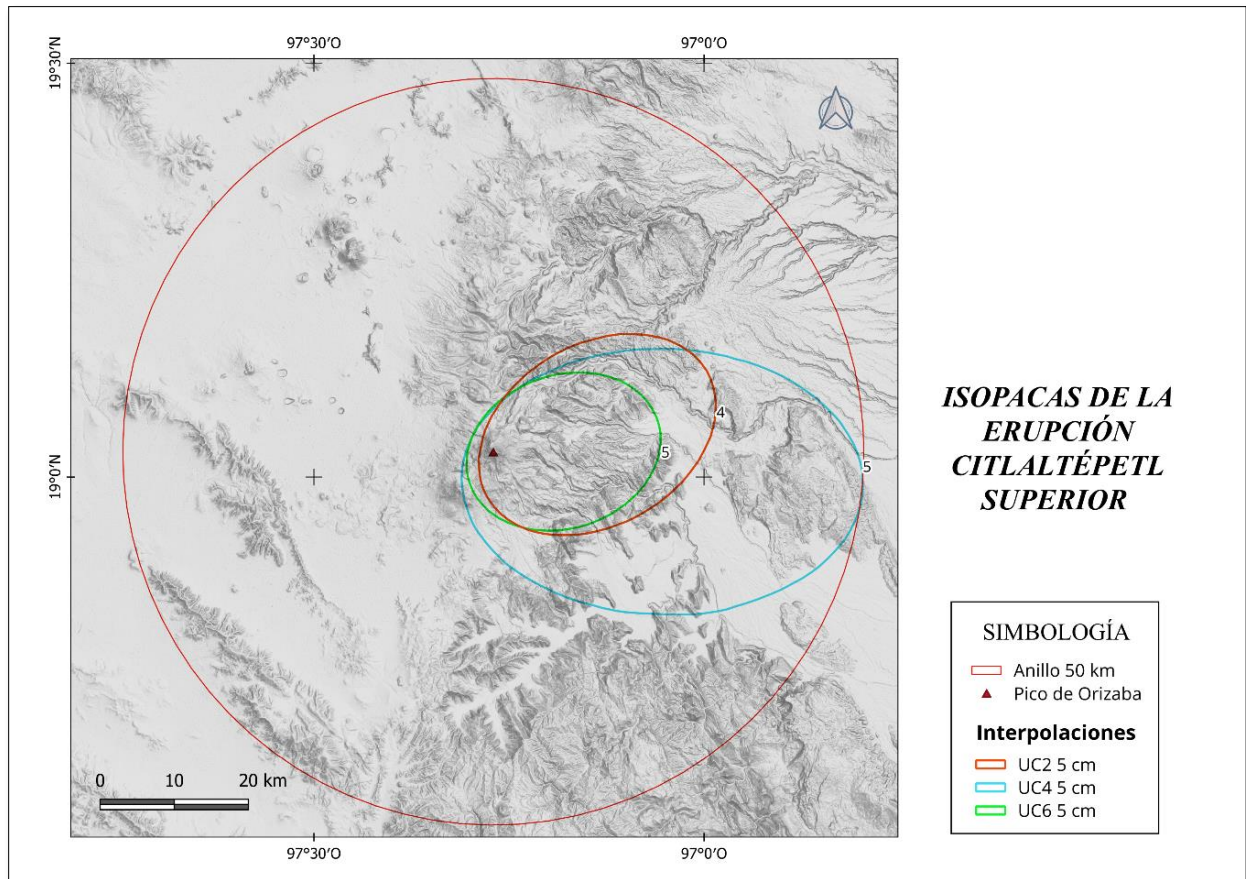


Figura 19. Mapa construido con base en los mapas de peligros de Torres-Orozco et al. (2026). Muestra las elipses de mayor alcance de los 3 eventos eruptivos considerados.

El mapa 19 muestra las elipses correspondientes a los eventos de mayor alcance identificados para cada uno de los eventos antes descritos. Se aprecia que la elipse de color azul asociada al UC Fall Layer 4, que se manifiesta como el evento eruptivo pliniano de mayor alcance. Esta elipse engloba parcialmente áreas afectadas por los dos eventos considerados, evidenciando un alcance significativamente superior.

Debido a su mayor extensión y cobertura territorial, este evento se considera como el escenario de referencia para la evaluación del peligro asociado a las corrientes de densidad piroclástica.

Interpolaciones

En la Tabla 11 se exponen los parámetros geométricos obtenidos en QGIS para cada una de las elipses correspondiente a los 3 eventos eruptivos. Para cada isopaca se calculó el área, la distancia máxima hacia la dispersión del viento partiendo del volcán DW y la distancia máxima perpendicular a esta CW.

Tabla 11. Valores de área, downwind y crosswind obtenidos para las isopacas de espesor de los depósitos de caída en los tres eventos eruptivos analizados.

Escenario	Espesor	Área km²	DW km	CW km
UC2	4	649	30.918226	24.340309
UC2	6	402	25.426152	19.298677
UC2	8	207	19.570363	12.859061
Escenario	Espesor	Área km²	DW km	CW km
UC6	5	430	22.697272	20.537463
UC6	10	227	17.509375	14.581178
UC6	20	62	11.218697	6.749639
Escenario	Espesor	Área km²	DW km	CW km
UC4	5	1512	50.114392	35.574588
UC4	10	824	37.355733	26.31724
UC4	20	382	28.554843	16.560573
UC4	30	160	21.034836	9.662394

Con los valores de la Tabla 11 se construyeron las gráficas presentadas en la Tabla 12, en donde se evaluó la relación entre espesor vs área, espesor vs downwind y espesor vs crosswind. Para cada evento se realizó un ajuste exponencial con el fin de obtener una ecuación representativa que describiera el comportamiento de los datos.

Adicionalmente, se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) para cada ajuste, con él se evaluó la calidad de la representación matemática obtenida. Los valores de R^2 resultaron próximos a 1 en todos los casos, lo que indica que las funciones exponenciales se ajustan adecuadamente a la variabilidad observada de los datos.

Tabla 12. Gráficas y ecuaciones de ajuste exponencial obtenidas para las relaciones entre espesor, área, downwind y crosswind de las isopacas correspondientes a cada uno de los eventos eruptivos analizados, incluyendo sus respectivos coeficientes de determinación (R^2).

Escenario	Gráfica del Área	Gráfica del DW	Gráfica del CW
UC2	Área (km²) UC2 $y = 2098.4e^{-0.286x}$ $R^2 = 0.9917$	DW (m) UC2 $y = 49388e^{-0.114x}$ $R^2 = 0.9929$	CW (m) UC2 $y = 47427e^{-0.16x}$ $R^2 = 0.9742$
UC4	Área (km²) UC4 $y = 2175.7e^{-0.087x}$ $R^2 = 0.986$	DW (m) UC4 $y = 55771e^{-0.033x}$ $R^2 = 0.9683$	CW (m) UC4 $y = 45258e^{-0.051x}$ $R^2 = 0.9973$
UC6	Área (km²) UC6 $y = 822.78e^{-0.129x}$ $R^2 = 1$	DW (m) UC6 $y = 28356e^{-0.047x}$ $R^2 = 0.998$	CW (m) UC6 $y = 30186e^{-0.075x}$ $R^2 = 0.9988$

En la Tabla 13 se aprecian los valores estimados por medio de las ecuaciones de la Tabla 12, las cuales se emplearon para determinar los parámetros geométricos de las isopacas correspondientes a los espesores de 1, 5 y 10 cm en especial para el evento eruptivo UC2. En el caso de los eventos UC4 y UC6, únicamente se estimaron los valores asociados a las isopacas de 1 cm.

Igualmente, se incluye el error porcentual calculado con la diferencia entre el área estimada de las ecuaciones de interpolación y el área obtenida durante la construcción de las elipses en QGIS. Los bajos porcentajes de variación obtenidos evidencian una alta concordancia entre los valores estimados y los obtenidos a partir de la geometría construida en QGIS.

Tabla 13. Parámetros geométricos estimados para las isopacas de 1, 5 y 10 cm mediante las ecuaciones de ajuste exponencial, incluyendo el error porcentual entre las áreas calculadas y las áreas obtenidas en QGIS.

