



**Determinación de la vulnerabilidad de las unidades militares ante una eventual erupción
del Volcán Cotopaxi mediante herramientas geoespaciales**

Galarza Obando, Wilmer Amílcar

Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio
Ambiente

Doctor Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

25 de febrero del 2025

ESTUDIO PATRIA_20_02_25_UNIDO _SIN_GRÁFICOS

2%
Textos
sospechosos

2% Similitudes
 < 1% similitudes entre comillas
 < 1% entre las fuentes
 mencionadas
0% Idiomas no reconocidos
14% Textos potencialmente
 generados por la IA (Ignorado)

Nombre del documento: ESTUDIO PATRIA_20_02_25_UNIDO_SIN_GRAFICOS.pdf
 ID del documento: c1555d28cebf43f363e9727e134f6188b2f9ee8
 Tamaño del documento original: 762,06 kB
 Autores: []

Depositante: OSWALDO VINICIO PADILLA ALMEIDA
 Fecha de depósito: 25/2/2025
 Tipo de carga: Interface
 fecha de fin de análisis: 25/2/2025

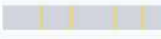
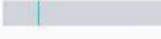
Número de palabras: 14.077
 Número de caracteres: 95.765

Ubicación de las similitudes en el documento:

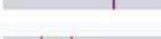


Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 Documento de otro usuario #415a26 El documento proviene de otro grupo 15 fuentes similares	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (72 palabras)
2	 repositorio.flacsoandes.edu.ec Una aproximación a la percepción social del riesgo... http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10465/17403/2/TFIACSD-2019CSV.pdf 15 fuentes similares	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (72 palabras)
3	 repositorio.espe.edu.ec Análisis de vulnerabilidad y estimación de costos socio-ec... http://repositorio.espe.edu.ec/8080/bitstream/21000/21223/5/IT-ESP-039923.pdf.txt 15 fuentes similares	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (51 palabras)
4	 Documento de otro usuario #e087c1 El documento proviene de otro grupo	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (38 palabras)
5	 capadelatierra.win Qué utilizan los geógrafos: Herramientas y técnicas esenciales https://capadelatierra.win/que-utilizan-los-geografos-herramientas-y-tecnicas-esenciales/	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (21 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 Documento de otro usuario #30760e El documento proviene de otro grupo	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (38 palabras)
2	 polired.upm.es http://polired.upm.es/index.php/territorio/informacion/articulo/viewfile/4793/4967	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (34 palabras)
3	 repositorio.puce.edu.ec Aplicación de la evaluación técnica visual de estructuras a... http://repositorio.puce.edu.ec/8080/bitstream/22000/11270/3/APLICACIÓN DE LA EVALUACIÓN...	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)
4	 repositorio.puce.edu.ec Diseño de un sistema de alerta temprana (SAT) para la pr... https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21527	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (22 palabras)
5	 pdf.usaid.gov https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA000001.pdf	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	 https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/360
2	 https://horizon.documentation.ird.fr
3	 https://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13095
4	 https://repositorio.puce.edu.ec
5	 https://www.ecademia.edu

Doctor Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

Director



Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Determinación de la vulnerabilidad de las unidades militares ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi mediante herramientas geoespaciales”** fue realizado por el señor **Galarza Obando, Wilmer Amílcar**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 27 de febrero de 2025

Doctor Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

Director

C.C.: 1709776650



Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Responsabilidad de Autoría

Yo **Galarza Obando, Wilmer Amílcar**, con cédula n° 1713593935, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Determinación de la vulnerabilidad de las unidades militares ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi mediante herramientas geoespaciales”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 27 de febrero de 2025

Galarza Obando, Wilmer Amílcar

C.C.: 1713593935



Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Autorización de Publicación

Yo **Galarza Obando, Wilmer Amílcar**, con cédula n°1713593935, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Determinación de la vulnerabilidad de las unidades militares ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi mediante herramientas geoespaciales”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 27 de febrero de 2025

Galarza Obando, Wilmer Amílcar

C.C.: 1713593935

Dedicatoria

A mis padres Carlos y Corina, a mi hermana Cinthya, que siempre fueron mi apoyo en el inicio de este proceso.

A mi esposa Maribel y mis hijos Amelia y Luciano, quienes son el motivo de seguir adelante y a quienes no puedo fallarles.

Agradecimiento

En el trajinar de la vida y de este proceso, existen personas que desde siempre han estado y otras que se han ido sumado, siendo importantes para mí por su amor, por sus consejos y apoyo incondicional.

Quiero agradecer a mis padres, que sembraron la semilla de un futuro mejor con esfuerzo y dedicación, a mi hermana, que me dio una razón más para surgir y no desmayar.

A mi esposa e hijos, que en días difíciles siempre han sido mi puerto seguro, donde recargo energías para dar lo mejor y continuar adelante por el amor verdadero que me brindan, sin pedir nada a cambio, sin ellos estos desafíos y metas cumplidas hubieran sido más difíciles de alcanzar.

Por último y no menos importante a la Dirección Geográfica del Instituto Geográfico Militar, a sus funcionarios y amigos que fui forjando. *¡GEO UN DÍA, GEO TODA LA VIDA!*

Índice de contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen	12
Abstract.....	13
Capítulo I Introducción.....	14
Resumen del Capítulo.....	14
Contexto y justificación.....	14
Planteamiento del problema.....	18
Antecedentes	20
Marco Legal de la Gestión de Riesgos en el país	21
Área de Estudio.....	23
Características de las Unidades Militares.....	26
Objetivos.....	29
Objetivo general	29
Objetivos específicos.....	29
Alcance y limitaciones	30
Hipótesis de investigación	31
Capítulo II Marco Teórico	32
Resumen del capítulo.....	32
Ciclo de la gestión de riesgos.....	32
Fases del Ciclo de la Gestión de Riesgos	33
Clasificación de los fenómenos naturales.....	34
Fenómenos meteorológicos	34
Fenómenos Geodinámicos.....	35
Vulnerabilidad ante desastres naturales	35
Erupciones volcánicas: causas y efectos.....	36
Análisis de vulnerabilidad en zonas militares.....	38
Erupciones Volcánicas en el Ecuador.....	39
Caracterización del Volcán Cotopaxi.....	39
Historia eruptiva	40
Peligros Volcánicos asociados al Volcán Cotopaxi.....	42
Factores de Vulnerabilidad en el Área del Volcán Cotopaxi	44

Herramientas geoespaciales de análisis de riesgos	44
Sistemas de Información Geográfica (SIG)	45
Fotografía Aérea	46
Cartografía Básica	46
Análisis Estadístico	46
Levantamiento de Datos en Campo.....	47
Integración de Métodos y Herramientas	47
Línea del Tiempo de Sistemas y Software destinados a la Gestión de Riesgos.....	47
Revisión de estudios previos	49
Capítulo III Metodología.....	52
Resumen del capítulo.....	52
Enfoque del proyecto.....	52
Metodología.....	52
Recopilación de información.....	53
Identificación de unidades militares afectadas por posibles flujos de lodo (lahares) del Volcán Cotopaxi.	55
Cálculo de áreas afectadas	57
Determinación de rutas óptimas de evacuación.....	60
Capítulo IV Resultados y Análisis.	65
Resumen del capítulo.....	65
Análisis de resultados.....	65
Análisis de unidades militares afectadas por peligros volcánicos del volcán Cotopaxi.....	65
Identificación de zonas vulnerables en las unidades seleccionadas	66
Determinación de la ruta óptima de evacuación en las unidades seleccionadas	73
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones.....	82
Conclusiones principales	82
Recomendaciones para las unidades militares	84
Referencias Bibliográficas	86

Índice de Tablas

Tabla 1	Descripción de la Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria"	27
Tabla 2	Descripción de la Academia de Guerra del Ejército	28
Tabla 3	Descripción Fuerte Militar "San Jorge"	299
Tabla 4	Fuentes de información	54
Tabla 5	Cálculo aproximado de valor de reposición de las construcciones de las Unidades Militares	732

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de Ubicación del área de estudio	24
Figura 2 Ubicación de unidades militares en zona de peligros de lahares del Volcán Cotopaxi	25
Figura 3 Ciclo de las Gestión de Riesgos	34
Figura 4 Resumen de Historia eruptiva del Volcán Cotopaxi	42
Figura 5 Metodología general del proyecto	53
Figura 6 Esquema del cálculo del porcentaje de afectación por unidad militar (superficie y construcciones)	59
Figura 7 Esquema del cálculo de la ruta óptima en función de las áreas de servicio (isocronas)	61
Figura 8 Flujograma de la generación de áreas de servicio (isocronas)	64
Figura 9 Susceptibilidad a lahares de la “Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria” ante una posible erupción del volcán Cotopaxi	67
Figura 10 Susceptibilidad a lahares de la “Academia de Guerra” ante una posible erupción del volcán Cotopaxi.....	68
Figura 11 Susceptibilidad a lahares del Fuerte Militar San Jorge ante una posible erupción del volcán Cotopaxi	69
Figura 12 Unidades Militares según porcentaje de superficie afectada y sin afectación.....	70
Figura 13 Unidad Militar según porcentaje del número de construcciones afectadas y sin afectación	71
Figura 14 Unidad Militar según porcentaje del área construida afectada y sin afectación.....	72
Figura 15 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “BFE N°9 Patria” medio de evacuación: vehículo – velocidad: 60km/h	75
Figura 16 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “BFE N°9 Patria” medio de evacuación: peatonal – velocidad: 60km/h	76
Figura 17 Isocronas y ruta de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “Academia de Guerra” medio de evacuación: vehículo – velocidad: 30km/h	78
Figura 18 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “Academia de Guerra” medio de evacuación: peatonal – velocidad: 5km/h	79
Figura 19 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “Academia de Guerra” medio de evacuación: vehículo – velocidad: 30km/h	80
Figura 20 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “Fuerte militar San Jorge” medio de evacuación: peatonal – velocidad: 5km/h	81

Resumen

El objetivo final del presente proyecto es determinar el grado de vulnerabilidad de las unidades militares frente a la posible presencia de lahares, según la cobertura temática delimitada por el Instituto Geofísico, como producto de una potencial erupción del Volcán Cotopaxi ubicado en el cantón Latacunga. Esta vulnerabilidad se determina mediante el uso de herramientas geoespaciales como son los sistemas de información geográfica (SIG), de esta manera se busca identificar y cuantificar áreas de riesgo para las unidades militares y proponer rutas de evacuación con la finalidad de minimizar los impactos frente a este fenómeno natural.

El proyecto se centró en tres unidades militares estratégicas: la Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria", el Fuerte Militar "San Jorge" y la Academia de Guerra, en razón de que cada una de ellas se puede ver afectada por la presencia de flujos de lodo. Mediante el análisis geoespacial se determinó el porcentaje de superficie afectada por flujos de lodo (lahares) en cada unidad militar, y se obtuvo como resultado que la Academia de Guerra tendría el 100% de su área (4,89 ha) afectada, seguido de la Brigada de Fuerzas Especiales N°9 "Patria" con un 82,1% de su área (196,3 ha de 239 ha) y finalmente el Fuerte Militar "San Jorge" con 32,8% (15 ha de 45,74 ha). De igual manera, se evaluó el posible impacto sobre las infraestructuras militares, incluyendo edificios administrativos, residencias, bodegas y otros, calculando la posible área afectada y su impacto económico, para ello se utilizó la técnica de reposición total de las edificaciones, con un costo estimado, resultando en una pérdida potencial de USD 26.616.572 para las tres unidades militares.

Este trabajo proporciona información clave para la gestión estratégica del riesgo, permitiendo que las Fuerzas Armadas y otras entidades gubernamentales tomen decisiones informadas sobre la infraestructura militar en zonas de riesgo volcánico por lahares, con el fin de garantizar la operatividad y seguridad del personal militar ante una posible erupción del Volcán Cotopaxi.

Palabras clave: vulnerabilidad, volcán Cotopaxi, Unidades Militares

Abstract

The final objective of this project is to determine the degree of vulnerability of military units to the possible presence of lahars, according to the thematic coverage delimited by the Geophysical Institute, because of a potential eruption of the Cotopaxi Volcano located in the Latacunga canton. This vulnerability is determined with geospatial tools such as geographic information systems (GIS), in this way it seeks to identify and quantify risk areas for military units and propose evacuation routes in order to minimize the impacts of this natural phenomenon.

The project focused on three strategic military units: the Special Forces Brigade No. 9 "Patria", the Military Fort "San Jorge" and the War Academy, because each of them can be affected by the presence of mudflows. The percentage of surface area affected was calculated by geospatial analysis, mudflows (lahars) in each military unit. The result was that the War Academy would have 100% of its area (4.89 ha) affected, followed by the Special Forces Brigade No. 9 "Patria" with 82.1% of its area (196.3 ha of 239 ha) and finally the Military Fort "San Jorge" with 32.8% (15 ha of 45.74 ha). Likewise, the possible impact on military infrastructure was evaluated, including administrative buildings, residences, warehouses and others, calculating the possible affected area and its economic impact, for which the technique of total replacement of the buildings was used, with an estimated cost, resulting in a potential loss of USD 26,616,572 for the three military units.

This work provides key information for strategic risk management, allowing the Armed Forces and other government entities to make informed decisions about military infrastructure in areas at risk of volcanic lahars, in order to ensure the operability and safety of military personnel in the event of a possible eruption of the Cotopaxi Volcano.

Keywords: vulnerability, Cotopaxi volcano, Military Units

Capítulo I Introducción

Resumen del Capítulo

En este apartado se hace referencia a los criterios que enmarcan los estudios de vulnerabilidad frente a los peligros naturales, así como se describe la justificación para la realización de este proyecto, mediante la definición del problema, una revisión de antecedentes, así como la presentación de conceptos que hacen referencia al marco legal que rige la gestión de riesgos en el país. Así también se registra nociones de vulnerabilidad, acompañados de una definición de peligros volcánicos que permiten entender de mejor manera que el Ecuador enfrenta un panorama complejo en términos de gestión de riesgos, debido a su alta vulnerabilidad a los desastres volcánicos de manera especial.

En una segunda parte se presenta el área de estudio y se hace referencia a las características más importantes de las unidades militares a ser analizadas. En la parte final se hace referencia a los objetivos que guían este proyecto, indicando de igual forma el alcance y limitaciones las cuales están ligadas a la hipótesis de investigación planteada.

Contexto y justificación

El análisis de vulnerabilidad ante desastres naturales es considerado como un pilar indispensable de la gestión de riesgos, particularmente en regiones expuestas a fenómenos volátiles como las erupciones volcánicas como es el caso del país. En este marco, el proyecto se centra en la evaluación de la vulnerabilidad de las instalaciones militares, localizadas en las áreas de recorrido de lahares del Volcán Cotopaxi, con especial atención en tres unidades: Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria", Fuerte Militar "San Jorge" y Academia de Guerra, situadas en el área de afectación directa de los flujos de lahar provenientes de una posible erupción del Volcán Cotopaxi, uno de los gigantes geológicos más activos y peligrosos del Ecuador.

El Volcán Cotopaxi ha registrado históricamente eventos eruptivos marcadas por flujos

piroclásticos que queman todo a su paso, nubes de ceniza que sofocan la atmósfera y torrentes de lahares que arrasan la infraestructura en una masa de lodo y escombros. Tales escenarios plantean una amenaza a las infraestructuras que se localizan en las áreas de recorrido de lahares, entre las cuales se encuentran instalaciones militares de diferente clase, las mismas que pueden ser afectadas de manera directa, causando problemas en sus operaciones logísticas y, lo más crítico, afectando la seguridad de su personal. Enfrentar este peligro exige previsión, precisión y gestionar herramientas que permitan construir de manera eficaz planes de evacuación y contingencia.