Escenario	Espesor (cm)	Resultado Área Calculada km²	DW Calculado m	CW Calculado m	Área obtenida km²	Error porcentual % (área)
UC2	1	1576	44067	40415	1572	0.28
UC2	5	502	27930	21310	501	0.23
UC2	10	120	15795	9575	120	0.14
Escenario	Espesor (cm)	Resultado Área Calculada km²	DW Calculado m	CW Calculado m	Área obtenida km²	Error porcentual % (área)
UC4	1	1994	53961	43008	1989	0.27
Escenario	Espesor (cm)	Resultado Área Calculada km²	DW Calculado m	CW Calculado m	Área obtenida km²	Error porcentual % (área)
UC6	1	723	27054	28005	721	0.30

Niveles de peligro

Los niveles siguientes de peligro se construyeron desde la revisión de diversos estudios relacionados con la evaluación de efectos físicos y económicos generados por la acumulación de ceniza volcánica, de tal modo que la escala para este estudio se clasificó en los 4 niveles siguiente:

- Bajo ≤ 1 cm Molestias respiratorias, reducción de visibilidad, afectaciones menores a servicios y actividades cotidianas.
- Medio > 1 cm a ≤ 5 cm Impactos importantes en transporte, agricultura, infraestructura sensible y actividades económicas.
- Alto > 5 cm a ≤ 10 cm Acumulación considerable de ceniza, incremento de daños materiales y mayores costos de limpieza y recuperación.

- Muy alto >10 cm Daños severos a infraestructura, posibles fallas estructurales, pérdidas agrícolas significativas e impactos socioeconómicos mayores.

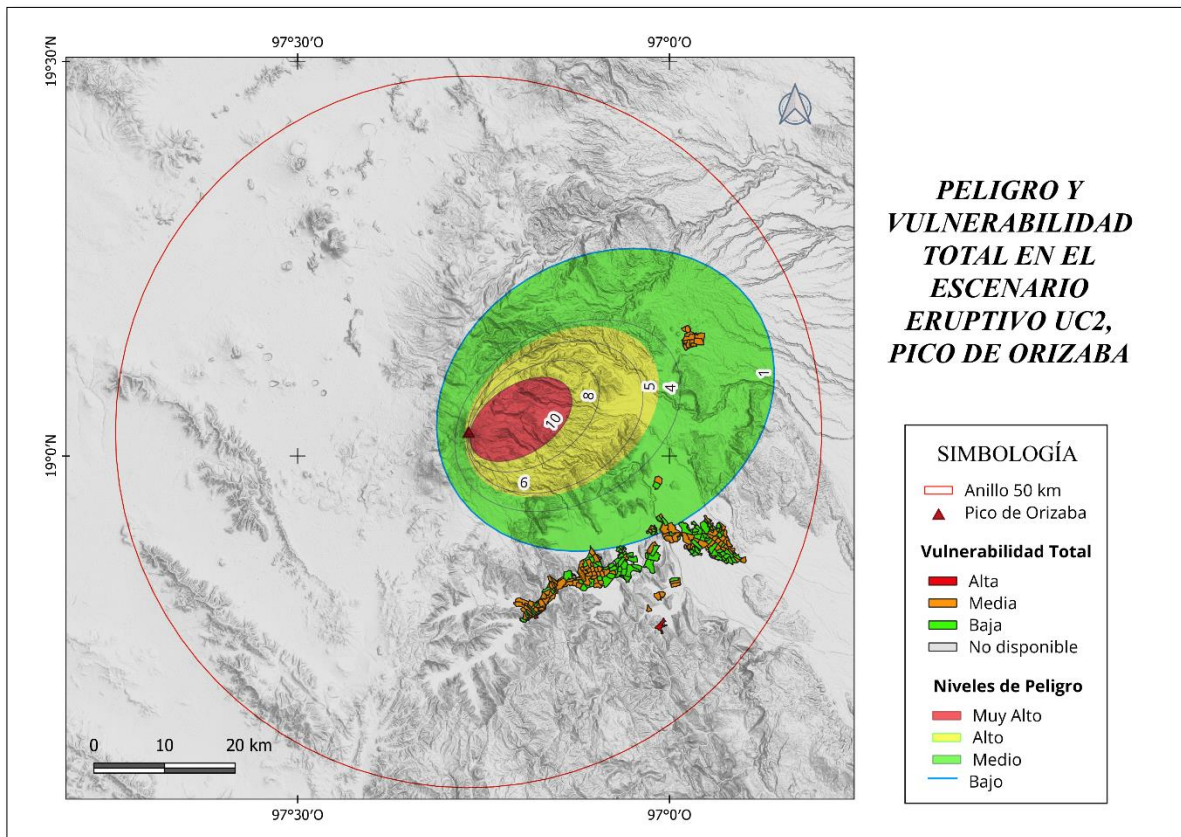


Figura 20. Mapa que muestra las zonas de peligro ante caída de ceniza, en conjunto con la vulnerabilidad total para el escenario UC2.

La Figura 20 muestra la zonificación de peligro para el escenario UC2, establecido bajo los términos de los niveles de peligro antes mencionados y construido bajo las isopacas de espesores. El nivel de peligro Muy alto se representa mediante el polígono más interno en color rojo, delimitado por la isopaca de 10 cm de espesor. El nivel Alto se encuentra entre las isopacas de 5 y 10 cm, representado en color amarillo. Entre las isopacas de 1 y 5 cm esta la zona de peligro Medio mostrada en color verde. Finalmente, el nivel de peligro Bajo se localiza fuera de la isopaca de 1 cm, delimitado por la línea azul que representa la isopaca de 1 cm. Reflejando la disminución progresiva del peligro a medida que aumenta la distancia respecto al cráter del volcán.

Además, se observa la distribución de vulnerabilidad total de las localidades ubicadas dentro del área de estudio, clasificada en los niveles de alto, medio y bajo. La mayor concentración de localidades se concentra en los niveles de peligro bajo y medio.

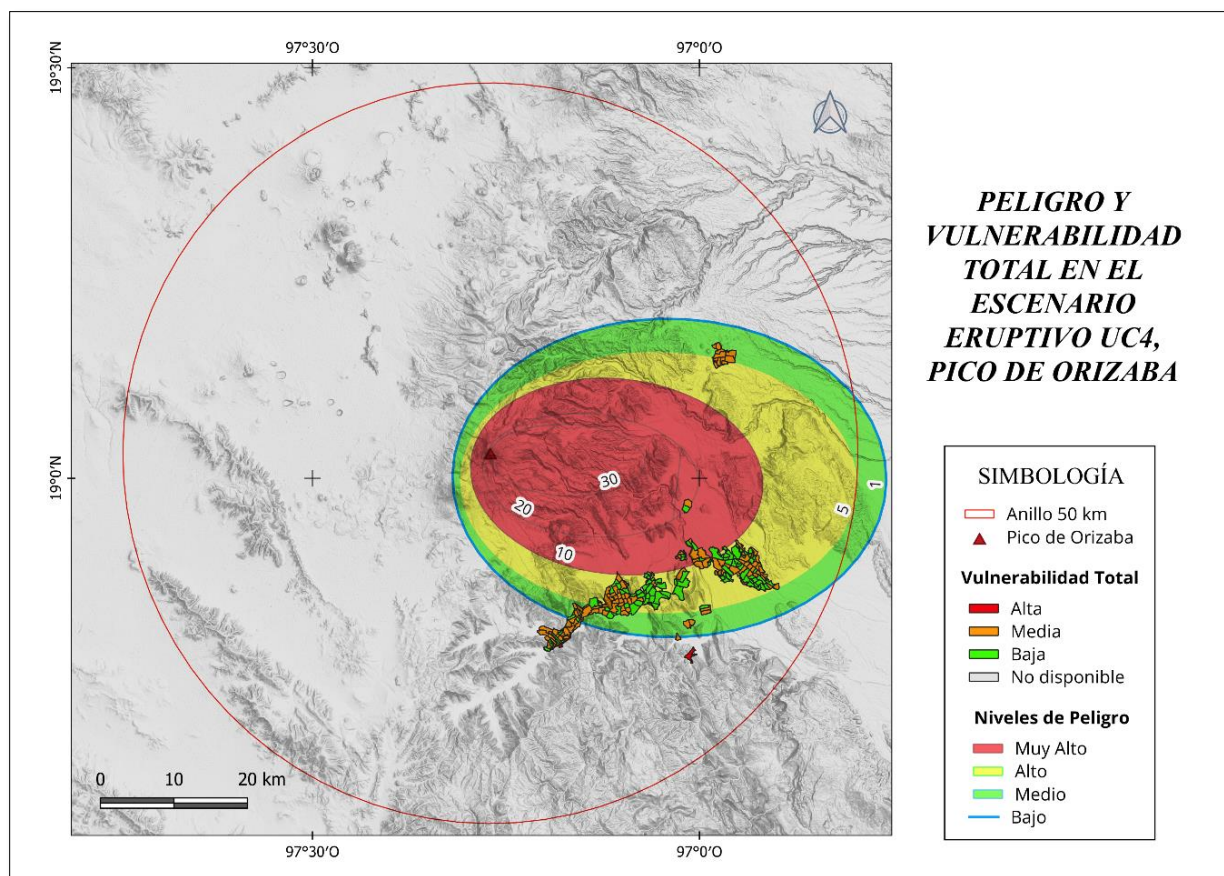


Figura 21. Mapa que muestra las zonas de peligro ante caída de ceniza, en conjunto con la vulnerabilidad total para el escenario UC4.

La Figura 21 presenta la zonificación de los niveles de peligro para el escenario eruptivo UC4, construida bajo los términos de los niveles de peligro y las isopacas de espesores. El nivel de peligro Muy alto corresponde a la zona contenida dentro de la isopaca de 10 cm de espesor, que a su vez contiene a las isopacas de 20 y 30 cm, mostrándose en color rojo. El nivel Alto comprende la zona en color amarillo situada entre las isopacas de 5 y 10 cm, mientras que el nivel Medio está ubicado entre las isopacas de 1 y 5 cm, mostrado en color verde. Por último, el nivel Bajo se extiende desde la isopaca de 1 cm hacia el exterior, delimitada por la línea azul.

También, se muestra la distribución de la vulnerabilidad total de las localidades dentro del área de estudio, clasificadas en los niveles alto, medio y bajo. En este escenario podemos ver que la distribución de la concentración de las localidades se encuentra en los 4 niveles de peligro, pero la mayor concentración se localiza en la zona de nivel alto.

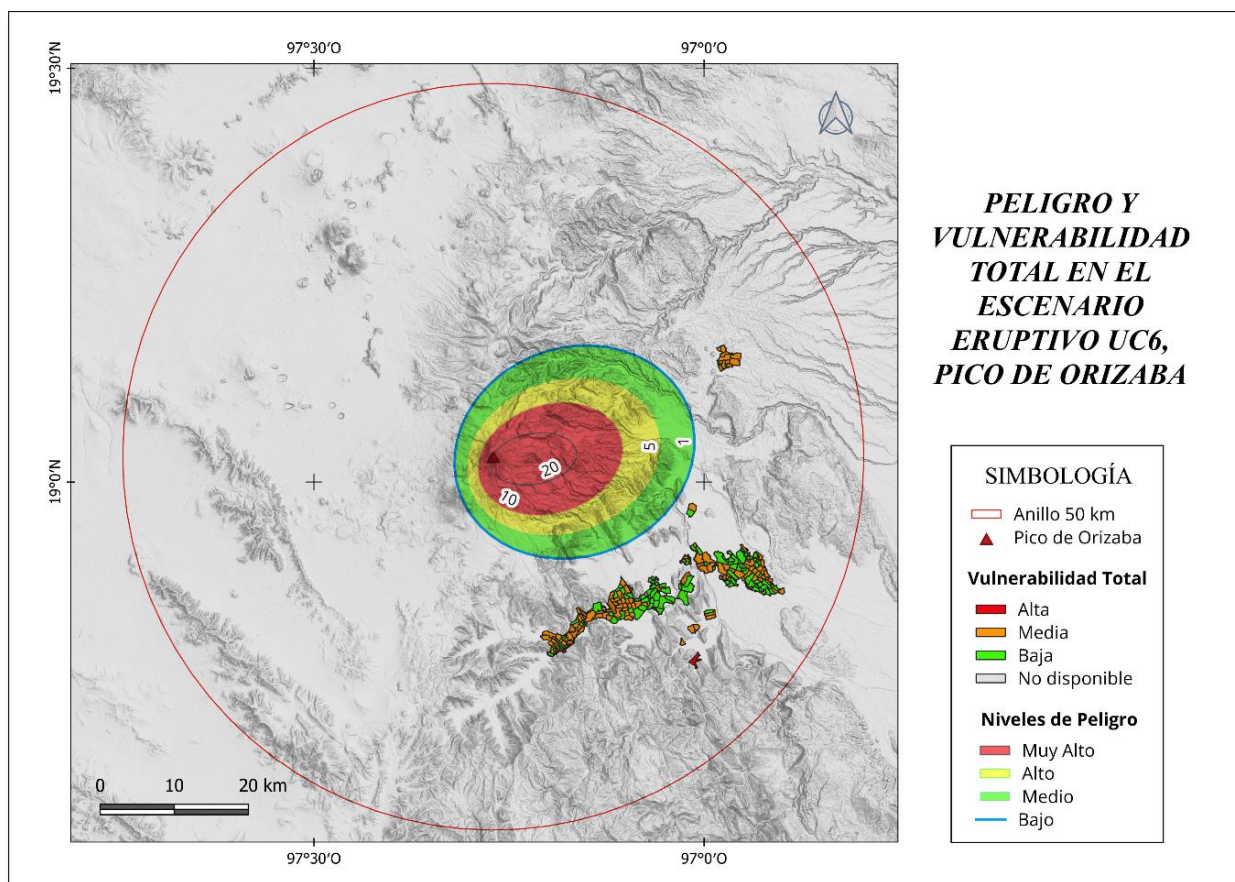


Figura 22. Mapa que muestra las zonas de peligro ante caída de ceniza, en conjunto con la vulnerabilidad total para el escenario UC6.

La Figura 22 muestra la distribución de la zonificación de los niveles de peligro para el escenario eruptivo UC6, contruidos mediante los niveles de peligro antes mencionados y las isopacas de peligro. El nivel de peligro Muy alto se encuentra contenidas entre las isopacas de 10 cm en color rojo que a su vez contiene las isopacas de 20 cm. El nivel Alto se comprende de la zona entre las isopacas de 5 y 10 cm, presentadas en color amarillo. El nivel Medio está entre la zona de las isopacas de 1 y 5 cm, representadas en color verde. Por último, el nivel Bajo se extiende desde la isopaca de 1 cm hacia el exterior, delimitada por la línea azul.

Además, se observa la distribución de la vulnerabilidad total de las localidades ubicadas dentro del área de estudio, clasificadas en los niveles alto, medio y bajo. Para este escenario se identifica que las localidades se encuentran en las categorías del nivel de peligro Bajo.

Estimación del riesgo

La matriz base utilizada quedó de 3 niveles de vulnerabilidad (Bajo, Medio y Alto) por 4 niveles de peligro (Bajo, Medio, Alto y Muy alto).

Tabla 14. Matriz base.

	NIVEL	VULNERABILIDAD		
		BAJO	MEDIO	ALTO
PELIGRO	BAJO			
	MEDIO			
	ALTO			
	MUY ALTO			

La propuesta de clasificación de matriz de acuerdo con los datos que se tienen fue elaborada con los valores asignados de peligro, 1 para el nivel más bajo, 2 para el medio, 3 alto y 4 muy alto. En el caso de vulnerabilidad 1 para el nivel Bajo, 2 medio y 3 para el alto, al realizar el cruce de ambos parámetros se estiman valores desde 2 hasta 7.

Tabla 15. Matriz de riesgo final.

	NIVEL	VULNERABILIDAD		
		BAJO	MEDIO	ALTO
PELIGRO	BAJO	2	3	4
	MEDIO	3	4	5
	ALTO	4	5	6
	MUY ALTO	5	6	7

Clasificación de niveles de peligro

Con los valores obtenidos se hizo una clasificación de 3 niveles:

Riesgo bajo → 2 – 3

Riesgo medio → 4 – 5

Riesgo alto → 6 - 7

Con base en estos niveles se realizaron los mapas de riesgo para cada escenario.