En respuesta a este desafío, la presente investigación utiliza los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como una herramienta efectiva que permite a los investigadores cruzar información temática especializada y de esta forma analizar la interacción entre las amenazas volcánicas y los espacios expuestos y así crear mapas temáticos que pueden aportar a la toma de decisiones estratégicas. A través del análisis geoespacial, el proyecto identifica la infraestructura militar ubicada en zonas de alto riesgo, y se evalúa de manera particular las afectaciones a la infraestructura y personal que se localizan en las unidades militares antes mencionadas

Esta investigación pretende reforzar la gestión de desastres naturales en instalaciones militares, análisis que puede ser replicable para salvaguardar a otras unidades vulnerables localizadas en zonas de alto riesgo afectadas por otros peligros naturales, fomentando una cultura de preparación, asegurando tanto la resiliencia institucional como la preservación de vidas humanas frente a posibles afectaciones de la naturaleza.

Los peligros naturales (terremotos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos) presentan fuertes amenazas a las comunidades y la infraestructura en todo el mundo, el Ecuador al estar ubicado en la zona de fuego del Pacífico está expuesto a un sin número de eventos naturales que han afectado de manera significativa a la población, infraestructura y economía del país (Wordl Bank Group, 2024).

A lo largo del tiempo, se ha observado que estos peligros naturales están en la capacidad de causar efectos devastadores en la población, el ambiente y la economía de un país, sin embargo, se puede mitigar su impacto mediante la elaboración de estudios previos que determinen el grado de vulnerabilidad, para ello el uso de herramientas geoespaciales es indispensable puesto que permite identificar las áreas críticas, evaluar riesgos potenciales y delinear estrategias preventivas. La elaboración de estudios preventivos, ayuda a diagnosticar la correlación entre los peligros naturales y los elementos expuestos; con estos elementos las autoridades y los organismos encargados tendrán elementos claros y territoriales que le ayude en la toma de decisiones oportunas (UNDRR, 2019).

Al realizar tareas de prevención, que tiene su base en el análisis espacial de la vulnerabilidad, el altamente efectivo en comparación con una respuesta reactiva a los desastres, es decir sin planificación previa, (Alexander, 1993) subraya esto al destacar que cada dólar invertido en mitigación puede ahorrar hasta siete dólares en recuperación y reconstrucción, de igual manera la UNDRR actualmente señala que no invertir en prevención es financiar el desastre. La planificación anticipada no solo reduce las pérdidas económicas, sino que salva vidas, el beneficio para quienes apuntan a esta estrategia no tiene valor y es la mejor manera de enfrentar la gestión de riesgo a desastres.

En párrafos anteriores se subrayó la importancia de los estudios de vulnerabilidad a través del uso de geotecnologías avanzadas optimizando el tiempo que se utiliza para el análisis territorial, estas tecnologías se denominan sistemas de información geográfica (SIG). Los SIG permiten ejecutar tareas automáticas mediante la combinación de coberturas, lo que facilita la identificación de zonas vulnerables y representa gráficamente los posibles impactos. En este contexto, los SIG crean el escenario para comprender cómo los peligros que provienen de las erupciones volcánicas como flujos piroclásticos, flujos de lodo o dispersiones de cenizas pueden generar efectos devastadores en extensas regiones y en muy poco tiempo (Hagenlocher, M., et al., 2013).

Si bien no es posible anticipar todos los efectos que pueden ocurrir en el caso de un evento natural, anticiparse al escenario más complejo contribuye a proteger a la población y refuerza la resiliencia institucional al generar una cultura de prevención que es muy poco apreciada en el país. En la misma línea, los responsables de las políticas podrían priorizar las inversiones al diseñar infraestructuras más seguras, y mantener rutas que sirvan para la evacuación de la población, detallada dentro de los planes de emergencia. (Goodchild, 2006).

De esta manera, los estudios de vulnerabilidad fusionan el análisis territorial, basado en el marco teórico con la tecnología automatizada del SIG, lo que permite elaborar una estrategia territorial bien sustentada.

Los (SIG) han demostrado ser indispensables en la gestión de desastres, ofreciendo soluciones técnicas para modelar escenarios de riesgo, identificar áreas vulnerables y priorizar medidas de mitigación (Goodchild, 2006). Estos sistemas integran datos geoespaciales, que van desde mapas topográficos y modelos de elevación hasta simulaciones de dispersión de cenizas y trayectorias de lahares, y producen representaciones visuales que son cruciales para la toma de decisiones informada (Hagenlocher et al., 2013). Para este proyecto el uso de los SIG servirá para analizar los impactos directos sobre la infraestructura militar, cuantificando áreas de superficie y construcciones y determinando los sitios seguros y las rutas de evacuación.

En este sentido, la unión entre ciencia y las tecnologías procuran salvaguardar vidas, minimizar daños en infraestructuras y fomentar comunidades más resilientes capaces de soportar los nuevos desafíos de la naturaleza y el ser humano.

En función de lo antes mencionado, la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura militar en zonas de riesgo volcánico es una tarea fundamental para la planificación estratégica y la protección de los recursos humanos y materiales. El Volcán Cotopaxi, conocido por ser uno de los volcanes más activos y peligrosos de Ecuador, presenta una gran amenaza; ya que es capaz de provocar peligros volcánicos como flujos piroclásticos y flujos de lodo entre otros, según Hall, M. L., Mothes, 2008, su potencial actividad pondría en

peligro muchas zonas altamente pobladas y consecuentemente las instalaciones militares situadas dentro de su zona de afectación. De manera particular la proximidad a las unidades militares: la Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria", Fuerte Militar "San Jorge" y Academia de Guerra sostiene la urgencia de emplear herramientas avanzadas para evaluar y mitigar los posibles riesgos de manera efectiva, por ello el presente proyecto permitirá evaluar el grado de vulnerabilidad de las instalaciones militares localizadas en las áreas de recorrido de lahares del volcán.

Las bases militares son infraestructuras esenciales en función del potencial que tienen al ser instalaciones que contienen edificaciones que brindan un servicio muy especializado como los polvorines u otro tipo de servicios capacidad logística que pueden brindar. Una gestión eficaz de los riesgos no solo garantiza la continuidad operativa, sino que también permite a las fuerzas armadas proporcionar un apoyo esencial a las poblaciones civiles durante las emergencias (Klepak, 2018). La investigación que aprovecha los SIG, como se propone en este proyecto, aporta un enfoque multidimensional, que combina el análisis espacial con las estrategias de resiliencia. Este enfoque dual fortalece la seguridad nacional al tiempo que reduce el potencial de pérdidas humanas y materiales (Alexander, 1993).

En última instancia, este proyecto va más allá de su contexto inmediato, porque si bien aborda una problemática local urgente, se establece una metodología replicable en otras infraestructuras esenciales como unidades de salud y educativas, este modelo sirve para evaluar su vulnerabilidad ante cualquier posible peligro volcánico en el Ecuador y a nivel mundial.

Planteamiento del problema

El Volcán Cotopaxi, ubicado en la región central de Ecuador es uno de los volcanes nevados más impactantes del mundo, pero también una de las formaciones geológicas más peligrosas del país. Su historial eruptivo está marcado por una serie de eventos cuyas

evidencias se localizan en las cercanías de sus afluentes a varios kilómetros de su origen, entre estos caben destacar los flujos piroclásticos, flujos de lodo (lahares) y ceniza volcánica, todos estos productos identificables por sus características físico-químicas (Hall y Mothes, 2008). Estos peligros extienden su impacto mucho más allá de las comunidades locales cercanas al volcán, planteando amenazas significativas para la infraestructura esencial como vías, infraestructura energética, fuentes de agua, a las cuales se deben incluir a las instalaciones militares, ubicadas dentro de la zona de impacto potencial directo del volcán.

La vulnerabilidad de estas instalaciones militares es una preocupación en los altos mandos. Su importancia estratégica para la seguridad nacional, junto con su papel esencial en la prestación de apoyo de emergencia a las poblaciones civiles, amplifica los riesgos. A pesar de esto, no existen los suficientes estudios que examinen las formas específicas en que una erupción del Cotopaxi podría afectar la infraestructura militar y la preparación operativa de las mismas. Esta brecha en el conocimiento dificulta el desarrollo de estrategias preventivas y medidas de mitigación vitales para garantizar la seguridad del personal y la continuidad de las operaciones ante una eventual erupción volcánica (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

Las tecnologías avanzadas, en particular los (SIG), ofrecen herramientas poderosas para abordar esta cuestión crítica. Los SIG permiten la simulación de escenarios de riesgo, el análisis detallado de las interacciones entre los peligros volcánicos y los espacios expuestos, y la creación de mapas temáticos que ilustran de manera detallada los impactos potenciales (Goodchild, 2006). Estas capacidades son indispensables para identificar áreas de alto riesgo, diseñar rutas de evacuación eficientes y establecer zonas seguras, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones estratégicas (Hagenlocher et al., 2013).

La ausencia de estudios integrados que fusionen el análisis de vulnerabilidad con las tecnologías geoespaciales en contextos militares deja un vacío de información ante la preparación de un evento natural. Esta incertidumbre plantea preguntas críticas sobre la resiliencia y las capacidades de respuesta del personal y la infraestructura cuando se enfrentan

ante un posible desastre. Por lo tanto, se vuelve imperativo desarrollar una investigación integral que evalúe estos riesgos de manera holística. Esas investigaciones deben apuntar no sólo a salvaguardar los recursos militares, sino también a garantizar su preparación para ayudar a las poblaciones civiles durante las emergencias (Calvo Rey, 2022).

Al salvar esa brecha de conocimiento técnico especializado, el proyecto propuesto contribuirá a una comprensión más profunda de la dinámica de la vulnerabilidad, mejorando tanto la resiliencia institucional y entregando insumos valiosos a las autoridades competentes.

Antecedentes

Antes de determinar la vulnerabilidad de las unidades militares ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi mediante el uso de las herramientas geoespaciales, es esencial comprender las características y el comportamiento de este imponente estratovolcán. El Volcán Cotopaxi está ubicado a aproximadamente 50 km al sureste de Quito y 35 km al norte de Latacunga, tiene una altitud de 5.897 metros sobre el nivel del mar y se calcula que posee una cobertura glaciaria de aproximadamente 500 millones de m³. Su base abarca entre 16 y 19 kilómetros, con un relieve homogéneo que determina su forma cónica casi perfecta. A lo largo de su historia, el volcán ha generado erupciones explosivas de tipo andesítico, caracterizadas por flujos piroclásticos, caída de ceniza y lahares (Hall, M. L., Mothes, 2008).

Las principales erupciones registradas ocurrieron en los años 1742, 1743, 1744, 1766, 1768, 1803, 1853, 1844 y 2015 cada una acompañada de efectos como ceniza, escoria, flujos piroclásticos y lahares que afectaron gravemente a las comunidades cercanas, resultando en pérdida de vidas humanas, destrucción de infraestructura y crisis económicas. En su erupción más reciente, en 2015, el Cotopaxi emitió un millón de m³ de ceniza, además de generar lahares secundarios (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, n.d.).

Dentro de las áreas de recorrido de lahares se encuentran un sin número de infraestructura de importancia, destacándose varias unidades militares estratégicas, entre ellas

la Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria", Fuerte Militar "San Jorge" y Academia de Guerra. Estas instalaciones militares albergan personal técnico, administrativo y operativo, así como recursos logísticos y tácticos, esenciales para el desarrollo de sus actividades, ligadas a su misión institucional. La ubicación de estas unidades en una zona de alto riesgo ante peligros por lahares evidencia la necesidad de implementar estrategias específicas para garantizar la seguridad del personal y su continuidad operativa.

Existen reglamentaciones y normativas relevantes, como la Ley Orgánica de Seguridad Nacional, la Ley de Gestión de Riesgos y Emergencias, y las Normas Técnicas para la Evaluación de Riesgos Naturales, que establecen directrices para la gestión del riesgo (Asamblea Nacional del Ecuador, 2024). Sin embargo, los estudios previos realizados, como las evaluaciones de riesgo volcánico del Instituto Geofísico y los análisis de vulnerabilidad de infraestructura crítica, han priorizado a la población civil, dejando de lado el impacto específico en las unidades militares. Este vacío representa un desafío crítico, dado que las bases militares en la región no solo enfrentan riesgos materiales, sino también la posible afectación de sus recursos técnicos, bélicos y logísticos, indispensables para su función operativa.

El presente proyecto busca definir la vulnerabilidad en tres unidades militares de manera específica: Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria", Fuerte Militar "San Jorge" y Academia de Guerra, localizadas en el recorrido de los lahares del Volcán Cotopaxi en su zona norte y sur.

Marco Legal de la Gestión de Riesgos en el país

Ecuador ha desarrollado un marco legal para la gestión de riesgos, liderado por el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE), cuya normativa legal vigente es la Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres aprobada en el año 2024, este marco regulatorio tiene como su objeto registrado en el artículo 1:

....normar los procesos para la planificación, organización y articulación de políticas y servicios para el conocimiento, previsión, prevención, mitigación; la

respuesta y la recuperación ante emergencias, desastres, catástrofes ,endemias (sic) y pandemias; y, regular el funcionamiento del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Integral del Riesgo de Desastres garantizando la seguridad y protección de las personas, las colectividades y la naturaleza, frente a las amenazas de origen natural y antrópico, con el objetivo de reducir el riesgo de desastres... (Asamblea Nacional del Ecuador, 2024).

La SNGRE coordina acciones de monitoreo, prevención y respuesta en colaboración con varias instituciones del Estado involucradas en la gestión del riesgo, así como instituciones técnicas como es el caso del IG-EPN, esta cooperación ha permitido la creación del Plan de Contingencia para el Volcán Cotopaxi que establece líneas de acción para la mitigación de posibles impactos a causa de una posible erupción.

La gestión de riesgos en los planes de desarrollo y ordenamiento territorial (PDOT) de los municipios es un elemento clave que la Ley define como obligatorio. En este sentido, cada municipio debe identificar las zonas de alto riesgo por peligros volcánicos y de otros génesis que se localicen dentro de su jurisdicción, con la finalidad de desarrollar e implementar estrategias específicas que permitan disminuir la vulnerabilidad de sus comunidades. Estas estrategias incluyen:

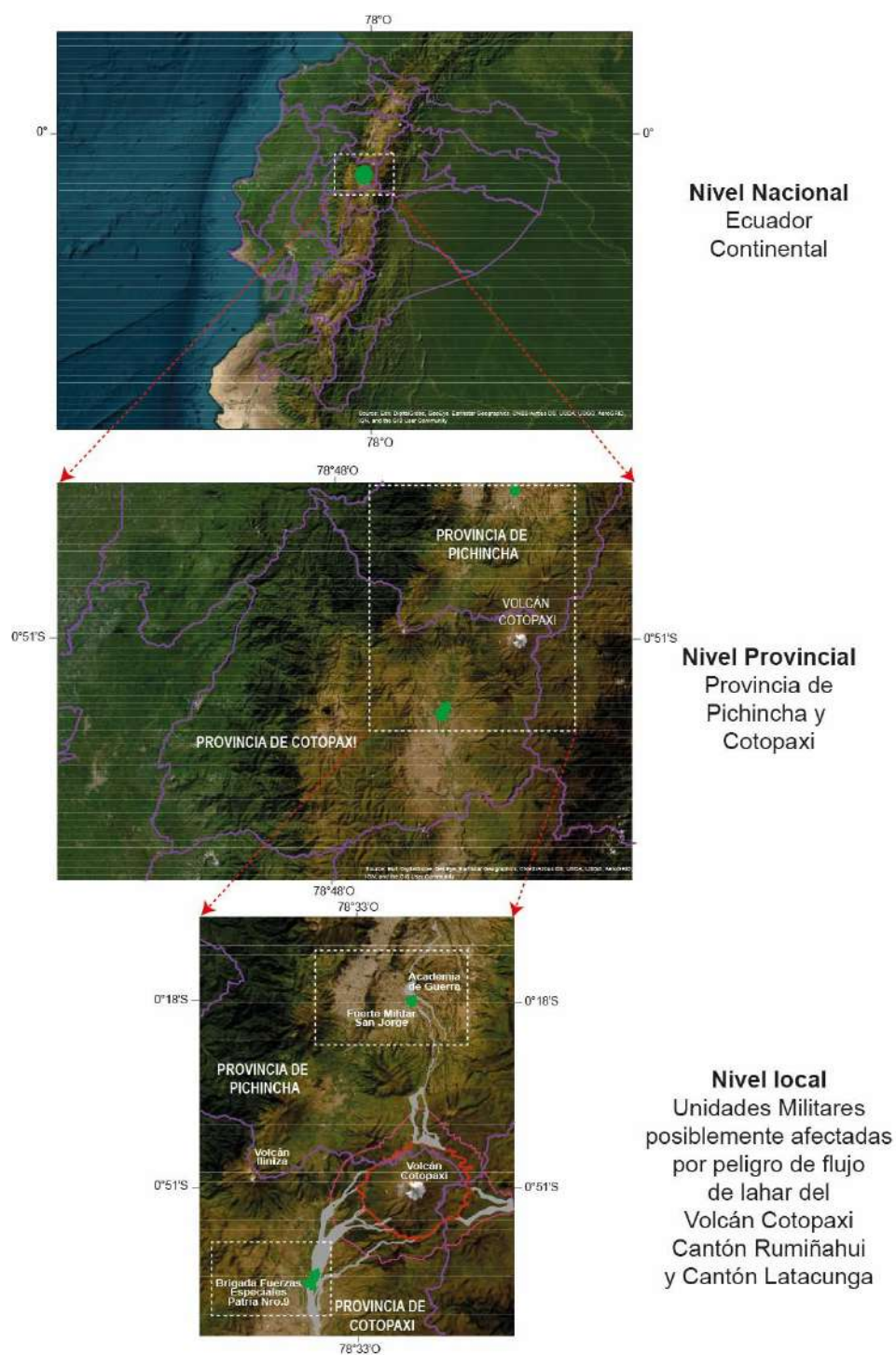
- **Zonificación del Territorio:** en esta etapa se identifican y delimitan las zonas de riesgo, con restricciones plasmadas en el uso del suelo.
- **Planes de Emergencia Locales:** se diseñan los planes de evacuación específicos para cada zona.
- **Capacitación Comunitaria:** se realizan programas educativos para tomar conciencia de rutas de evacuación y posibles efectos.
- **Monitoreo y Alerta Temprana:** se fortalecen los sistemas de monitoreo volcánico y se establecen los protocolos de comunicación.

- **Resiliencia de Infraestructuras:** finalmente, se diseñan y construyen infraestructuras resistentes a los peligros volcánicos (en caso de que se pueda aplicar).

Por lo anterior descrito, se puede afirmar que los desafíos en la gestión de riesgos para los gobiernos locales son continuos, por lo que se enfatiza la importancia de integrar a las comunidades en los procesos de prevención (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2019 C.E.).

Área de Estudio

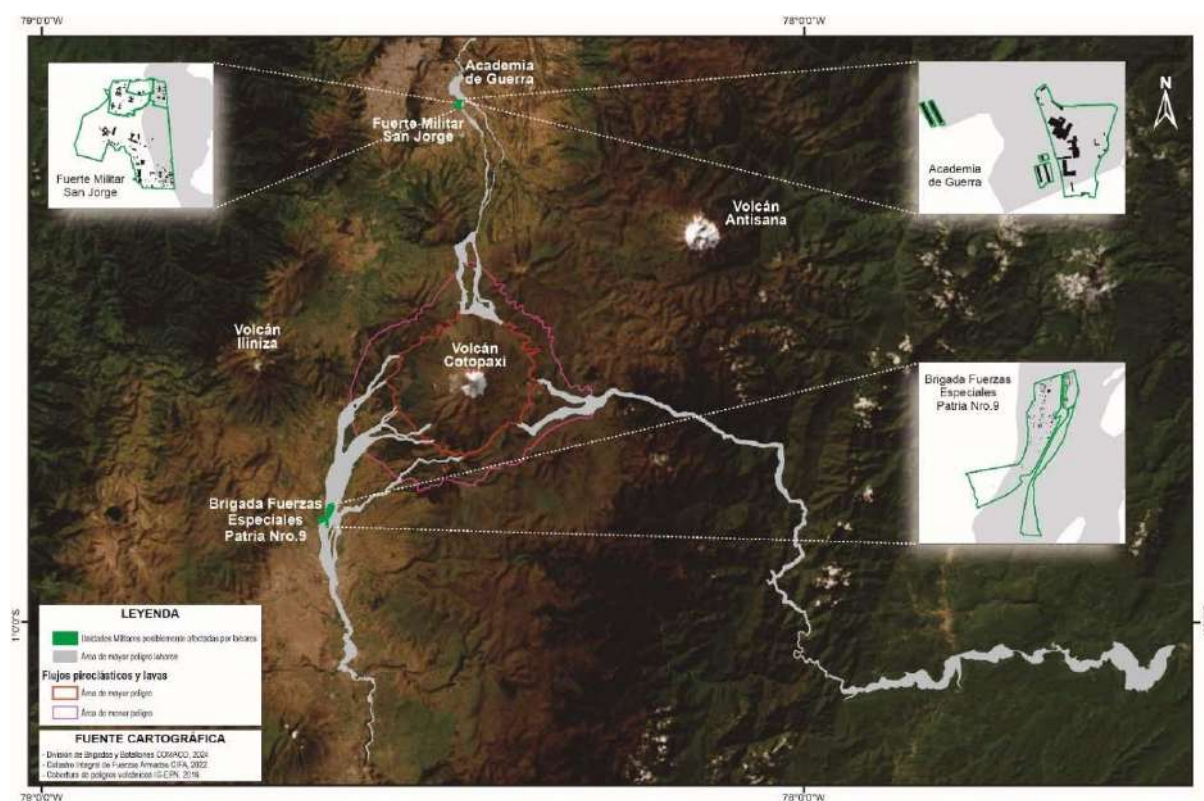
El área de estudio hace referencia a la zona afectada de manera directa por los lahares producto de una eventual erupción del Volcán Cotopaxi, la misma que se circunscribe a las provincias de Pichincha (zona norte) y la provincia de Cotopaxi (zona sur), de manera más directa el cantón Rumiñahui donde se localizan el Fuerte Militar "San Jorge" y la Academia de Guerra, y por otro lado el cantón Latacunga donde se ubica la Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria".

Figura 1*Mapa de Ubicación del área de estudio*

Como se puede apreciar en la figura 2, las unidades mencionadas se localizan en zonas consideradas de alto peligro debido a la potencial afectación por flujos de lahares. Los lahares, compuestos por una mezcla de agua, cenizas y escombros volcánicos recorren por cursos naturales a gran velocidad por lo que representan un riesgo significativo tanto para las infraestructuras como para el personal militar y todo tipo de equipos estratégicos ubicados en su interior. Las unidades militares se destacan por su importancia estratégica en el ámbito táctico-militar y son pilares fundamentales para la seguridad y defensa nacional, ya que desempeñan un papel crítico en operaciones de fuerzas especiales, tácticas de respuesta rápida y apoyo a emergencias.

Figura 2

Ubicación de unidades militares en zona de peligros de lahares del Volcán Cotopaxi



Características de las Unidades Militares

Las unidades militares, determinadas mediante análisis espacial, específicamente cruce de coberturas entre peligro de flujos de lodo (lahares) y límite de la unidad, tienen las siguientes características:

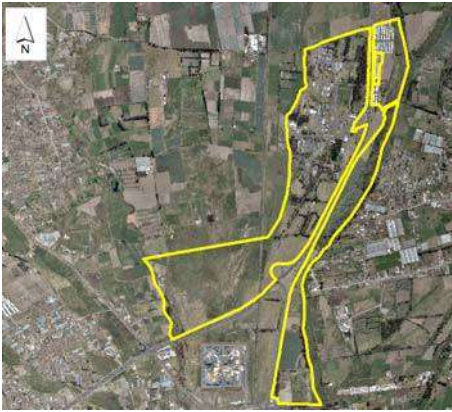
La Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria" es una unidad élite del Ejército Ecuatoriano, ubicada en la cabecera norte de la ciudad de Latacunga. La brigada se especializa en operaciones militares complejas y de gran exigencia física y mental, lo que incluye el paracaidismo y andinismo, es conocida por ser pionera en la formación de este tipo de actividad militar en el país, inclusive en su entrada se localiza un monumento que da cuenta de aquello.

La brigada, como toda unidad militar, se rige a la disciplina militar por lo que participa activamente en ceremonias cívico-militares, entre las más destacadas se encuentra la conmemoración del Día de la Bandera Nacional, la graduación del IV Curso de Combate Especial del Ecuador y cambios de mando en presencia de altos mandos del Ejército Ecuatoriano. Otras actividades que realiza la brigada se refieren a la interacción con la comunidad, realizando reforestación, mingas entre otras.

Actualmente, la Unidad Militar cuenta con 333 bloques que corresponden a áreas administrativas, viviendas, bodegas, baños, comedor, cuartos de máquinas, lavandería, oficinas entre otra infraestructura.

A través de estas actividades y su compromiso con la excelencia, la Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria" desempeña un papel crucial en la defensa nacional y en el fortalecimiento de los lazos entre las Fuerzas Armadas y la comunidad ecuatoriana.

Tabla 1*Descripción de la Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 "Patria"*

	Superficie	Número de
	has	construcciones
	239	267

La Academia de Guerra del Ejército (AGE) es la institución en la cual se forman todos los oficiales de alto nivel que llegan a liderar las operaciones militares en todo el territorio ecuatoriano. Su principal misión es capacitar a los futuros líderes militares en estrategias de defensa, gestión de conflictos y toma de decisiones en escenarios complejos.

Estas habilidades adquiridas aseguran que las Fuerzas Armadas estén preparadas para enfrentar desafíos tanto internos como externos, para ingresar en este selecto grupo de oficiales se debe cumplir varios requisitos previos y luego aprobar una serie de estudios específicos con personal experto en las temáticas. Es por ello que la Academia de Guerra es un pilar fundamental en la seguridad nacional, puesto que garantiza al país contar con una fuerza militar profesional y altamente capacitada que contribuya directamente con la seguridad y defensa nacional, misión básica de las Fuerzas Armadas.

Tabla 2*Descripción de la Academia de Guerra del Ejército*

	Superficie	Número de
	has	construcciones
	4,9	62

El Fuerte Militar “San Jorge”, está ubicado en Sangolquí, provincia de Pichincha, muy cerca de la Academia de Guerra del Ejército (AGE). Su misión principal es ser el centro de instrucción y capacitación para los oficiales y voluntarios del Ejército Ecuatoriano en temas especializados como paracaidismo, rescate entre otros, proporcionándoles las herramientas necesarias para tomar decisiones estratégicas en diversos escenarios operacionales.

En el Fuerte militar se desarrollan ceremonias Militares que conmemoran fechas y eventos significativos para las Fuerzas Armadas, también se realizan paneles académicos con espacios de discusión y análisis sobre temas relevantes en el ámbito nacional con repercusiones para la estrategia militar, también se realizan competencias que ponen a prueba las destrezas militares adquiridas en su formación, en esta unidad militar se destaca que es importante mantener un constante entrenamiento mental y físico para atender las necesidades del país.

Tabla 3*Descripción Fuerte Militar "San Jorge"*

	Superficie	Número de
	has	construcciones
	45,7	143

Objetivos

Los objetivos planteados en la presente investigación pretenden proporcionar a las instancias militares herramientas geoespaciales que permitan elaborar planes de emergencia y evacuación efectivos. Estas estrategias incluirán la salvaguarda de personal, recursos bélicos y logísticos, así como la protección de infraestructura crítica. De este modo, se fortalecerá la capacidad de respuesta y la resiliencia ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi.

Objetivo general

- El objetivo general de la investigación es evaluar el grado de vulnerabilidad de las unidades militares frente a una posible erupción del Volcán Cotopaxi, mediante un análisis territorial detallado, utilizando herramientas geoespaciales para identificar áreas de riesgo y proponer medidas preventivas.

Objetivos específicos

- Recopilar y sistematizar información de estudios previos realizados en el área del proyecto que se relacionen con una eventual erupción del volcán Cotopaxi.
- Establecer el grado de vulnerabilidad de las unidades militares ubicadas en la zona de influencia del Volcán Cotopaxi: Brigada de Fuerzas Especiales N° 9

"Patria", Fuerte Militar "San Jorge" y Academia de Guerra, para determinar su capacidad de respuesta ante una eventual erupción, utilizando datos geoespaciales para analizar la accesibilidad y la proximidad a las zonas de peligro.

- Proponer un conjunto de medidas preventivas basadas en los resultados del análisis territorial, con el fin de reducir la vulnerabilidad de las unidades militares analizadas y ante la presencia de flujos de lodo (lahar) en una erupción volcánica.

Alcance y limitaciones

Esta investigación propone identificar la vulnerabilidad de las instalaciones militares que se ubican en el recorrido de lahares producto de la actividad volcánica del Cotopaxi, la atención central recae en los lahares, esos flujos torrenciales de barro y escombros capaces de arrasar todo a su paso. A través de un enfoque multidimensional, se emplearán datos oficiales de entidades del Estado ecuatoriano, con el objetivo de mapear, en detalle, los impactos sobre las infraestructuras militares. La investigación, lejos de limitarse a un análisis visual, busca también explorar la capacidad de respuesta operativa de las instalaciones militares ante una emergencia de tal magnitud. A la vez pretende dar respuesta a algunas interrogantes que se describen a continuación, ¿Qué medidas preventivas podrían salvar vidas? ¿Cómo adaptar las estrategias de mitigación a la topografía única y al potencial riesgo del lugar?

La principal limitación que se tiene que indicar, radica en la escala espacial y temporal de la información utilizada, es verdad que son datos oficiales, pero no se ajustan a la precisión necesaria para identificar, con exactitud, las zonas específicas que podrían sucumbir al impacto de los lahares (zonas afectadas potenciales). Esta información, aunque útil, ofrecen una resolución que limita la capacidad de predicción detallada en áreas tan sensibles como las instalaciones militares. Más aún, la propia naturaleza impredecible de los eventos volcánicos añade una capa de incertidumbre difícil de desentrañar. La magnitud y dirección de los lahares

son variables, cambiantes, y esto incrementa la complejidad de los posibles escenarios a evaluar. De este modo, este estudio no se presentará como una predicción exacta, sino como una estimación respaldada por supuestos registrados en mapas que presentan escenarios de riesgo que buscan, en última instancia, ofrecer una guía útil para la mitigación, reconociendo las inevitables limitaciones inherentes a la modelización de estos fenómenos extremos a diferente escala y bajo condiciones que son impredecibles.

Hipótesis de investigación

¿En qué medida las unidades militares ubicadas en la zona de influencia del Volcán Cotopaxi, específicamente la Brigada de Fuerzas Especiales Nº 9 "Patria", el Fuerte Militar "San Jorge" y la Academia de Guerra, son vulnerables frente a una posible erupción volcánica, considerando su proximidad a las áreas de flujos de lodo (lahares); y cómo pueden las medidas preventivas basadas en un análisis territorial detallado y el uso de herramientas geoespaciales reducir esta vulnerabilidad y mejorar su capacidad de respuesta?

Capítulo II Marco Teórico

Resumen del capítulo

Este capítulo en una primera parte presenta de manera esquemática el ciclo de la gestión de riesgos resaltando la importancia de la preparación; de igual forma se presentan una clasificación de los fenómenos naturales para luego presentar con detalle los factores de vulnerabilidad en la zona de afectación ante una posible erupción del Volcán Cotopaxi por medio de una exposición de la historia eruptiva de este coloso volcán, haciendo énfasis en sus características morfo dinámicas.