ESCENARIO UC2

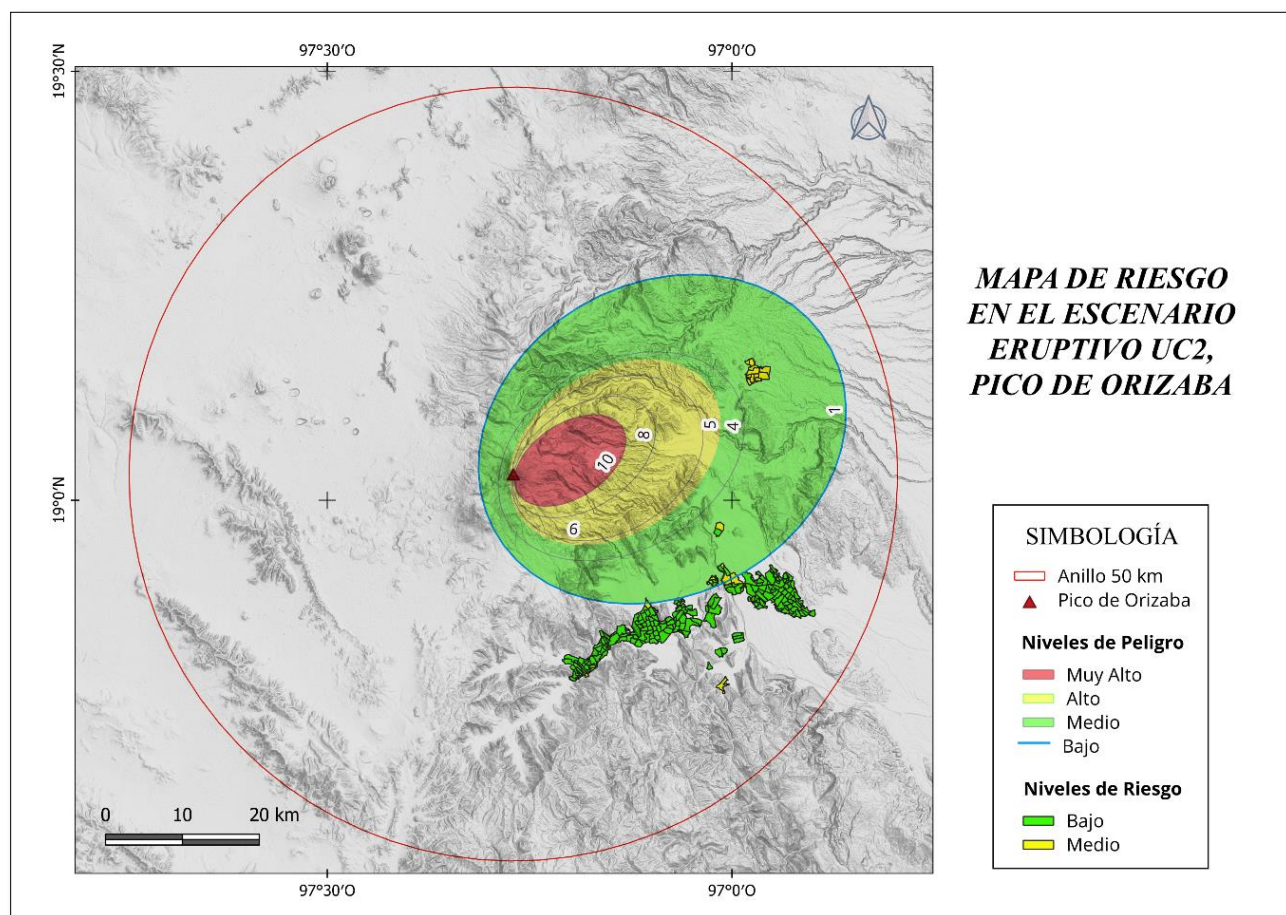


Figura 23. Mapa de riesgo para el escenario UC2

El mapa 23 muestra la distribución del riesgo para las localidades consideradas dentro de la zona de estudio del escenario UC2. Concentrándose principalmente dentro de las zonas del peligro bajo y medio, por ello, la combinación de estos niveles de peligro con las categorías de vulnerabilidad genera valores de riesgo comprendidos entre 2 y 5. De acuerdo con la clasificación establecida para el riesgo, estos valores corresponden a niveles de riesgo bajo y medio, de tal modo que en la matriz de riesgo para este escenario solo se contemplan dos de los tres niveles de riesgo, sin identificarse localidades con riesgo alto.

En este escenario eruptivo para localidades con una concentración mayor a 20,000 habitantes se manifiesta una tendencia alta en el nivel de riesgo bajo y Huatusco de Chicuellar si se ve inmerso dentro del nivel medio, en conjunto con algunas zonas de Fortín de la Flores.

ESCENARIO UC4

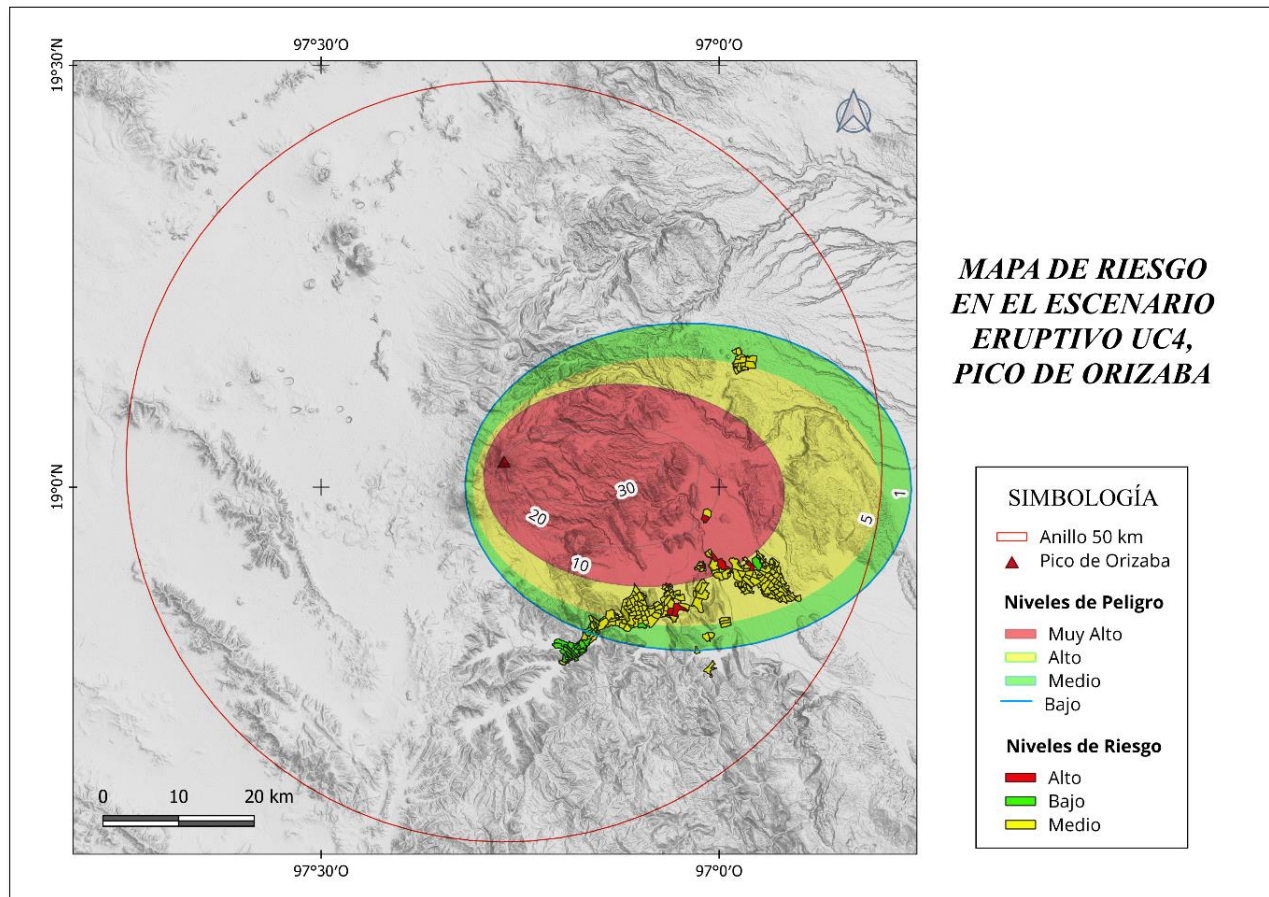


Figura 24. Mapa de riesgo para el escenario eruptivo UC4.

El mapa 24 muestra la distribución de riesgo para las localidades consideradas dentro de la zona de estudio del escenario UC4. Para este caso, las localidades se encuentran distribuidas y presentes en los 4 niveles de peligro, bajo, medio, alto y muy alto. Por consiguiente, al hacer el cruce del peligro con los niveles de vulnerabilidad se obtiene valores desde 2 hasta 7. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los tres niveles de riesgo establecidos. A partir de estos resultados, la matriz de riesgo permite identificar y representar los tres niveles de riesgo considerados en el análisis.

En este escenario eruptivo, para las localidades con una población superior a 20,000 habitantes, predomina el nivel de riesgo medio. Este nivel se presenta principalmente en las localidades de Huatusco de Chicuellar, Orizaba, Fortín de las Flores, Ixtaczoquitlán, Río Blanco y algunas zonas de Nogales. Por su parte, Ciudad Mendoza es la única localidad que presenta un nivel de riesgo bajo. Finalmente, el nivel de riesgo alto se concentra en zonas muy puntuales dentro del área de estudio.