Especial atención es la presentación de consideraciones teóricas sobre la importancia del uso de los Sistemas de Información Geográfica para la gestión de riesgos, entendiendo que esta tecnología permite el procesamiento de geoinformación para el análisis territorial y la posterior toma de decisiones en base los resultados obtenidos.

Se presenta una descripción de la vulnerabilidad de las unidades militares presentes en la zona afectada por lahares, así como una breve descripción de las mismas en cuanto a su rol dentro de la fuerza terrestre y la descripción de su infraestructura física. Además, se expone una línea del tiempo de la evolución de los sistemas y software destinados a la gestión de riesgos.

Finalmente se enumera algunos estudios previos, cuyo enfoque es la gestión de riesgos naturales.

Ciclo de la gestión de riesgos

La gestión de riesgos a desastres es un proceso que busca reducir la vulnerabilidad y fortalecer la capacidad de resiliencia de las comunidades ante eventuales amenazas naturales o antrópicas. Para ello, es bien conocido la utilización del famoso ciclo continuo de gestión de riesgos, conformado por cuatro fases interconectadas que inician con la prevención, pasando luego por la preparación, respuesta y finalizan con la recuperación ante eventos adversos (Lavell, 2003; UNISDR, 2015).

Fases del Ciclo de la Gestión de Riesgos

Prevención y Mitigación

Esta fase orienta sus esfuerzos en reducir la ocurrencia o el impacto de un desastre identificando previamente las amenazas y vulnerabilidades, es decir el presente proyecto se centra en esta fase. La prevención incluye estrategias de planificación territorial (zonificación de áreas de riesgo y restricciones para asentamientos en sitios peligrosos), construcción de infraestructuras resilientes, elaboración de normativas de seguridad y concienciación en gestión del riesgo (Cardona, 2001).

Preparación

En esta fase se pone en marcha la prevención, pues consiste en fortalecer las capacidades institucionales y comunitarias para enfrentar la emergencia. Se utiliza las herramientas elaboradas en la prevención y se inicia con los simulacros, la capacitación de brigadas y la puesta en marcha de sistemas de alerta temprana (Alexander, 2002).

Respuesta

Esta fase se pone en marcha inmediatamente tras la ocurrencia de un evento adverso. Implica la movilización de recursos, la ejecución de planes de emergencia entrenados durante la fase de preparación, activación de protocolos, coordinación interinstitucional entre otros. Su principal objetivo es minimizar pérdidas humanas y materiales (Blaikie et al., 1994).

Recuperación y Reconstrucción

Esta fase se la realiza posterior al evento e incluye las acciones necesarias para restaurar la normalidad en las comunidades afectadas y reconstruir la infraestructura dañada. Se la puede dividir en dos etapas, una inicial de recuperación temprana en la que se busca el restablecimiento de servicios básicos y atención a los afectados y la segunda denominada reconstrucción, en la cual se implementan obras permanentes con criterios de resiliencia y

reducción del riesgo de desastres (UNDP, 2013).

Figura 3

Ciclo de las Gestión de Riesgos



El ciclo de gestión de riesgos a desastres permite obtener una visión integral del riesgo, facilitando la planificación y la toma de decisiones, su aplicación contribuye a la mejorar la resiliencia ante desastres (Wisner et al., 2004).

Clasificación de los fenómenos naturales

Los fenómenos naturales pueden clasificarse en diferentes categorías según su origen y dinámica. Un tipo de clasificación es que define a los fenómenos en dos categorías: meteorológicos y geodinámicos.

Fenómenos meteorológicos

Los fenómenos meteorológicos están relacionados con procesos atmosféricos y su interacción con la superficie terrestre, dependen directamente de la dinámica del clima y las variaciones en los sistemas meteorológicos, originadas por cambios en la temperatura, presión, humedad y circulación del aire, también pueden ocurrir de forma rápida y con diferencias en intensidad y duración y finalmente suelen ser cíclicos y predecibles en cierta medida con la

ayuda de modelos climáticos proveniente del uso de información satelital.

A continuación, se describen algunos ejemplos de fenómenos meteorológicos:

- Ciclones tropicales y Huracanes
- Inundaciones pluviales
- Tormentas eléctricas
- Sequías
- Frentes fríos y olas de calor

Fenómenos Geodinámicos

Por otro lado, los fenómenos geodinámicos están asociados a la actividad interna de la Tierra y su interacción con la superficie terrestre, son resultado de procesos del movimiento de las placas tectónicas y estructuras volcánicas que moldean la cobertura terrestre.

Los fenómenos geodinámicos se clasifican en dos tipos:

- Fenómenos Exógenos: son aquellos relacionados con la erosión, el transporte y la sedimentación de materiales ocasionados por agentes externos como el agua, el viento y la gravedad.
- Fenómenos Endógenos: son aquellos derivados de la actividad interna de la Tierra, como por ejemplo los sismos las deformaciones tectónicas y los peligros volcánicos que contienen un conjunto de eventos en el cual el magma (roca fluida interna) busca salir a la superficie.

Vulnerabilidad ante desastres naturales

El Ecuador es un país que debido a su ubicación geográfica en el cinturón de fuego del Pacífico es altamente susceptible a eventos naturales que puedan derivar en desastres. El cinturón de fuego se caracteriza porque ocurre en ella ocurre una intensa actividad sísmica y volcánica. El Ecuador en su parte continental tiene 215 volcanes, de los cuales 27 son potencialmente activos; uno de ellos es el volcán Cotopaxi que se destaca no solo por su cono

perfecto y ser uno de los volcanes más altos del mundo (5.897 metros sobre el nivel del mar), sino también por su nivel destructivo (Paz y Miño, 2024) .

Por otro lado, según la Secretaría Ejecutiva de la Coordinación Nacional para la Reducción de Desastres SECONRED, 2012, la vulnerabilidad ante eventos naturales que puedan derivar en desastres se define como la susceptibilidad de una comunidad, infraestructura o sistema natural que pueda sufrir daños debido a la ocurrencia de un fenómeno natural. Este concepto está influenciado por factores sociales, económicos, ambientales y culturales. Mientras que, la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) define a la vulnerabilidad como "las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que incrementan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de amenazas". Blaikie et al. (1994) subrayan que la vulnerabilidad no solo depende del peligro natural, sino también de la capacidad de las comunidades para anticipar, resistir y recuperarse del impacto.

En Ecuador, la vulnerabilidad es mucho más alta debido al crecimiento demográfico no planificado localizado principalmente en áreas propensas a zonas de desastres, como laderas y cercanías a los ríos. Según datos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), existe un alto porcentaje de población ecuatoriana que vive en las cercanías de zonas de alto riesgo volcánico, como el Valle de los Chillos y Latacunga, zonas por las que existen evidencias de la circulación de flujos de lodo (lahares) generados en erupciones pasadas por el Cotopaxi.

Erupciones volcánicas: causas y efectos

La Organización Panamericana de la Salud, n.d., se refiere a las erupciones volcánicas como uno de los fenómenos naturales más impresionantes, se los destaca tanto por su magnitud como por sus efectos adversos en la salud humana y en el medio ambiente. En el Ecuador, este fenómeno es recurrente debido a la ubicación del país sobre el Cinturón de Fuego del Pacífico, esta región tiene alta actividad tectónica y volcánica. El presente marco teórico

aborda una parte de las causas y efectos de las erupciones volcánicas, y su impacto específico en el contexto ecuatoriano.

Las erupciones volcánicas son fenómenos geodinámicos causados por procesos internos relacionados con el movimiento de las placas tectónicas y el comportamiento del magma en el interior de la Tierra. En el caso de Ecuador, existen tres causas principales, la primera es la subducción de placas tectónicas debido a que se encuentra situado en un punto de convergencia tectónica donde la placa de Nazca subduce bajo la placa Sudamericana. Este proceso genera presiones y temperaturas que calienta y derriten parte del manto terrestre, produciendo magma que asciende hacia la superficie. Este mecanismo es responsable de la formación de la mayoría de los volcanes en los Andes (Yepes et al., 216 C.E.), en segundo lugar la dinámica del magma que define la explosividad del volcán en función de la viscosidad y la cantidad de sílice, liberando una gran cantidad de gases, lo que provoca un aumento de la presión interna y provocando el acenso del magma (Instituto Nacional de Prevención Sísmica INPRES, n.d.), finalmente se considera también la actividad geotérmica, producida por el calor interno de la Tierra lo que y facilita la emisión de magma y gases (IDAE & IGME, 2008).

Las erupciones volcánicas tienen efectos tanto inmediatos como a largo plazo, y afectan al medio ambiente, la salud y la economía. En el Ecuador, estos efectos tienden a tener mayores afectaciones debido a la proximidad de asentamientos humanos, zonas agrícolas y ganaderas muy próximas a las áreas consideradas de alto riesgo.

Efectos inmediatos:

Dentro de los peligros directos e inmediatos se incluyen flujos piroclásticos, flujos de lava, emisión de gases tóxicos y flujos de lodo (lahares). Estos fenómenos pueden causar pérdidas humanas, destrucción de infraestructura y desplazamientos masivos de población, de igual manera uno de los más comunes es la caída de ceniza, cuya dispersión de ceniza volcánica afecta grandes áreas, contaminando fuentes de agua, afectando cultivos y provocando problemas respiratorios en la población y las actividades ganaderas y agrícolas.

Efectos a Largo Plazo:

Por otro lado, las erupciones volcánicas pueden alterar ecosistemas completos causando deforestación y pérdida de biodiversidad en las áreas afectadas, pero también puede enriquecer los suelos; así mismo hay eventos tan grandes que pueden afectar el **cambio climático local y global, puesto que** las emisiones de gases y partículas volcánicas a la atmósfera reducen las temperaturas y modifican los sistemas globales. Y finalmente, al verse afectados sectores clave como la agricultura, el turismo y el transporte habría problemas de tipo económico inmediatos y a largo plazo con gastos de recuperación y reconstrucción.

Análisis de vulnerabilidad en zonas militares

El área de influencia del Volcán Cotopaxi, incluye zonas estratégicas en las que se encuentran ubicadas importantes unidades militares de la Fuerza Terrestre. En este contexto las analizadas en la presente investigación serán las que se detallan a continuación:

- Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 “Patria”
- Fuerte Militar “San Jorge”
- Academia de Guerra

Estas áreas militares se consideran vulnerables por tres razones, en primer lugar, su importancia estratégica para el país, ya que contiene una importante capacidad operativa de la planificación de respuestas rápidas a amenazas militares y civiles activo esencial para la seguridad nacional, en segundo lugar, por su proximidad al Volcán Cotopaxi, lo que las expone directamente a la afectación por lahares, peligro que podría comprometer tanto las operaciones militares como la seguridad de su personal e infraestructura y finalmente la infraestructura crítica esenciales para la operatividad de las Fuerzas Armadas, por lo que su protección es prioritaria.

Sobre la base de lo anterior, es de suma importancia el análisis de vulnerabilidad de estas unidades militares puesto que permitirá a los altos mandos diseñar un plan integral de mitigación y respuesta ante la amenaza de lahares del volcán Cotopaxi. Este plan no solo fortalecerá la

capacidad de la Brigada para operar bajo condiciones adversas, sino que también garantizará la seguridad del personal e infraestructura, preservando así su rol esencial en la defensa y seguridad del Ecuador.

Erupciones Volcánicas en el Ecuador

Ecuador tiene una de las concentraciones más altas de volcanes activos en el mundo, algunos de los más conocidos son el Volcán Tungurahua, el Volcán Reventador, el Volcán Sangay y el Volcán Cotopaxi. La historia volcánica del país demuestra la recurrencia de eventos significativos que han impactado profundamente a las comunidades y la economía nacional.

- **Volcán Tungurahua:** Sus erupciones desde 1999 han afectado severamente a las provincias de Tungurahua y Chimborazo, obligando a evacuar comunidades enteras y causando pérdidas agrícolas.
- **Volcán Cotopaxi:** Considerado uno de los volcanes más peligrosos debido a sus lahares, su erupción de 1877 causó destrucción significativa a lo largo de los valles cercanos (Instituto Geofísico, 2024).
- **Volcán Reventador:** Ubicado en la región amazónica, su actividad frecuente genera problemas de caída de ceniza que afectan a comunidades rurales y ecosistemas sensibles.

Dado el alto riesgo volcánico, el Ecuador ha implementado un marco legal y operativos para la gestión de desastres. El Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE) y el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) desempeñan un papel crucial en el monitoreo, la prevención y la respuesta ante emergencias volcánicas. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la educación comunitaria, la planificación territorial y la asignación de recursos.

Caracterización del Volcán Cotopaxi

El Volcán Cotopaxi, ubicado en la región central de la cordillera de los Andes en Ecuador y es considerado como uno de los volcanes más icónicos y activos del país y de Sudamérica.

El Volcán Cotopaxi es un estratovolcán, también conocido como volcán compuesto, presenta una forma cónica casi simétrica, coronada por un cráter circular de aproximadamente 800 metros de diámetro. Este tipo de volcán está formado por la acumulación de capas alternantes de lava, ceniza y otros materiales volcánicos. Los estratovolcanes se caracterizan por erupciones explosivas debido a que su magma contiene alta viscosidad, característica de elementos compuestos por sílice (Smithsonian Institution, 2020). La actividad del Volcán Cotopaxi está asociada a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, un proceso tectónico que genera la intensa actividad volcánica de la región andina.

Dentro de su estructura geológica y geomorfológica, se incluye principalmente andesitas y dacitas, tipos de rocas volcánicas que se forman a partir de erupciones explosivas y está cubierto por un extenso glaciar que desciende desde los 5.000 metros hasta los 4.600 metros sobre el nivel del mar, lo que lo convierte en uno de los pocos volcanes tropicales glaciares del mundo. Este glaciar juega un papel crucial en la generación de lahares durante las erupciones. Además, el Cotopaxi está rodeado de valles profundos y quebradas que canalizan los flujos de lodo hacia las áreas circundantes (Hall y Mothes, 2008).

Por otro lado, el Volcán Cotopaxi tiene un impacto cultural e histórico muy arraigado, ha sido objeto de mitos y leyendas en las culturas indígenas locales, que lo consideran un tipo de Dios. Su presencia ha influido también en el arte y la literatura ecuatoriana, simbolizando tanto belleza como amenaza.

Historia eruptiva

El Volcán Cotopaxi, es considerado como uno de los volcanes más peligrosos del mundo (Instituto Geofísico, 2024), tiene un historial eruptivo significativo. Las erupciones históricas han dejado evidencia de la magnitud y el alcance de sus efectos destructivos, según el IGEPN, el Volcán Cotopaxi es uno de los volcanes con mayor monitoreo en el país debido a su potencial destructivo.

El volcán Cotopaxi ha registrado numerosos eventos eruptivos, de los cuales existen

referencias en documentos históricos (Barberi et al., 1995; Aguilera y Toulkeridis, 2005; Pistolesi, 2008; Pistolesi et al., 2013; 2014). El estudio de las erupciones pasadas permite identificar los diferentes tipos de actividad volcánica, que van desde episodios de baja intensidad sin efectos significativos hasta erupciones catastróficas comparables al desastre de Armero, Colombia, ocurrido en 1985 (Naranjo et al., 1986; Thouret, 1990; Pierson, et al., 1990).

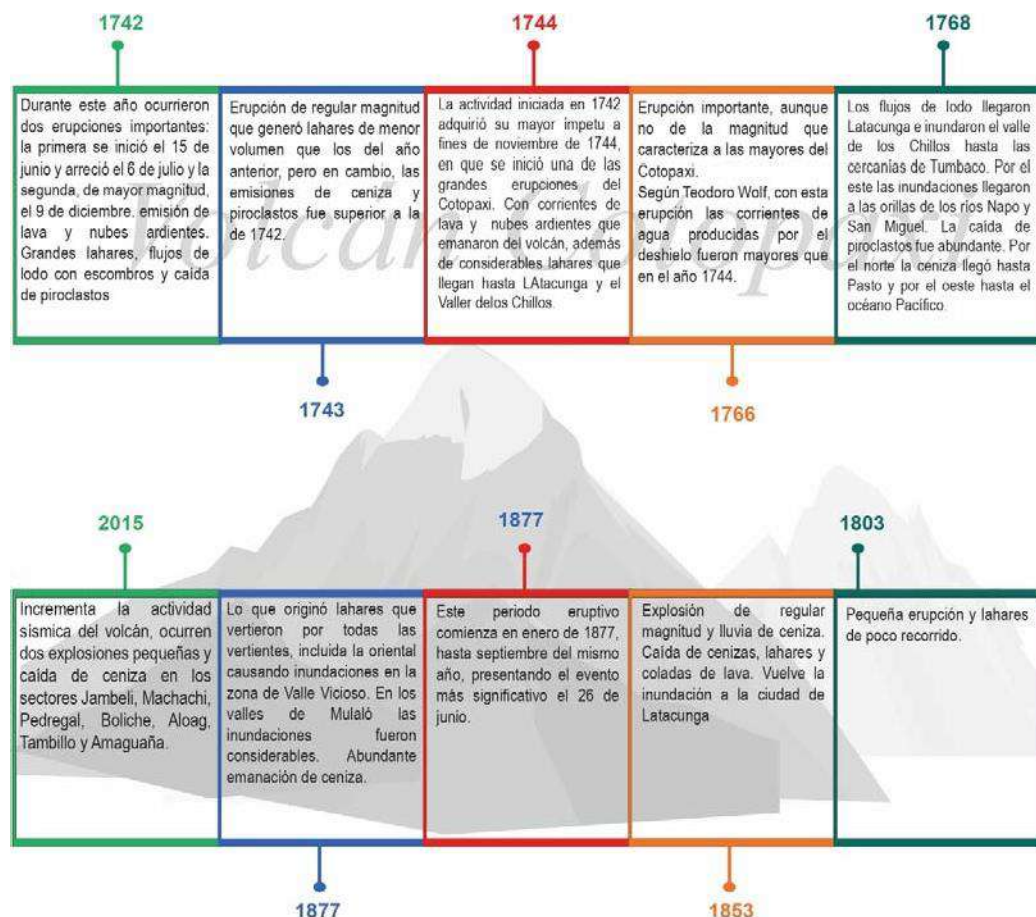
La actividad del volcán Cotopaxi se ha caracterizado por la expulsión de ceniza y piedra pómez, acompañada de emisiones de vapor de agua, flujos de lava, flujos piroclásticos y lahares (Aguilera et al., 2004; Aguilera y Toulkeridis, 2005). Su actividad magmática en épocas históricas está ampliamente documentada (Humboldt, 1838; Sodiro, 1877; Whymper, 1892; Wolf, 1878; 1904; Barberi et al., 1995), demostrando que los lahares generados por el volcán han impactado significativamente en comunidades, ciudades e infraestructura cercanas.

Estudios han identificado una recurrencia promedio de actividad eruptiva cada 117 ± 70 años en los últimos 2200 años (Barberi et al., 1995; Aguilera y Toulkeridis, 2005). Las cuatro fases eruptivas más recientes que generaron lahares y destruyeron asentamientos cercanos ocurrieron en los años 1534, 1742, 1768 y 1877 (Barberi et al., 1995; Aguilera y Toulkeridis, 2005). Basándose en la frecuencia de estos eventos se estima que es probable que se produzca una nueva erupción en los próximos 20 años (Aguilera y Toulkeridis, 2005). (Tomado de Padiilla Almeida, 2017).

La figura 4 recoge los eventos de mayor magnitud relacionadas con las erupciones históricas del Volcán Cotopaxi.

Figura 4

Resumen de Historia eruptiva del Volcán Cotopaxi



En base a (Padiilla Almeida, 2017) e (IG-EPN, 2015)

Peligros Volcánicos asociados al Volcán Cotopaxi

Los peligros volcánicos se refieren a los fenómenos generados por la actividad volcánica que pueden poner en riesgo la vida humana, la infraestructura y el medio ambiente (Myers et al., 2000). Estos incluyen eventos eruptivos, flujos de lava, emisión de gases tóxicos, caída de ceniza y, en el caso del Volcán Cotopaxi, lahares o flujos de lodo volcánico.

A continuación, se describen los principales peligros volcánicos asociados al Cotopaxi:

- **Flujos Piroclásticos:** Son mezclas de gases calientes, ceniza y fragmentos de roca que descienden a gran velocidad por las laderas de un volcán durante una erupción

explosiva. Pueden alcanzar velocidades superiores a los 200 km/h y temperaturas de hasta 1.000 °C, lo que los convierte en uno de los fenómenos volcánicos más letales. (Sigurdsson et al., 2015).

- **Flujos de Lava:** Son corrientes de roca fundida que se deslizan por las laderas del volcán. Aunque suelen avanzar a velocidades más lentas que los flujos piroclásticos, los flujos de lava son destructivos para la infraestructura, vegetación y suelos en su trayectoria. Según el USGS (2022), su velocidad promedio es de 1 a 10 km/h, dependiendo de su composición y pendiente del terreno.
- **Emisión de Gases Tóxicos:** Durante las erupciones volcánicas, se liberan gases como dióxido de azufre (SO₂), dióxido de carbono (CO₂) y fluoruro de hidrógeno (HF). Estos gases pueden tener efectos nocivos en la salud humana, el ganado y los cultivos, además de contribuir a la contaminación atmosférica. Estudios realizados por el IGEPN (2018) indican que la emisión de gases es uno de los primeros signos de actividad volcánica.
- **Caída de Ceniza:** La ceniza volcánica está compuesta por pequeños fragmentos de roca y vidrio volcánico expulsados durante una erupción. Puede desplazarse cientos de kilómetros dependiendo de las corrientes de viento. La acumulación de ceniza puede colapsar techos, afectar la calidad del aire y dañar cultivos. Según Horwell y Baxter (2006), la inhalación prolongada de ceniza puede causar problemas respiratorios graves.
- **Lahares o Flujos de Lodo Volcánico:** Los lahares son corrientes de lodo que se generan cuando el material volcánico se mezcla con agua, ya sea por el deshielo de glaciares o lluvias intensas. Pueden alcanzar grandes distancias y velocidades de hasta 60 km/h, destruyendo todo a su paso. En el caso del Cotopaxi, los lahares representan uno de los mayores peligros debido a su glaciar extenso y a las rutas de drenaje

naturales que dirigen estos flujos hacia áreas pobladas como Latacunga y el Valle de los Chillos (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, n.d.)

Factores de Vulnerabilidad en el Área del Volcán Cotopaxi

Los principales factores que aumentan la vulnerabilidad ante los peligros del Volcán Cotopaxi son:

- **Asentamientos Humanos en Zonas de Riesgo:** Ciudades como Latacunga, Salcedo y el Valle de los Chillos se encuentran en las rutas de los lahares potenciales. Estas áreas concentran una alta densidad poblacional y actividades económicas críticas.
- **Infraestructura Crítica Expuesta:** Infraestructuras como carreteras, puentes y sistemas de riego son vulnerables a la destrucción por los lahares y la caída de ceniza.
- **Falta de Preparación y Concienciación:** Aunque se han implementado planes de emergencia en algunas comunidades, muchas personas desconocen los protocolos de evacuación o minimizan el riesgo.
- **Impacto Económico:** Las actividades agrícolas y ganaderas, que son pilares económicos en la región, se ven seriamente afectadas por la caída de ceniza y los flujos lávicos.

A estos factores de riesgos se suma que existen unidades militares, que apoyan en las operaciones de rescate, y que están localizadas dentro de las zonas de peligros volcánicos (Salazar & Ercole, 2009).

Herramientas geoespaciales de análisis de riesgos

El desarrollo del análisis se llevó a cabo utilizando un enfoque multidisciplinario apoyado en métodos y herramientas geoespaciales que permitieron integrar, analizar y visualizar información territorial. A continuación, se describen los métodos y herramientas empleados:

Las herramientas geoespaciales son técnicas y sistemas tecnológicos utilizados para recopilar, analizar y visualizar datos espaciales (geográficos) con el fin de comprender y

gestionar los riesgos asociados a fenómenos naturales como las erupciones volcánicas. Estas herramientas incluyen Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos como imágenes satelitales (United & Regional, 2009).

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los SIG son sistemas computacionales que integran y analizan datos geoespaciales para identificar patrones y tendencias en el espacio. Estas herramientas permiten la cartografía de zonas de riesgo, la planificación de rutas de evacuación y la simulación de escenarios eruptivos. Ejemplos destacados incluyen ArcGIS y QGIS, ampliamente utilizados para la gestión de riesgos y desastres (Longley et al., 2015). Los SIG fueron la base del análisis, permitiendo la gestión, integración y análisis de datos espaciales. En este contexto, se utilizaron SIG para:

- **Procesamiento de datos espaciales:** Incluyendo capas vectoriales y raster, con atributos relevantes para el estudio.
- **Superposición de capas temáticas:** Para identificar relaciones espaciales entre variables como capa de amenazas, infraestructura y de población.
- **Modelado espacial:** Creación de representaciones tridimensionales y análisis de interacciones geográficas.
- **Visualización y cartografía:** Generación de mapas temáticos y mapas coropléticos que mostraron la distribución de los datos del proyecto (Carreton, 2022).

Sensores Remotos

Los sensores remotos recopilan datos sobre la superficie terrestre desde plataformas como satélites o drones. Estas herramientas son esenciales para monitorear la actividad volcánica, mapear cambios en el paisaje y analizar la distribución de ceniza tras una erupción. Programas como Landsat y Sentinel han sido cruciales en el monitoreo de riesgos volcánicos en Ecuador (Campbell y Wynne, 2011).

Fotografía Aérea

Se emplearon fotografías aéreas como insumo clave para el análisis geoespacial. Estas imágenes permitieron:

- **Identificación y clasificación de elementos geográficos:** Como edificaciones, carreteras, ríos y áreas verdes.
- **Validación de datos espaciales:** Contrastando información vectorial existente con datos reales capturados en las imágenes.
- **Generación de ortofotos:** Utilizadas como referencia para la creación de cartografía base y la actualización de datos.

Cartografía Básica

La cartografía básica sirvió como referencia para estructurar y validar la información espacial. Esta cartografía incluyó datos fundamentales como:

- **Divisiones administrativas:** Límites cantonales y parroquiales.
- **Infraestructura vial:** Carreteras principales y secundarias.
- **Hidrografía:** Ríos, lagos y cuerpos de agua relevantes.

Se trabajó con escalas multiescales, asegurando la coherencia y consistencia en las representaciones geográficas.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico complementó el procesamiento de datos espaciales, permitiendo una interpretación más robusta de los resultados. Entre las aplicaciones realizadas están:

- **Cálculo de frecuencias:** Para identificar patrones de distribución espacial y densidad de elementos.
- **Modelado de tendencias:** A través de análisis de regresión y distribución espacial.

- **Homologación de datos:** Garantizando que las categorías y valores sean consistentes en las distintas capas y escalas.

Levantamiento de Datos en Campo

El levantamiento de datos en campo se realizó para validar y actualizar la información geográfica y garantizar la precisión del análisis. Las actividades incluyeron:

- **Verificación de elementos espaciales:** Confirmando la ubicación y características de elementos geográficos observados en los SIG y las fotografías aéreas.
- **Captura de coordenadas geográficas:** Mediante el uso de GPS de alta precisión.
- **Observaciones adicionales:** Documentando características que no fueron visibles en las fotografías aéreas ni los datos SIG, como condiciones específicas de las infraestructuras.

Integración de Métodos y Herramientas

La combinación de estos métodos y herramientas permitió abordar el análisis desde diferentes perspectivas, garantizando una representación integral del territorio. Los datos obtenidos en cada etapa del proceso fueron integrados en un entorno SIG, lo que facilitó la generación de productos finales como mapas temáticos, modelos tridimensionales y reportes analíticos, fundamentales para la toma de decisiones y la planificación territorial.

El uso complementario de SIG, fotografía aérea, cartografía básica, análisis estadístico y levantamiento de datos en campo fortaleció el análisis geoespacial, permitiendo alcanzar un nivel de detalle y precisión que respalda la gestión eficiente del territorio y la generación de productos derivados de alta calidad.

Línea del Tiempo de Sistemas y Software destinados a la Gestión de Riesgos

Los software y sistemas especializados han tenido un avance importante, especialmente en la adopción de mecanismos que permiten el análisis, recopilación y procesamiento de

información importante para la toma de decisiones; en este contexto la reducción de riesgos a desastres y la planificación estratégica, se ha convertido en un pilar primordial para diferentes sectores que hacen referencia a la gestión y ordenamiento del territorio. Desde los primeros sistemas usando tecnología simple hasta las plataformas modernas que incluyen inteligencia artificial, modelado predictivo y análisis geoespacial, muestran el avance tecnológico y las crecientes necesidades de exactitud y eficiencia en la gestión del riesgo (Bi & Gelenbe, 2019).

A lo largo de la historia evolutiva de los sistemas de gestión de información se evidencia como la innovación tecnológica ha aportado a construir sistemas con un enfoque más proactivo y sostenible frente a los desafíos globales, permitido mejorar de manera notable la gestión integral del riesgo mediante el análisis de geoinformación.

La influencia de estándares internacionales, colaboraciones interinstitucionales y el creciente uso de datos geoespaciales ha permitido la creación de herramientas más robustas y accesibles, que han contribuido a robustecer la capacidad de respuesta, prevención y mitigación de impactos de los desastres en la sociedad. Esta evolución es presentada en la siguiente cronología que ilustra los hitos más importantes en el desarrollo de sistemas y software dirigidos a la gestión de riesgos.

- **1960s:** Se crean los primeros SIG manuales que utilizan como técnica de análisis sensores remotos como apoyo al desarrollo de estudios geoespaciales.
- **1972:** Se inicia una nueva era en la observación de la Tierra, con el lanzamiento del primer satélite Landsat.
- **1980s:** Se inicia el uso de software especializado en el análisis de información georreferenciada llamado SIG como por ejemplo ArcInfo, antecesor de ArcGIS, herramienta digital utilizada para el análisis digital de riesgos.
- **1990s:** Inicia el análisis en tres dimensiones mediante sistemas CAD, que ayudan al desarrollo y simulación de riesgos.
- **2000s:** Se democratiza el acceso a herramientas geoespaciales, mediante el desarrollo

de software de código abierto impulsado desde varias comunidades un ejemplo es QGIS.

- **2014:** Continúa el desarrollo tecnológico y el apareamiento de varias fuentes de información en el ámbito satelital se destaca el Lanzamiento del programa Sentinel, que facilita datos satelitales de alta resolución para el monitoreo ambiental y de riesgos.

Revisión de estudios previos

Con el fin de reforzar la base teórica presentada en este proyecto, se ejecutó la revisión de estudios especializados que permitan conocer con más detalle los peligros referidos a los lahares y su posible afectación en la infraestructura física.

La presente revisión bibliográfica recoge estudios relacionados con el Volcán Cotopaxi, además se describe cada fuente consultada:

"Modelo tridimensional de la historia geológica del volcán Cotopaxi"

Mediante el análisis de su historia eruptiva y la caracterización de sus depósitos, proporciona una comprensión profunda de los procesos volcánicos que han moldeado su estructura actual; además ofrece una reconstrucción detallada en tres dimensiones de la evolución geológica del Volcán Cotopaxi. La investigación referida es un referente importante para entender de mejor manera los comportamientos futuros y evaluar posibles amenazas volcánicas.

Fuente: Escuela Politécnica Nacional, repositorio digital. Disponible en:

<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/360>

"Percepción del riesgo asociado al volcán Cotopaxi y vulnerabilidad en el Valle de los Chillos (Ecuador)"

Los resultados muestran una conciencia significativa sobre la amenaza volcánica, aunque con ciertas distorsiones en la comprensión de los peligros. Destaca la importancia de la educación y comunicación efectiva en la gestión de riesgos volcánicos; información extraída por medio de encuesta realizadas en el Valle de los Chillos con el fin de evaluar la percepción de la población sobre el riesgo del volcán Cotopaxi.