ESCENARIO UC6

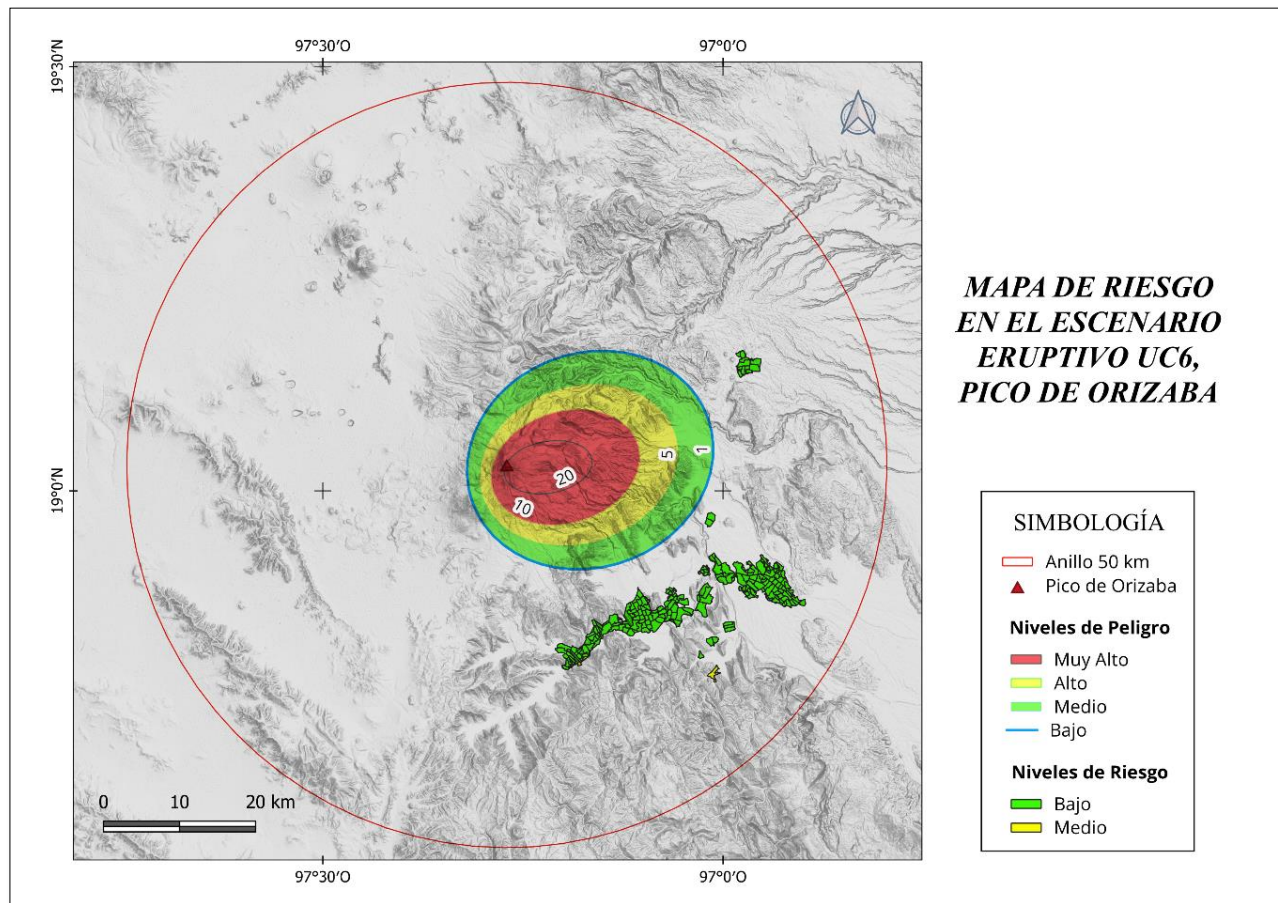


Figura 25. Mapa de riesgo para el escenario UC6.

El mapa 25 muestra la distribución del riesgo para las localidades consideradas dentro de la zona de estudio para el escenario UC6. Para este caso, la distribución se encuentra concentrada después de la isopaca de 1 cm, por ello se consideran dentro del nivel de peligro bajo; al hacer el cruce con los niveles de la vulnerabilidad (Bajo, Medio y Alto) se obtienen valores entre 2 y 4. En la clasificación de la matriz de riesgo estos valores encajan en los niveles de riesgo bajo y medio.

En este escenario eruptivo las localidades con presencia mayor a 20,000 habitantes demuestran una tendencia alta en el nivel de riesgo bajo. Todas las localidades presentadas tienen una tendencia muy alta a presentar un nivel de riesgo bajo.

Capítulo 6. Discusión

Los resultados obtenidos permiten identificar las localidades con mayor riesgo ante caída de ceniza; sin embargo, se interpretan considerando las limitaciones metodológicas que el trabajo presenta. En primer lugar, la evaluación de la vulnerabilidad se estimó únicamente considerando indicadores sociales como discapacidad, menores de edad, adultos mayores, etnicidad, educación y falta de afiliación a servicios médicos; todos estos datos derivados de información censal, en consecuencia, no se incorporaron datos de vulnerabilidad física, tales como la calidad y tipo de materiales de construcción, la infraestructura crítica o la capacidad de los servicios básicos. La inclusión de este u otros factores asociados podría modificar el valor de vulnerabilidad al obtener una escala en conjunto con vulnerabilidad física y social. De igual manera, al verse afectada la vulnerabilidad habría un impacto en la escala del riesgo, particularmente en aquellas localidades donde las condiciones constructivas difieren significativamente de las características socioeconómicas de la población.

También debe considerarse que el análisis se restringió a localidades con más de 20,000 habitantes ubicadas dentro de un radio de 50 km alrededor del volcán. Esta decisión permitió delimitar el trabajo y enfocarse en solo ciertas localidades potencialmente expuestas. No obstante, este filtro excluye asentamientos de menor tamaño como se muestra en la Figura 26. Dichas localidades podrían experimentar niveles de exposición elevados debido a su proximidad reducida o por la dirección preferencial de la dispersión de los depósitos volcánicos. Además, su menor tamaño poblacional puede estar asociado con una menor disponibilidad o accesibilidad a servicios y recursos, como atención médica, educación, infraestructura y otros servicios básicos, lo que podría reducir aún más su capacidad para responder y recuperarse ante un evento volcánico.

En consecuencia, los mapas de riesgo obtenidos representan las condiciones de las localidades de mayor concentración poblacional dentro del área de estudio y no constituyen una evaluación total de todas las comunidades potencialmente afectadas. Por lo tanto, los asentamientos de menor tamaño representan un aspecto que deberá considerarse en estudios posteriores para obtener una evaluación más completa del riesgo volcánico en el área de influencia del volcán.

Estas limitaciones pueden contrastarse con el trabajo de Zavaleta Melo (2025), quien evaluó el riesgo por caída de piroclastos del Pico de Orizaba en un radio de 25 km, empleando dos escenarios eruptivos basados en las isopacas de Vázquez Montoya (2024). A diferencia de dicho trabajo, la presente investigación amplía el área de estudio a 50 km e incorpora tres escenarios (UC2, UC4 y UC6) con múltiples

espesores de depósitos de caída para cada uno, con base en los escenarios de Torres-Orozco et al. (2026), dando pie a una caracterización más amplia sobre el gradiente del peligro. En cuanto a la vulnerabilidad social, ambos estudios emplean indicadores sociales similares (densidad poblacional, discapacidad, grupos etarios, etnicidad, educación y acceso a salud) obtenidas de INEGI, y coinciden en la identificación de localidades de mayor población e infraestructura concentradas en el sector sureste (Zavaleta Melo, 2025). La principal diferencia metodológica radica en que Zavaleta Melo (2025) modela un solo espesor por evento, este trabajo evalúa múltiples espesores por escenario, permitiendo observar la variación de la exposición conforme cambia la intensidad del depósito dentro de un mismo evento eruptivo.

Pese a las limitaciones, la metodología presentada proporciona una aproximación útil para identificar zonas prioritarias y mejorar la planificación, posibilitando el reconocimiento de patrones de riesgo asociados a la interacción entre el peligro volcánico, la vulnerabilidad social y la exposición de elementos.

Finalmente, esta metodología permite destacar el papel del SIG como herramienta para la integración y análisis de información de distintas temáticas. A través de una serie de procesos de organización, análisis espacial e integración de datos, fue posible relacionar información correspondiente al peligro volcánico, la exposición y la vulnerabilidad social, y representarla mediante cartografía temática. De esta manera, el SIG no solo facilita la visualización espacial de una problemática compleja, sino que también permite identificar zonas prioritarias y generar información que puede contribuir a la planificación y a la toma de decisiones orientadas a la gestión del riesgo volcánico.

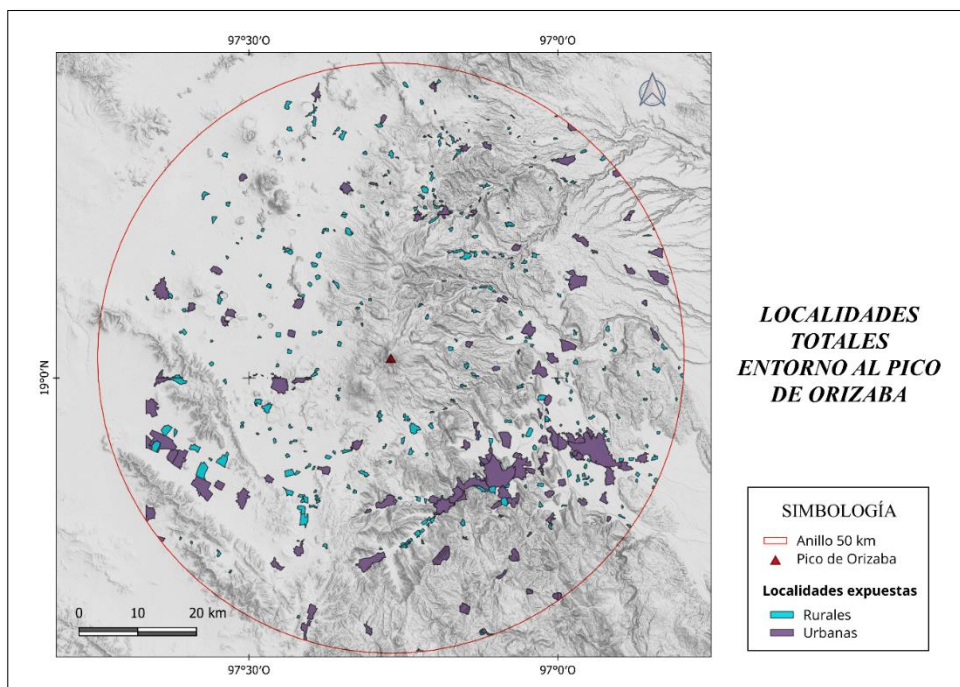


Figura 26. Mapa de localidades completas en torno al Pico de Orizaba, distribuidas en rurales y urbanas. Elaboración propia.

Capítulo 7. Conclusiones

La presente investigación permitió estimar el riesgo volcánico asociado a 3 eventos eruptivos del volcán Pico de Orizaba, mediante la integración de la información de peligro y vulnerabilidad social en un entorno de SIG.

En los objetivos planteados se determinó generar cartografía especializada capaz de identificar las localidades propensas a sufrir mayores daños ante un escenario eruptivo.

En relación con el primer y segundo objetivo particular, se representaron los niveles de peligro asociado a la caída de ceniza mediante la construcción de isopacas complementarias al trabajo de Torres-Orozco et al. (2026) y la construcción de un índice para su clasificación. En comparación con los mapas previamente expuestos por Torres-Orozco et al. (2026), los resultados muestran una mayor extensión de las áreas potencialmente afectadas, particularmente para el escenario UC4, que considera un evento pliniano de mayor magnitud. Los resultados evidencian que un incremento en la magnitud eruptiva amplía el alcance de las zonas de peligro y que incluso acumulaciones de algunos centímetros de tefra pueden generar afectaciones en áreas expuestas.

Con respecto al tercer y cuarto objetivo, la estimación de la vulnerabilidad social permitió representar la distribución de la vulnerabilidad social de las localidades dentro del área de estudio e identificar localidades con diferentes niveles de vulnerabilidad, determinados por las variables sociodemográficas relacionadas. Para ello se tomaron en cuenta los indicadores sociales relacionados a discapacidad, educación, etnicidad, grupos de edades vulnerables (menores de edad y adultos mayores) y personas afiliadas a algún servicio médico. Los resultados muestran una distribución heterogénea de la vulnerabilidad, predominantemente en los niveles bajo y medio, mientras que los niveles altos se manifiestan de manera puntual en sectores específicos.

Esta variación en los niveles demuestra que los daños en la población a causa de una posible erupción volcánica no dependen únicamente de la cercanía que presenten las localidades respecto al volcán, sino que también influyen las condiciones sociales y demográficas que caracteriza a cada localidad. La integración de estos factores permitió identificar que hay localidades con mayores limitaciones para responder y recuperarse de un evento volcánico.

De igual manera, mediante la integración de los niveles de peligro y vulnerabilidad se cumplió el objetivo de estimar el riesgo volcánico para los escenarios eruptivos seleccionados. Los mapas de riesgo obtenidos muestran que la distribución del

riesgo no depende únicamente de la intensidad del evento eruptivo, también se ve afectada por la ubicación de las poblaciones vulnerables dentro de las zonas de peligro.

Los resultados indican que el escenario UC4 presenta las condiciones de mayor riesgo, diferenciándose de los otros dos eventos principalmente por la mayor extensión de las zonas de peligro. Para este caso, la isopaca de 1 cm logra alcanzar aproximadamente 1,989 km² de superficie afectada, por lo cual se ve un incremento de localidades clasificadas dentro de un nivel de riesgo. Por el contrario, los escenarios UC2 y UC6 presentan una predominancia de riesgo bajo, asociado a una menor coincidencia entre las zonas de peligro y las localidades analizadas.

Los mapas generados muestran que las localidades ubicadas al sur y sureste del volcán son las que presentan una mayor exposición ante los escenarios considerados, puesto que coinciden con la dirección preferente de la dispersión de los depósitos volcánicos. Así pues, se resalta la importancia de incorporar procesos de planificación y gestión del riesgo volcánico.

La metodología aquí desarrollada demostró que la integración de parámetros de peligro y vulnerabilidad mediante herramientas de SIG es una alternativa eficiente para identificar las zonas de mayor prioridad para atender y monitorear. La cartografía obtenida sirve como apoyo para la toma de decisiones en cuestiones de gestión y reducción del riesgo ante desastres volcánicos alrededor del volcán Pico de Orizaba.

Finalmente, es posible plantear trabajos futuros que incorporen variables de vulnerabilidad física y localidades con menor concentración poblacional, así como la posibilidad de considerar otros peligros volcánicos asociados al Pico de Orizaba, con el fin de desarrollar diferentes mapas de riesgo de acuerdo con cada peligro volcánico y diferentes eventos eruptivos. Con dicha información las autoridades competentes pueden desarrollar diferentes planes de respuesta y fortalecer la resiliencia de las poblaciones más vulnerables.

Referencias

- Alcalá-Reygosa, J., Vázquez-Selem, L., & Zamorano, J. J. (2020). Fechamiento de flujos de lava del Holoceno tardío en el volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba) mediante el isótopo cosmogénico ^{36}Cl y liquenometría e implicaciones para la cronología eruptiva. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), e260919.
<https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a260919>
- Aneas de Castro, S. D. (2000). Riesgos y peligros: Una visión desde la geografía. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, (60).
<https://japt.es/riesgos/textosriesgos/riesgos/peligros.pdf>
- Aznar-Crespo, P., & Aledo, A. (2020). Sociología del riesgo y de los desastres socio-ambientales [Material docente]. Repositorio Institucional, Universidad de Alicante.
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/118151/1/Clase-Sociologia-del-Riesgo-y-de-los-Desastres.pdf>
- Blong, R. J. (1996). Volcanic hazards risk assessment. En R. Scarpa & R. I. Tilling (Eds.), *Monitoring and mitigation of volcano hazards* (pp. 675–698). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0_20
- Blong, R. J., Grasso, P., Jenkins, S. F., Magill, C. R., Wilson, T. M., McMullan, K., & Kandlbauer, J. (2017). Estimating building vulnerability to volcanic ash fall for insurance and other purposes. *Journal of Applied Volcanology*, 6, 2.
<https://doi.org/10.1186/s13617-017-0054-9>
- Calvin, E. M., Kudo, A. M., Brookins, D. G., & Ward, D. B. (1989). Strontium isotope and trace element geochemistry of Pico de Orizaba–Trans-Mexican Volcanic Belt: Comparison phases II and III. En *Continental magmatism: Abstracts* (New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources Bulletin No. 131, p. 38).
- Carrasco-Núñez, G. (1999). Holocene block-and-ash flows from summit dome activity of Citlaltépetl volcano, Eastern Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 88(1–2), 47–66.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00110-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00110-3)
- Carrasco-Núñez, G. (2000). Structure and proximal stratigraphy of Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), Mexico. En H. Delgado-Granados, G. Aguirre-Díaz, & J. Stock (Eds.), *Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico* (Geological Society of America Special Paper No. 334, pp. 247–262). Geological Society of America.
<https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.247>
- Carrasco-Núñez, G., & Ban, M. (1994). Geologic map and structure sections of the summit area of Citlaltépetl volcano, México, with summary of the geology of the Citlaltépetl volcano summit area (Cartas Geológicas y Mineras No. 9). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- Carrasco-Núñez, G., & Rose, W. I. (1995). Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), México, 8.5–9.0 ka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69(3–4), 197–215.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00023-2)
- Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., & Lozano, L. V. (1997). Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area, Central Mexico (Geological Society of America Map and Chart Series No. MCH 081). Geological Society of America.
- Carrasco-Núñez, G., Hubbard, B. E., Siebe, C., & Rodríguez-Elizarrarás, S. (2001). Mapa de peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Carrasco-Núñez, G., Vallance, J. W., & Rose, W. I. (1993). A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: Implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59(1–2), 35–46.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(93\)90076-4](https://doi.org/10.1016/0377-0273(93)90076-4)
- Cas, R., Giordano, G., & Wright, J. V. (2024). *Volcanology: Processes, deposits,*