Fuente: Salazar, D., y D'Ercole, R. (2007). Percepción del riesgo asociado al volcán Cotopaxi y vulnerabilidad en el Valle de los Chillos. Publicado en Horizon Documentation IRD. Disponible en: <https://horizon.documentation.ird.fr>

"Análisis de la estratigrafía de lahares en el sector Mulaló (volcán Cotopaxi) mediante el uso de tomografías eléctricas de resistividad"

Los resultados de esta investigación son esenciales para la evaluación de riesgos en esta zona de afectación, ya que presenta resultados sobre el estudio de los depósitos de lahares en el sector de Mulaló utilizando tomografía eléctrica de resistividad; además identifica características internas de los depósitos, lo que permite comprender la dinámica de los flujos de lahares.

Fuente: Universidad Nacional de Chimborazo. Disponible en: <https://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13095>

"Aportes para una adecuada expansión de las áreas urbanas de la ciudad de Latacunga, considerando la amenaza del volcán Cotopaxi"

El análisis realizado propone estrategias de expansión urbana considerando la amenaza volcánica, buscando un desarrollo sostenible y la integración de la gestión de riesgos en la planificación territorial ya que considera el crecimiento urbano de Latacunga, localidad afectada históricamente por las erupciones del Cotopaxi.

Fuente: Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Disponible en: <https://repositorio.puce.edu.ec>

"Erupciones del volcán Cotopaxi y su incidencia en los centros educativos"

El trabajo de investigación destaca la necesidad de ejecutar planes de contingencia y programas educativos sobre gestión de riesgos dirigidos a alumnos y personal docentes del sistema educativo regular; dicha propuesta se basa en la evaluación del impacto de las erupciones del Cotopaxi en centros educativos cercanos a la zona de afectación de dicho volcán, considerando los peligros volcánicos más recurrentes como caídas de ceniza y lahares.

Fuente: Academia.edu. Disponible en: <https://www.academia.edu>

Las investigaciones mencionadas, cada una con temáticas muy particulares, son aportes técnicos importantes para entender de mejor manera el comportamiento del Volcán Cotopaxi, los peligros volcánicos asociados al mismo, así como registrar las posibles estrategias de mitigación, en su conjunto son un aporte valioso al conocimiento relacionado con gestión de peligros volcánicos en Ecuador.

Capítulo III Metodología

Resumen del capítulo

En este apartado se describe el dispositivo metodológico empleado en el desarrollo de este proyecto, enumerando las herramientas de análisis utilizadas así como sus respectiva descripción en función de su uso específico y características técnicas, por medio de un gráfico se enumeran las cuatro fases de análisis que comienza con la recolección de información de fuentes oficiales y con una escala temporal y espacial definida, seguidamente se describe el proceso seguido para la identificación de las unidades militares a ser analizadas a profundidad, con el objetivo de seguir con los respectivos cálculos de áreas de afectación así como la definición de rutas óptimas de evacuación vehicular y peatonal.

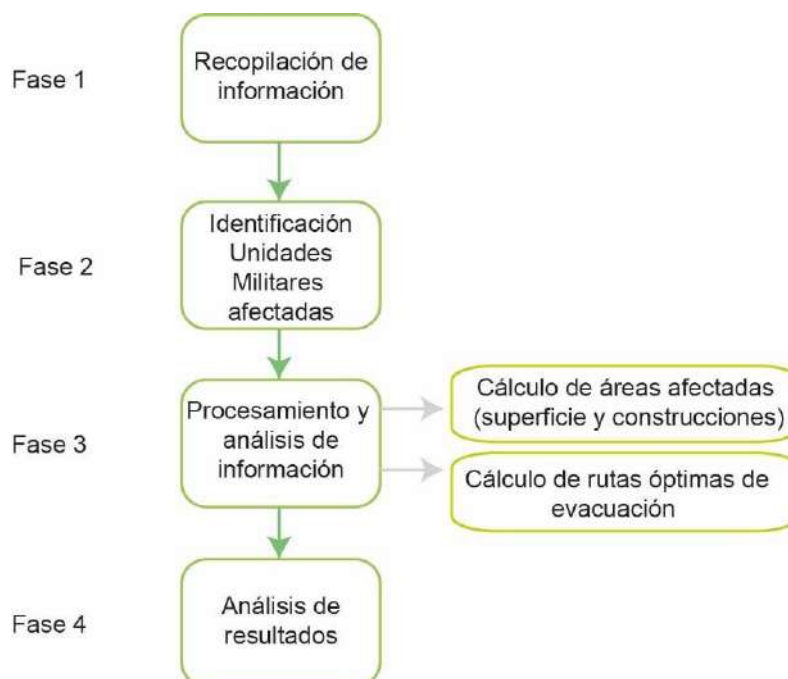
Finalmente se describe el proceso de análisis de resultados mediante el uso de herramientas SIG, así como la generación de las respectivas estadísticas y mapas de síntesis.

Enfoque del proyecto

El presente proyecto busca fortalecer la capacidad operativa y de respuesta de la Brigada de Fuerzas Especiales N° 9 “Patria”, la Academia de Guerra y el Fuerte Militar “San Jorge”, pero principalmente pretende sentar las bases para una gestión territorial más eficiente y resiliente frente a riesgos volcánicos (proveniente de los lahares del Volcán Cotopaxi), integrando información especializada y análisis geoespacial.

Metodología

Varias herramientas avanzadas de ArcGIS se utilizaron para realizar el análisis geoespacial, esto con el objetivo de procesar, analizar y visualizar información territorial en diferentes dimensiones. Las etapas del proceso metodológico del presente proyecto, son presentadas de manera esquemática en la siguiente figura.

Figura 5*Metodología general del proyecto***Recopilación de información**

Varias fueron las fuentes consultas para realizar el estudio de vulnerabilidad de las unidades militares, en dicho proceso se realizó la selección de variables que aporten de manera significativa al propósito del proyecto, en este sentido se optó por variables que permitan garantizar la precisión y representación real de la zona de estudio.

A continuación, se detallan las principales fuentes y variables utilizadas:

Tabla 4*Fuentes de información*

Fuente	Variable	Uso
Catastro de las Fuerzas Armadas del MIDENA (2018)	Base de datos que incluye información sobre límites y construcciones dentro de las unidades militares del país.	Delimitación precisa de instalaciones militares y sus zonas de influencia. Análisis de infraestructura afectada. Evaluación de posibles afectaciones de la infraestructura ante amenazas naturales.
Cartografía Básica 1:5.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2024)	Base de datos a escala 1:5.000 con información detallada del relieve, hidrografía, infraestructura vial y elementos geográficos de interés.	Base fundamental para el análisis espacial. Precisión en la localización de infraestructuras. Insumo clave para la identificación de rutas óptimas.
Cobertura de Peligros Volcánicos del Instituto Geofísico de la Escuela	Información georreferenciada sobre la distribución y extensión de peligros volcánicos del	Identificación de posibles áreas en riesgo dentro de

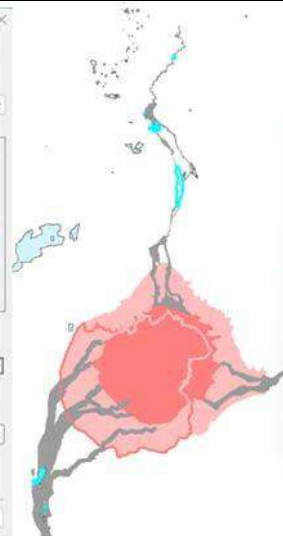
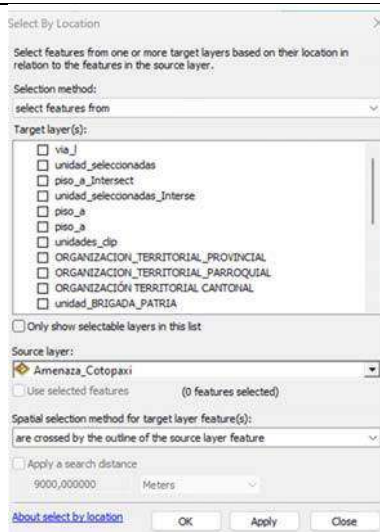
Fuente	Variable	Uso
Politécnica Nacional (IG-EPN) 2016	Volcán Cotopaxi que incluye flujos de lava, lahares, caída de ceniza y otros fenómenos asociados.	la zona de influencia del Volcán Cotopaxi. Evaluación de la vulnerabilidad de las instalaciones militares.

Identificación de unidades militares afectadas por posibles flujos de lodo (lahares) del Volcán Cotopaxi.

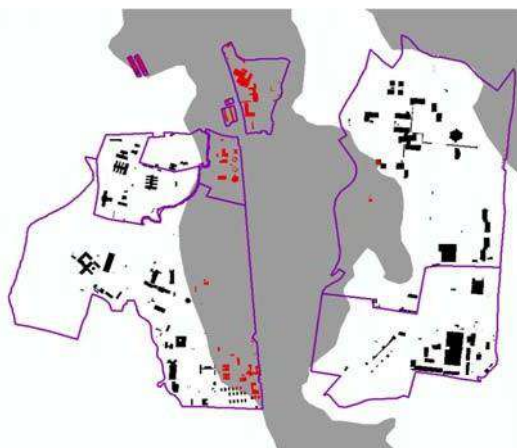
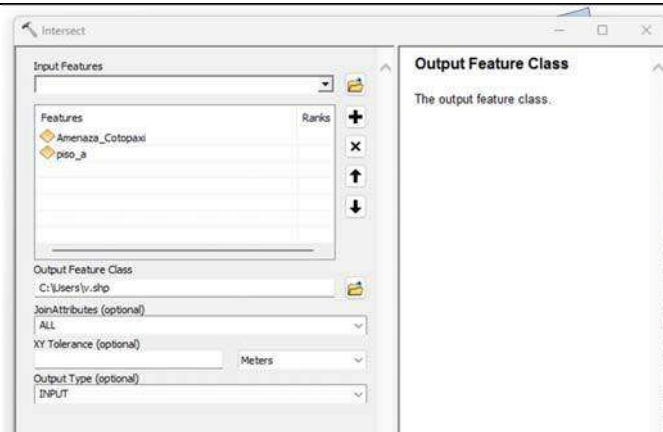
En primer lugar, se identificaron las unidades militares que se localizan sobre la cobertura oficial de peligros volcánicos por flujos de lodo (lahares), para este proceso se utilizó herramientas de sobre posición - SIG, de esta manera se definieron que tres unidades militares podrían verse afectadas.

A continuación, se presenta de manera gráfica el procedimiento SIG realizado en lo referente a la determinación de las unidades militares afectadas mediante el procesamiento de información temática.

Selección por localización

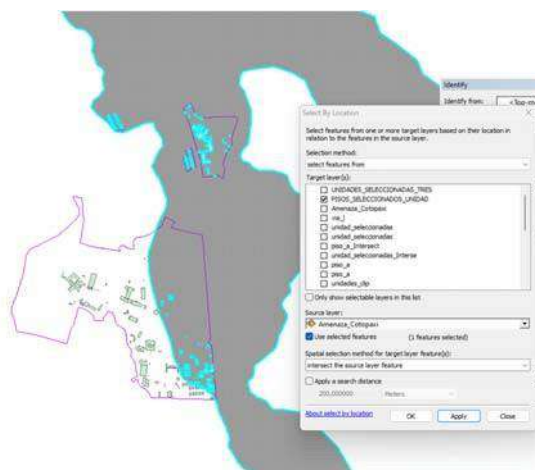


Intersección de peligros
con unidades militares y
construcciones



Cálculo de frecuencias

OBJECTID	FREQUENCY	SLOPE	A
1	1	ACADEMIA DE GUERRA	2,2658
2	1	ACADEMIA DE GUERRA	12,5119
3	1	ACADEMIA DE GUERRA	7,8608
4	1	ACADEMIA DE GUERRA	56,4882
5	1	ACADEMIA DE GUERRA	159,3877
6	1	ACADEMIA DE GUERRA	199,2358
7	1	ACADEMIA DE GUERRA	108,0515
8	1	ACADEMIA DE GUERRA	345,1265
9	1	ACADEMIA DE GUERRA	606,9968
10	1	ACADEMIA DE GUERRA	36,5458
11	1	ACADEMIA DE GUERRA	1885,0512
12	1	ACADEMIA DE GUERRA	241,9867
13	1	ACADEMIA DE GUERRA	596,2648
14	1	ACADEMIA DE GUERRA	242,8925
15	1	ACADEMIA DE GUERRA	452,0588
16	1	ACADEMIA DE GUERRA	1377,9746
17	1	ACADEMIA DE GUERRA	2,2715
18	1	ACADEMIA DE GUERRA	83,0585
19	1	ACADEMIA DE GUERRA	22,0549
20	1	ACADEMIA DE GUERRA	4,5796
21	1	ACADEMIA DE GUERRA	986,6149
22	1	ACADEMIA DE GUERRA	49,6538
23	1	ACADEMIA DE GUERRA	39,7625
24	1	ACADEMIA DE GUERRA	4,7522
25	1	ACADEMIA DE GUERRA	141,317
26	1	ACADEMIA DE GUERRA	51,7365
27	1	ACADEMIA DE GUERRA	2,3895
28	1	ACADEMIA DE GUERRA	60,4564
29	1	ACADEMIA DE GUERRA	60,4515
30	1	ACADEMIA DE GUERRA	60,4515



Cálculo de áreas afectadas

El mapa de peligros volcánicas del Instituto Geofísico, proporciona información de zonas posiblemente afectadas por lahares, la cual es producto de modelos matemáticos de propagación, esta información fue superpuesta con las áreas construidas de las unidades militares, dicho proceso fue realizado en ambiente SIG como se presenta en la figura 6, lo que permitió el cálculo de las áreas afectadas por lahares

Para la delimitación precisa de las zonas de afectación, se emplearon las siguientes capas geoespaciales:

a. Cobertura de la Unidad Militar y sus construcciones que representa la extensión territorial de la instalación militar e incluye infraestructura física como: edificios, zonas de entrenamiento y accesos viales, dicha información fue obtenida a partir del catastro de las Fuerzas Armadas

b. Cobertura de la Afectación por Lahares, que fue modelada por el Instituto Geofísico, basada en la topografía y comportamiento histórico de los flujos de lahar, mediante la simulación de la propagación de material volcánico considerando volumen, velocidad y pendiente del terreno, generada por medio de algoritmos de dispersión hidrodinámica como LAHARZ, Titan2D o HEC-RAS.

Se utilizó el método de intersección geoespacial disponible en el SIG (intersección de las capas), con el propósito de identificar las áreas dentro de la unidad militar que coinciden con las zonas potencialmente afectadas por los lahares; este proceso permitió establecer lo siguiente:

- Área total afectada, estimada en metros cuadrados o hectáreas (construcciones o predio).
- Identificación de infraestructuras críticas localizadas dentro de la zona de riesgo.
- Determinación de niveles de afectación considerando dos categorías: parcial o total.