- geology and resources (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66613-6>
- Castañeda Bastida, E., Espinasa Pereña, R., Caballero Jiménez, G. V., & Valderrama Membrillo, S. (2018). Volcán Citlaltépetl. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Subdirección de Riesgos Volcánicos, Dirección de Investigación.
 - Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2025, 14 de abril). ¿Qué pasa con el volcán Pico de Orizaba? Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/que-pasa-con-el-volcan-pico-de-orizaba?idiom=es>
 - Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2015). Programa de manejo del Parque Nacional El Pico de Orizaba. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
 - Contraloría Municipal del Honorable Ayuntamiento del Municipio de Puebla. (2016). Guía para la elaboración de las matrices de riesgos. <https://memorias.pueblacapital.gob.mx/images/transparencia/obl/01marco/inter/guia.matrices.pdf>
 - Crystalinks. (s. f.). Volcanoes, prophecy, mythology. <https://www.crystalinks.com/volcanomyth.html>
 - Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
 - De la Cruz-Reyna, S., & Carrasco-Núñez, G. (2002). Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113(1–2), 307–318. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00263-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00263-3)
 - Escamilla Bouchán, I., Moreno Ibarra, M., & Torres Ruiz, M. (2011). Valoración de la vulnerabilidad de objetos geográficos usando representaciones conceptuales [PDF]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/eventos/2011/infogeo/ET1_21_ESCAMILLA.pdf
 - Espinasa-Pereña, R., Arámbula, R., Ramos, S., Sieron, K., Capra, L., Hernández-Oscoy, A., Alatorre, M., & Córdoba-Montiel, F. (2021). Monitoring volcanoes in Mexico. *Volcanica*, 4(S1), 223–246. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.223246>
 - Ferrés-López, D., & Caballero-García, L. (2025). Riesgo volcánico. En M. P. Jácome Paz (Coord.), *Evaluación de riesgo geológico: Libro de enseñanza* (pp. 124–165). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. <https://doi.org/10.22201/igef.9786076420515e.2024>
 - Fierstein, J., & Nathenson, M. (1992). Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bulletin of Volcanology*, 54(2), 156–167. <https://doi.org/10.1007/BF00278005>
 - Franco-Ramos, O., Ballesteros-Cánovas, J. A., Figueroa-García, J. E., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M., & Caballero, L. (2020). Modelling the 2012 lahar in a sector of Jamapa Gorge (Pico de Orizaba volcano, Mexico) using RAMMS and tree-ring evidence. *Water*, 12(2), 333. <https://doi.org/10.3390/w12020333>
 - Global Volcanism Program. (s. f.). Pico de Orizaba (Citlaltépetl). Smithsonian Institution, National Museum of Natural History. Recuperado el 16 de junio de 2026, de <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=341100>
 - Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 227–283. <https://doi.org/10.18268/BSGM2005v57n3a2>
 - Gómez Vázquez, Á., Hernández Bello, M. G., Caballero Jiménez, G. V., & Martínez Bringas, A. (2023). Estudios hidrogeoquímicos, geodésicos y actividad sísmica en el volcán Pico de Orizaba. En *Estudios e investigaciones 2023*. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

- Höskuldsson, A., Robin, C., & Cantagrel, J. M. (1990). Repetitive debris avalanche events at Volcano Pico de Orizaba, México, and their implications for future hazard zones [Resumen de congreso]. IAVCEI International Volcanological Congress, Mainz, Germany, p. 47.
- Höskuldsson, A., & Robin, C. (1993). Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, Eastern Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 55(8), 571–587. <https://doi.org/10.1007/BF00301810>
- Jácome-Paz, M. P., & Novelo-Casanova, D. (2025). Riesgo. En M. P. Jácome Paz (Coord.), *Evaluación de riesgo geológico: Libro de enseñanza* (pp. 25–33). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. <https://doi.org/10.22201/igef.9786076420515e.2024>
- Jenkins, S., Magill, C., McAneney, J., & Blong, R. (2012). Regional ash fall hazard I: A probabilistic assessment methodology. *Bulletin of Volcanology*, 74(7), 1699–1712. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0627-8>
- Jenkins, S. F., Wilson, T. M., Magill, C. R., Miller, V., & Stewart, C. (2014). Volcanic ash fall hazard and risk: Technical background paper for the UN-ISDR 2015 global assessment report on disaster risk reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Jenkins, S. F., Wilson, T. M., Magill, C. R., Miller, V., Stewart, C., Blong, R., Marzocchi, W., Boulton, M., Bonadonna, C., & Costa, A. (2015). Volcanic ash fall hazard and risk. En S. C. Loughlin, S. Sparks, S. K. Brown, S. F. Jenkins, & C. Vye-Brown (Eds.), *Global volcanic hazards and risk* (pp. 173–222). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.005>
- Kudo, A. M., Jackson, M. E., Husler, J. M., Brookins, D. G., & Ward, D. B. (1985). Phase chemistry of recent andesite, dacite, and rhyodacite of Volcan Pico de Orizaba, Mexican Volcanic Belt: Evidence for xenolithic contamination. *Geofísica Internacional*, 24, 679–689.
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379–424. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a6>
- Martí, J., Pujadas, A., Ferrés, D., Planagumà, L., & Mallarach, J. M. (2012). *El vulcanismo: Guía de campo de la Zona Volcánica de la Garrotxa* (2.^a ed. rev.). Parque Natural de la Zona Volcánica de la Garrotxa. <https://parcsnaturals.gencat.cat/web/.content/Xarxa-de-parcs/garrotxa/coneix-nostra-feina/centre-documentacio/estudis/educacio-ambiental/vulcanisme-guia/2012-es.pdf>
- Negendank, J. F. W., Emmerman, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., & Werle, D. (1985). Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 24, 477–575.
- Newhall, C. G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C2), 1231–1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Ortega-Gutiérrez, F. (1991). Provincias geológicas de México. En *Texto explicativo de la Quinta Edición de la Carta Geológica de la República Mexicana* (Cap. VI). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- Pyle, D. M. (1989). The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 51(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/BF01086757>
- Que Salinas, S. U., Sieron, K., Córdoba Montiel, F., Torres-Orozco, R., Juárez Cerrillo, S. F., Castro-Artola, Ó., & Arámbula, R. (2022). Preparing a more systematic monitoring of the Pico de Orizaba volcano using modern tools of neural networks and artificial intelligence. *UVserva*, (14), 54–64. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi14.2895>
- Robin, C., & Cantagrel, J. M. (1982). *Le Pico de Orizaba (Mexique): Structure et*