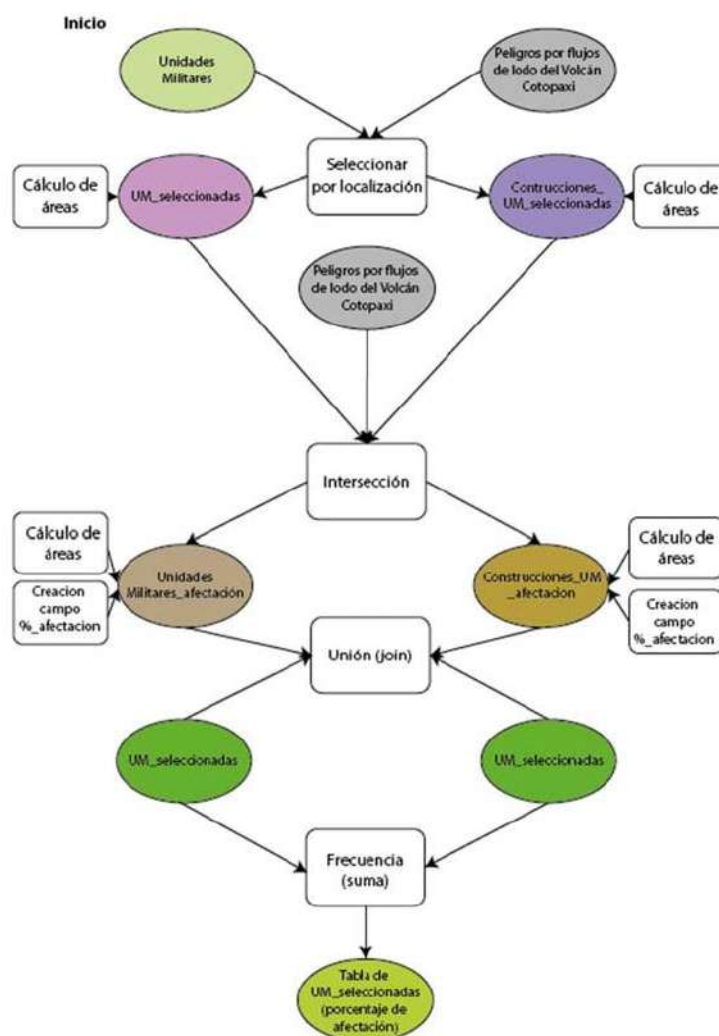
Las autoridades militares podrán tomar las siguientes acciones a partir de los siguientes resultados:

- Definición de rutas de evacuación internas seguras para el personal tanto a nivel vehicular como peatonal.
- Establecimiento de protocolos de emergencia y alertas tempranas en la unidad militar de responsabilidad.

- Definición de estrategias de mitigación, como la necesidad de construcción de barreras de contención hasta la decisión de reubicación permanente de instalaciones clave al interior de la unidad militar.

Figura 6

Esquema del cálculo del porcentaje de afectación por unidad militar (superficie y construcciones)



Determinación de rutas óptimas de evacuación

En cuanto al cálculo de las rutas óptimas de evacuación, los módulos de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) basan su análisis en el cálculo de valores acumulativos de los píxeles dentro de una capa ráster, lo que permite estimar la dificultad del desplazamiento en un territorio determinado. Para ello, es primordial contar con una capa de áreas de servicio (isocronas), generada mediante el uso de herramientas de análisis de redes como Network Analyst disponible en ArcGIS. El producto de este procesamiento es una cobertura ráster, calculada mediante la determinación de un primer punto (salida) y un segundo punto (llegada), definiendo así una región que abarca todas las rutas accesibles posibles dentro de una red de movilidad (vías de acceso), en este caso se consideraron para el análisis las vías internas y externas por cada una de las unidades militares estudiadas.

El resultado final es recogido en una capa de información que refleja la dificultad de desplazamiento considerando varios factores geoespaciales. Las variables que integran este análisis son las siguientes:

- Variable que dificulta la velocidad y accesibilidad / Relieve y pendientes
- Variable que facilita la velocidad y accesibilidad / Infraestructura vial (calles, carreteras y accesos disponibles).
- Variable de localización / Unidades militares y sus puntos de evacuación.
- Variable de riesgo / Área afectadas por lahares (para evitar rutas de alto peligro).
- Variable de desplazamiento tanto vehicular como peatonal / Tiempo

Para calcular los tiempos de evacuación, se supuso una velocidad constante de 30 km/h para vehículos y 5 km/h para desplazamiento peatonal. El traslado horizontal de las personas

dentro de las unidades utilizando las vías más seguras y eficientes se pudo establecer mediante la aplicación de algoritmos de optimización de rutas.

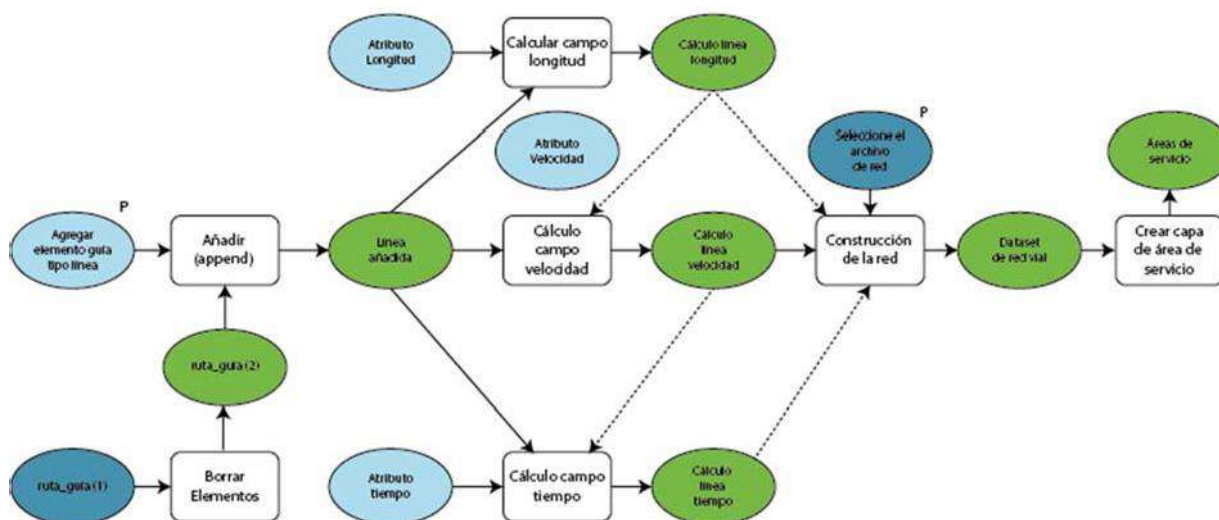
La toma de decisiones en escenarios de crisis con el fin de garantizar una evacuación eficiente en caso de desastres naturales o amenazas inminentes, se facilita en gran medida gracias al análisis de variables que brindan información esencial para la gestión de emergencias y planificación estratégica en cada una de las unidades militares analizadas y así minimizar los posibles impactos tanto en la infraestructura física y en la seguridad del personal civil y militar.

A continuación, se explica el proceso:

En primer lugar, se carga los elementos lineales a un “Network Dataset” previamente configurado y se valida la red vial con la que se va a realizar el análisis de las áreas de servicio (isocronas), y se genera un nuevo archivo tipo línea con la red vial validada, proceso que se observa a continuación.

Figura 7

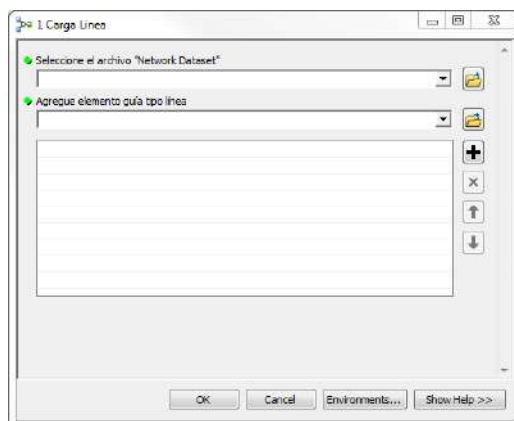
Esquema del cálculo de la ruta óptima en función de las áreas de servicio (isocronas)



Los campos a modificarse del set de datos de la red vial validada son:

- Archivo en el que se van a cargar los resultados

b. Vías



En base a los puntos de origen (salida) que para el caso de las unidades militares fueron los puntos más estratégicos que facilitan la reunión de las personas, se debe validar y generar las áreas de servicio (isocronas), etapa necesaria antes de generar de forma definitiva la capa resultante, la cual presenta los polígonos que reflejan los tiempos de desplazamiento considerando el mecanismo de evacuación (vehicular o peatonal) y el tiempo de desplazamiento.

Los campos que deben modificarse son:

- **Punto_origen:** Shp tipo punto, que identifique el punto de origen (salida) de las isócronas.
- **Network Dataset:** Dataset que contiene la red de zonas iguales de desplazamiento (isócronas).
- **Atributo tiempo:** Campo que registra la definición del tiempo (horas, minutos) utilizado por cada elemento a recorrer (considerando si es un desplazamiento vehicular o peatonal)
- **Unidades corte:** Unidad de tiempo utilizada para el estudio (horas, minutos).

- **Valores corte:** Valores que registran el tamaño y el número de polígonos a generar para las áreas de servicio, (Deben ser colocados en forma ascendente y con un espacio para independizarlos, se puede colocar tantos como sea necesario).
- **Nombre del archivo de salida:** Asignación de nombre para un archivo a ser almacenado en la memoria temporal ya que no es el archivo final. Este archivo se cargará automáticamente en el visor de contenidos.

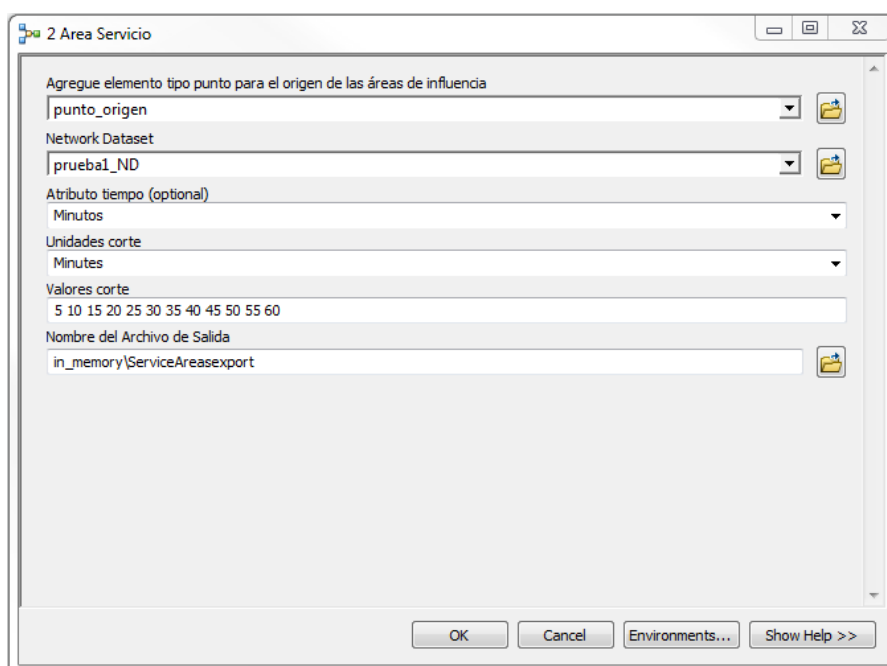
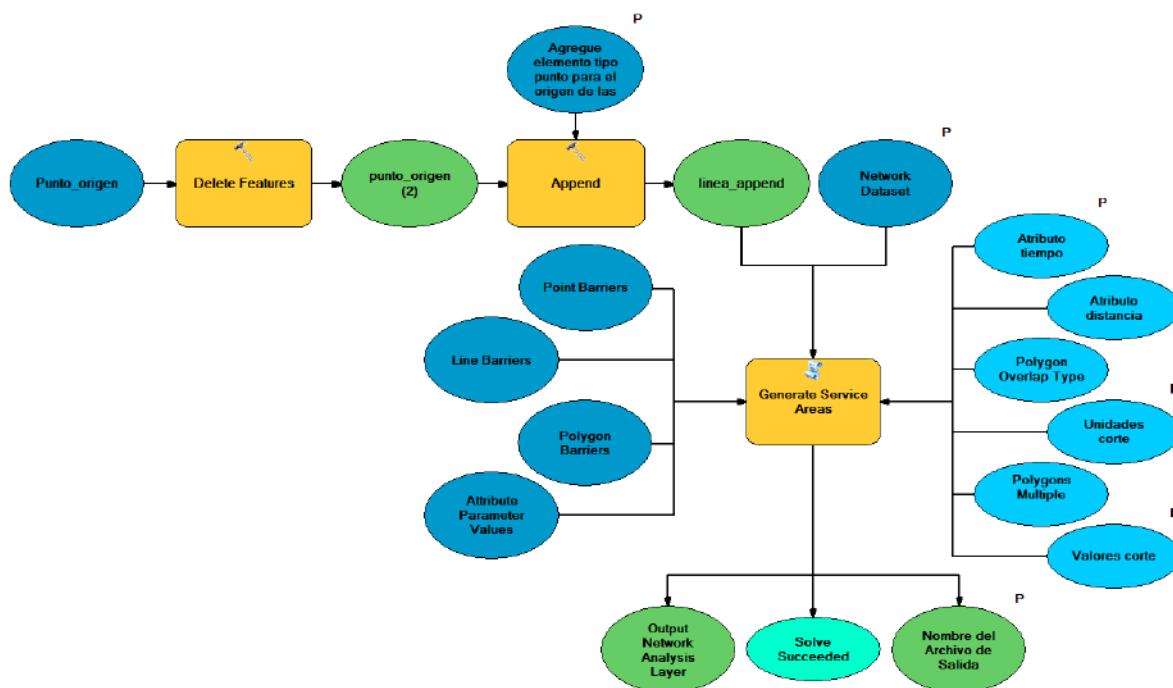


Figura 8

Flujograma de la generación de áreas de servicio (isocronas)



Una vez obtenida la capa de las áreas de servicio (isocronas) en formato raster, se procedió a la transformación a capa vectorial la misma que fue usada en otra etapa de análisis del proyecto; finalmente, el análisis visual de la información geográfica procesada y el trabajo de campo permitió determinar la ruta óptima para la evacuación (vehicular y peatonal) del personal de las unidades militares posiblemente afectadas por flujos de lodo (lahares).

Dichos resultados son presentados en los respectivos mapas coropléticos de síntesis elaborados para cada una de las unidades militares.

Capítulo IV Resultados y Análisis

Resumen del capítulo

El presente capítulo presenta los resultados obtenidos del geoprocesamiento y análisis de la información procesada es presentada por medio de la generación de estadísticas que hacen referencia a las áreas afectadas en porcentaje según unidad militar analizada.

De igual forma se presenta el trazo de las rutas óptimas de evacuación vehicular y peatonal por medio de mapas, donde se grafica dichas rutas por medio de colores y se identifican puntos de encuentro y sitios seguros según sea el caso y la unidad militar analizada.

Análisis de resultados

La importancia del uso de tecnologías geoespaciales en la planificación y gestión territorial, está dada por la posibilidad de combinar herramientas que permiten un análisis holístico; todo esto mediante la superposición de capas temáticas oficiales, la comparación de resultados y la generación de reportes finales que apoyarán la toma de decisiones informadas.

Las múltiples herramientas que contiene ArcGIS permitió realizar un análisis integral de cada una de las capas procesadas, las cuales muestran las características de la zona de estudio en su conjunto, resaltando aquellas que son más valiosas para cumplir con los objetivos del presente proyecto, esto permitió optimizar recursos, evaluar escenarios y generar visualizaciones avanzadas que mejoraron la comprensión espacial de los datos analizados.

Análisis de unidades militares afectadas por peligros volcánicos del volcán Cotopaxi

Para definir las unidades militares a ser analizadas, se utilizó la cobertura de flujos de lodo o lahares generada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional año 2016, este flujo puede transportar grandes volúmenes de escombros, agua y cenizas, con velocidades y energías devastadoras, esta información fue sobrepuesta con los límites de las unidades militares, cuya fuente es el Catastro de la Fuerza Terrestre año 2011 actualizado en el 2018.