- évolution d'un grand édifice andésitique complexe. *Bulletin of Volcanology*, 45, 299–315.
- Rodríguez, S. R., Mora-González, I., & Murrieta-Hernández, J. L. (2006). Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 223–236.
<https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a5>
 - Sánchez-González, D., & Egea-Jiménez, C. (2011). Enfoque de vulnerabilidad social para investigar las desventajas socioambientales: Su aplicación en el estudio de los adultos mayores. *Papeles de Población*, 17(69), 151–185.
 - Schiavo, B., Inguaggiato, C., Arredondo-Palacios, T. E., & Meza-Figueroa, D. (2021). Emisiones volcánicas: Origen e impacto en la atmósfera. *Epistemos (Sonora)*, 15(30), 39–45.
<https://doi.org/10.36790/epistemos.v15i30.160>
 - Schlumberger. (s.f.). *Isopaca*. En *Glosario de Schlumberger*. Recuperado el 28 de agosto de 2026, de <https://glossary.slb.com/es/terms/i/isopach>
 - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s. f.). Parque Nacional Pico de Orizaba: Protege ambientes de alta montaña. Gobierno de México. Recuperado el 16 de enero de 2026, de <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/parque-nacional-pico-de-orizaba-protecte-ambientes-de-alta-montana?idiom=es>
 - Sheridan, M. F., Carrasco-Núñez, G., Hubbard, B. E., Siebe, C., & Rodríguez-Elizarrarás, S. (2001). Mapa de peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
 - Siebe, H. C., Abrams, M., & Sheridan, M. (1993). Major Holocene block-and-ash fan at the western slope of ice-capped Pico de Orizaba volcano, México: Implications for future hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, 1–33.
 - Sieron, K. (s. f.). *Vulcanismo*. Universidad Veracruzana.
<https://www.uv.mx/apps/vulcanismo/>
 - Sieron, K., Córdoba-Montiel, F., & Pérez, J. C. (2017). El estudio del vulcanismo activo en el observatorio sismológico y vulcanológico del Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana. *UVserva*, (2).
<https://doi.org/10.25009/uvs.vi2.2369>
 - Sieron, K., Weissling, B., Morales-Martínez, M. A., & Teran, S. (2021). Reconstruction of the upper slope conditions of an extraordinary hydro-meteorological event along the Jamapa Glacier drainage system, Citlaltépetl (Pico de Orizaba) volcano, Mexico. *Frontiers in Earth Science*, 9, 668266.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.668266>
 - Singer, B. S., & Kudo, A. M. (1986). Origin of andesites and dacites from Pico de Orizaba, Mexican Volcanic Belt: Sr isotope and phase chemistry. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 18(2), 186.
 - Torres-Orozco, R., Vázquez-Montoya, M., Arce, J. L., Arzilli, F., Sieron, K., Rivera-Ballesteros, I., & Córdoba-Montiel, F. (2026). Contrasting eruptive dynamics and hazards of two Holocene andesitic sub-Plinian to Plinian eruptions, Lower and Upper Citlaltépetl, at Pico de Orizaba, Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 88, 98.
<https://doi.org/10.1007/s00445-026-02024-1>
 - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2009). Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Naciones Unidas.
https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
 - Vaiciulyte, S., Jerez-Ramírez, D. O., & Jácome-Paz, M. P. (2025). Vulnerabilidad y construcción social del riesgo. En M. P. Jácome Paz (Coord.), *Evaluación de riesgo geológico: Libro de enseñanza* (pp. 40–56). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica.
<https://doi.org/10.22201/igef.9786076420515e.2024>
 - Waitz, P. (1910–1911). Observaciones geológicas acerca del Pico de Orizaba.

- Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 7, 67–76.
- Wilches-Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global. Sistema Nacional de Emergencias. <https://www.gub.uy/sistema-nacional-emergencias/sites/sistema-nacional-emergencias/files/documentos/publicaciones/La%2Bvulnerabilidad%2Bsocial%20WILCHES%2BCHAUX.pdf>
 - Wilson, T. M., Jenkins, S. F., & Stewart, C. (2015). Volcanic ash fall impacts. En S. C. Loughlin, S. Sparks, S. K. Brown, S. F. Jenkins, & C. Vye-Brown (Eds.), Global volcanic hazards and risk (pp. 281–288). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.014>
 - Yáñez-García, C., & García-Durán, S. (1982). Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. Comisión Federal de Electricidad.
 - Zavaleta Melo, A. (2025). Evaluación del riesgo volcánico asociado al Pico de Orizaba [Tesis de licenciatura en Geografía]. Universidad Veracruzana.

Anexos 1

```
Código de RStudio
# =====
# 1 Librerías
# =====
library(readr)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(scales)
library(stringr)
# =====
# 2 Leer CSV
# =====
datos <- read_csv("D:/Users/Jessi/Documents/TESIS/MAPAS/procesos/CSV/tabla_atributos_2.csv")
datos$nombre <- iconv(
  iconv(datos$nombre, from = "UTF-8", to = "Latin1"),
  from = "Latin1", to = "UTF-8"
)
head(datos$nombre)
# =====
# 3 Limpiar nombres
# =====
datos$nombre <- str_squish(datos$nombre) # Quita espacios extra
datos$nombre <- str_to_title(datos$nombre) # Formato uniforme
# =====
# 4 Agrupar para eliminar duplicados
# =====
datos <- datos %>%
  group_by(nombre) %>%
  summarise(poblacion = sum(poblacion, na.rm = TRUE)) %>%
  ungroup()
# =====
# 5 Limpieza y estandarización
# =====
datos <- datos %>%
  select(nombre, tipo, nume_hab) %>%
  filter(!is.na(nume_hab)) %>%
  mutate(
    tipo = tolower(tipo),
    tipo = ifelse(tipo == "urbana", "Urbana", "Rural")
  )
# =====
# 6 Indicadores generales
# =====
# Total habitantes
total_habitantes <- sum(datos$nume_hab, na.rm = TRUE)
# Total localidades
total_localidades <- nrow(datos)
cat("Total de habitantes:", format(total_habitantes, big.mark=","), "\n")
cat("Total de localidades:", total_localidades, "\n")
# =====
# 7 Número y porcentaje de localidades
# =====
localidades_tipo <- datos %>%
  group_by(tipo) %>%
  summarise(numero_localidades = n()) %>%
  mutate(porcentaje = numero_localidades / sum(numero_localidades))
print(localidades_tipo)
# =====
# 8 Población total por tipo
# =====
poblacion_tipo <- datos %>%
  group_by(tipo) %>%
  summarise(poblacion_total = sum(nume_hab, na.rm = TRUE)) %>%
  mutate(porcentaje = poblacion_total / sum(poblacion_total))
print(poblacion_tipo)
```

```

# =====
# 9 Gráfica 1: Comparación de población
# =====
ggplot(poblacion_tipo,
  aes(x = tipo,
      y = poblacion_total,
      fill = tipo)) +
  geom_col(width = 0.6) +
  scale_y_continuous(labels = comma) +
  scale_fill_manual(values = c("deepskyblue", "green1"))
labs(title = "Distribución de la población por tipo de localidad",
  x = "Tipo de localidad",
  y = "Población total") +
  theme_minimal(base_size = 13) +
  theme(legend.position = "none")
# =====
# 10 Gráfica 2: Porcentaje de habitantes
# =====
ggplot(poblacion_tipo,
  aes(x = "",
      y = porcentaje,
      fill = tipo)) +
  geom_col(width = 1) +
  coord_polar("y") +
  geom_text(aes(label = scales::percent(porcentaje)),
    position = position_stack(vjust = 0.5),
    color = "white",
    size = 4) +
  scale_fill_manual(values = c("deepskyblue", "green1")) +
  labs(title = "Porcentaje de habitantes por tipo de localidad",
    fill = "Tipo") +
  theme_void(base_size = 13)
## =====
# 11 Localidades
# =====
top15 <- datos %>%
  group_by(nombre) %>%
  summarise(ume_hab = sum(ume_hab, na.rm = TRUE)) %>%
  ungroup() %>%
  slice_max(order_by = ume_hab, n = 15) %>%
  arrange(desc(ume_hab))
# Convertir a factor sin duplicados
top15$nombre <- factor(top15$nombre,
  levels = top15$nombre)
ggplot(top15,
  aes(x = reorder(nombre, ume_hab),
      y = ume_hab)) +
  geom_col(fill = "mediumorchid3") +
  coord_flip() +
  scale_y_continuous(labels = comma) +
  labs(title = "Localidades con mayor
  concentración poblacional",
  x = "Localidad",
  y = "Número de habitantes") +
  theme_minimal(base_size = 13)
## =====
# 12 Localidades con mayor de 20Mil habitantes
# =====
ggplot(datos %>% group_by(nombre) %>% summarise(ume_hab = sum(ume_hab, na.rm = TRUE)) %>% filter(ume_hab
> 20000),
  aes(x = reorder(nombre, ume_hab), y = ume_hab)) +
  geom_col(fill = "mediumorchid3") +
  coord_flip() +
  scale_y_continuous(labels = comma) +
  labs(title = "Localidades con más de
  20,000 habitantes",
  x = "Localidad",
  y = "Número de habitantes") +
  theme_minimal(base_size = 13)
## =====

```

```

# 13 Tabla de localidades
# =====
n_localidades <- 11
tabla_localidades <- datos %>%
  group_by(nombre) %>%
  summarise(habitantes = sum(ume_hab, na.rm = TRUE)) %>%
  arrange(desc(habitantes)) %>%
  slice_max(order_by = habitantes, n = n_localidades)
tabla_localidades
tabla_localidades <- datos %>%
  group_by(nombre) %>%
  summarise(habitantes = sum(ume_hab, na.rm = TRUE, n = 20)) %>%
  arrange(desc(habitantes))
tabla_localidades

```