Identificación de zonas vulnerables en las unidades seleccionadas

En las figuras siguientes se puede apreciar mapas de cada unidad, esta sobreposición de coberturas realizada entre las capas de límites de las unidades militares y construcciones provenientes del Catastro de Fuerzas Armadas y la capa de peligros volcánicos por flujos de lodo del Instituto Geofísico, permiten apreciar de manera gráfica el área potencialmente afectada, así como las construcciones que podrían sufrir algún daño.

Figura 9 Susceptibilidad a lahares de la “Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria” ante una posible erupción del volcán Cotopaxi

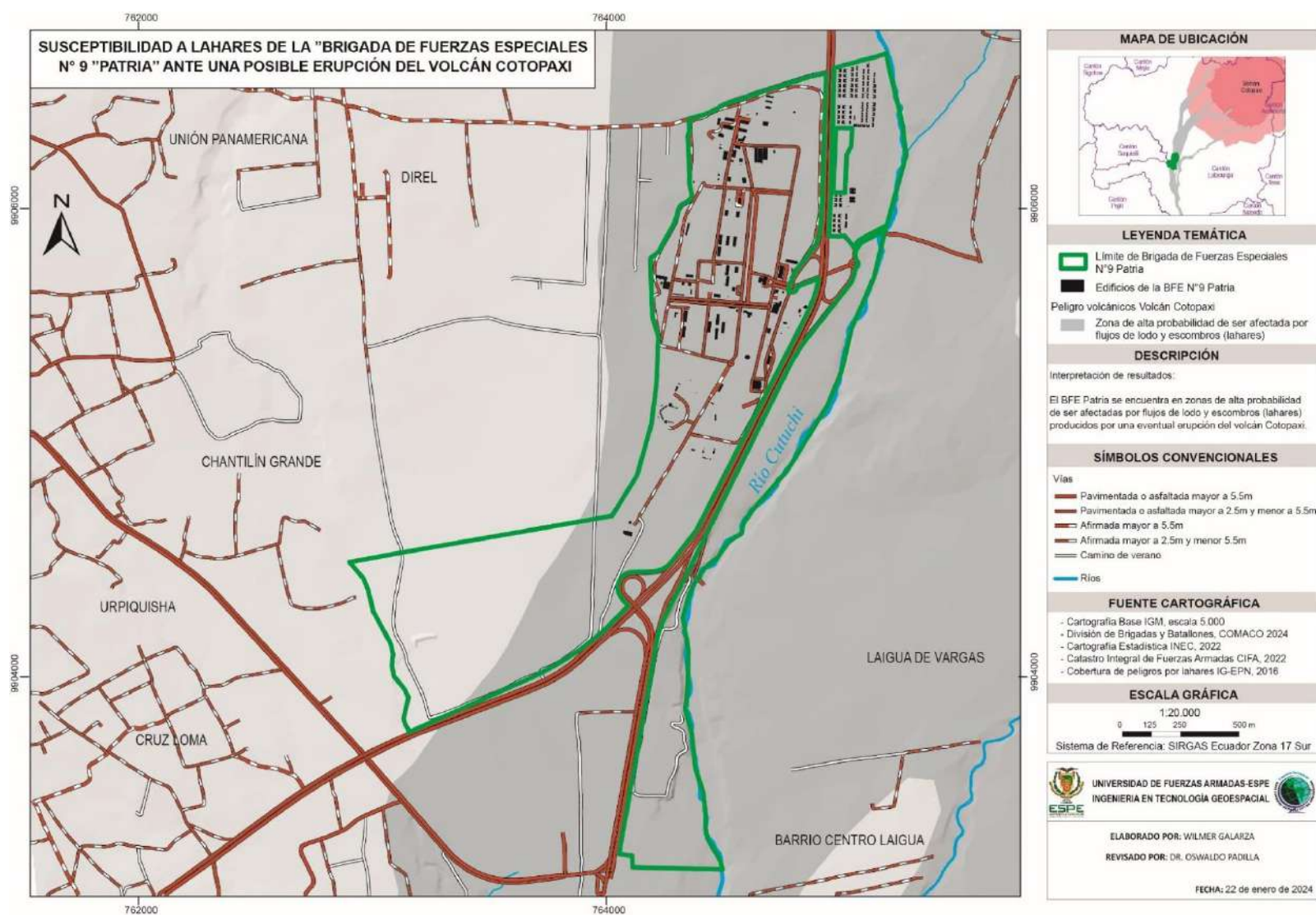


Figura 10 Susceptibilidad a lahares de la “Academia de Guerra” ante una posible erupción del volcán Cotopaxi

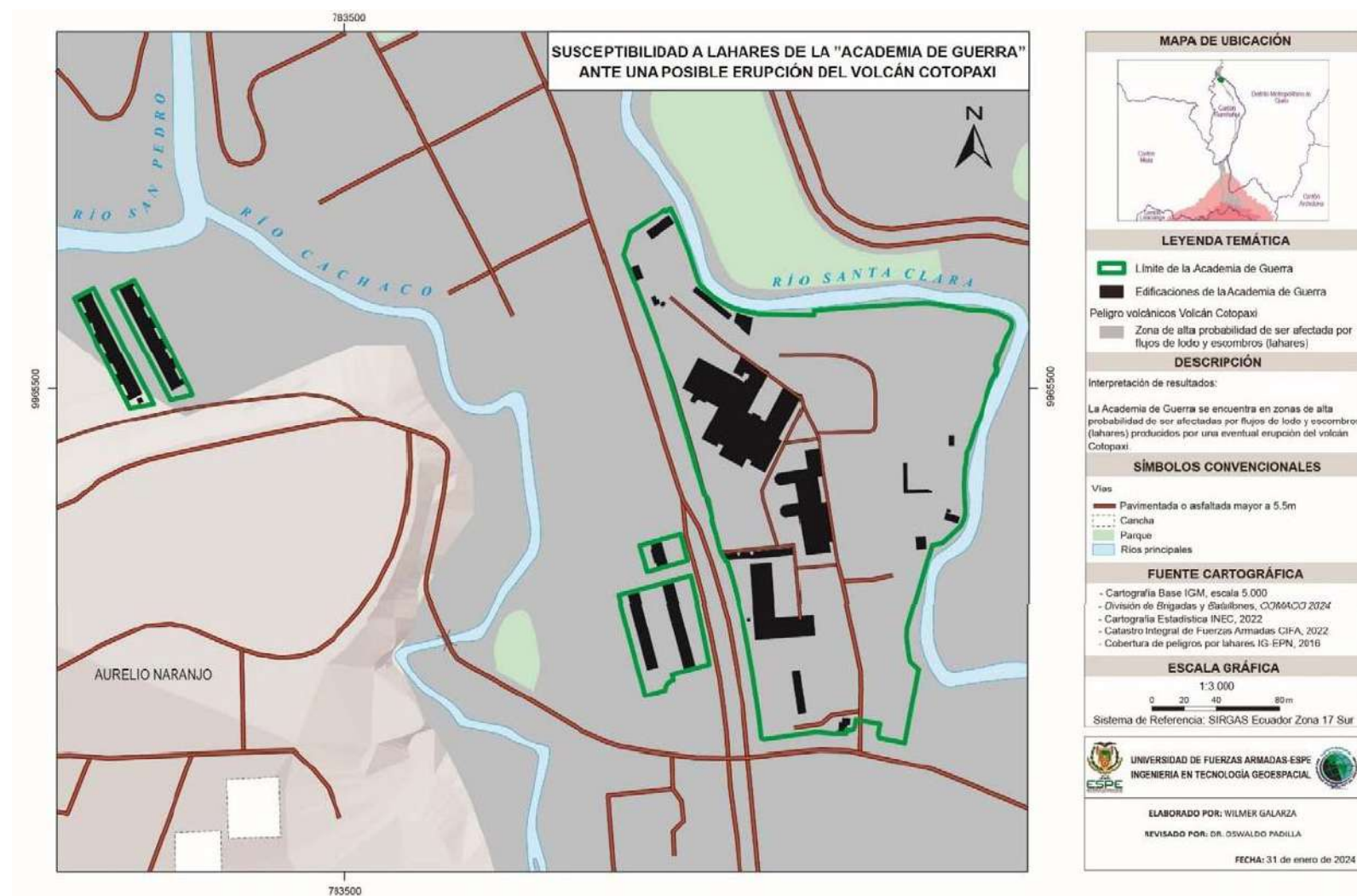
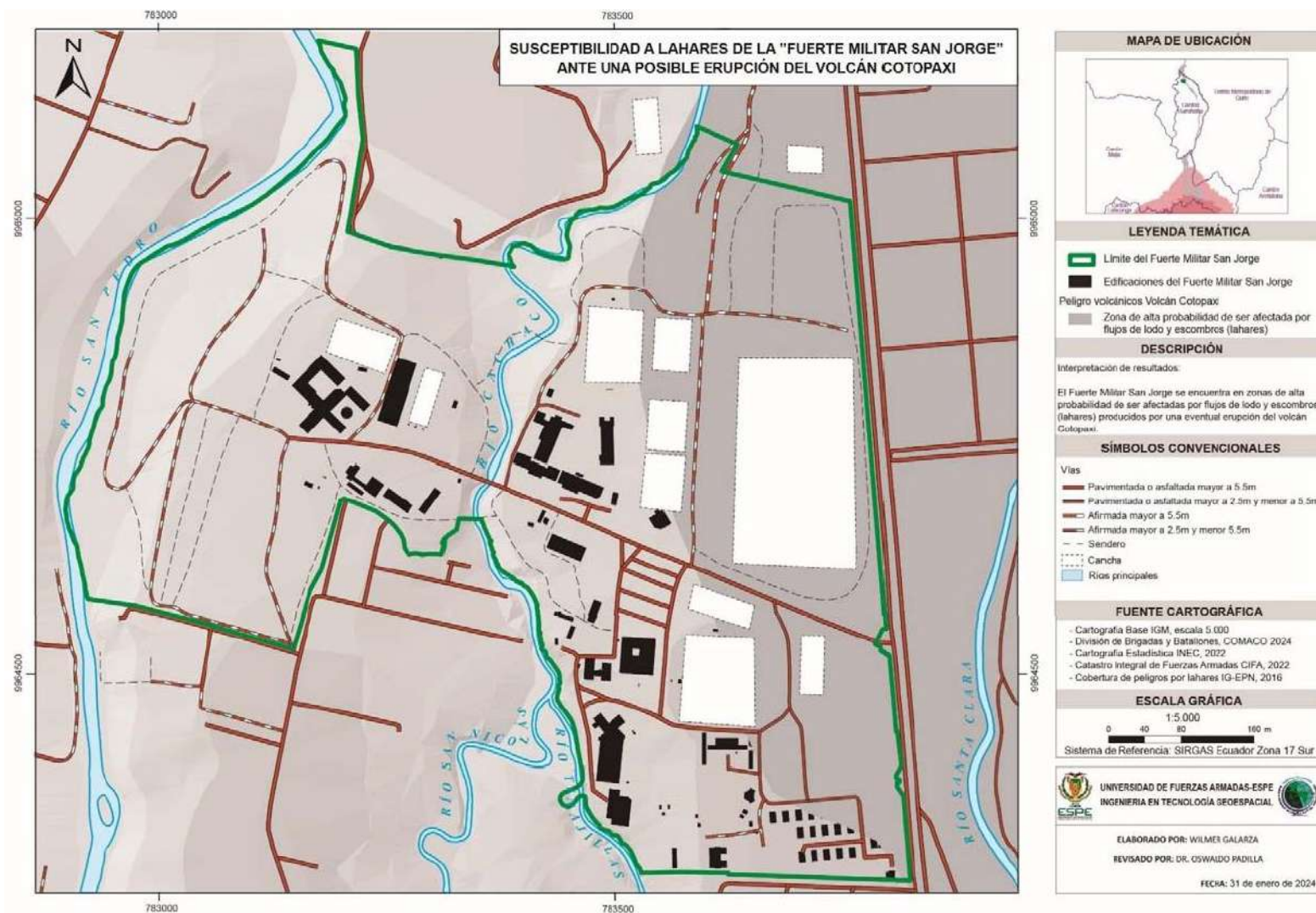


Figura 11 Susceptibilidad a lahares del Fuerte Militar San Jorge ante una posible erupción del volcán Cotopaxi



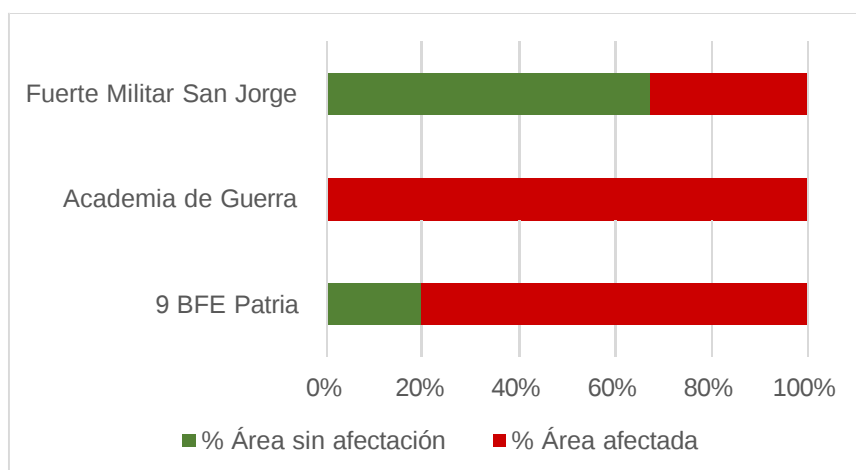
En este marco, se obtuvieron cuatro resultados: el cálculo de la superficie de terreno afectada, el cálculo del número de construcciones afectadas, el cálculo del área construida afectada y un valor aproximado de reposición de las construcciones por unidad militar.

- **Cálculo de superficie de las unidades afectadas**

Se calculó el porcentaje de superficie afectada en las tres unidades por flujos de lodo (lahares), en la figura 7 se observa que la “Academia de Guerra” tiene una afectación del 100% de su predio, es decir que sus 4,89ha están localizadas en estas zonas, por otro lado el Fuerte Militar “San Jorge” tiene una afectación en superficie del 32,8% (15ha de sus 45,74ha están comprometidas), y, finalmente la “Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria” tiene un 82,1% de afectación (196,30ha de 239ha totales).

Figura 12

Unidades Militares según porcentaje de superficie afectada y sin afectación



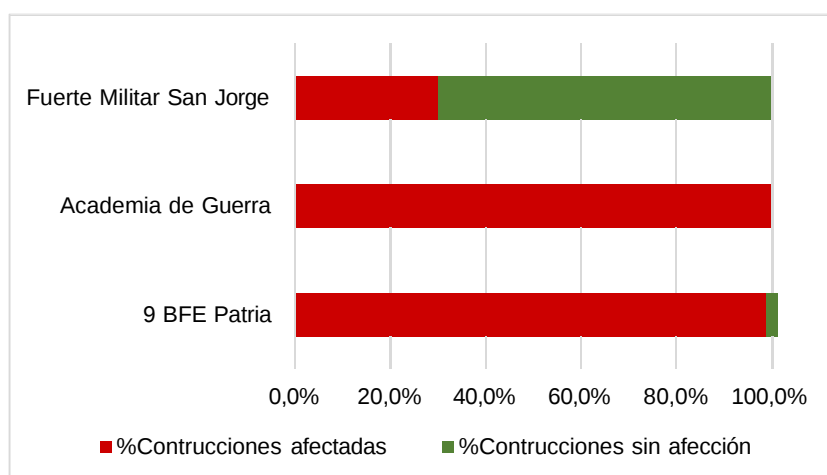
- **Cálculo de número de construcciones afectadas**

Bajo el análisis propuesto, se puede inferir que son susceptibles de sufrir daños considerables ante el impacto directo o indirecto de los lahares: la infraestructura física, que incluye edificios administrativos, residencias militares, áreas de entrenamiento y

depósitos de armamento. Es importante establecer que una posible explosión de edificaciones y la respectiva afectación de las vías de acceso complicarían de manera significativa, las operaciones de evacuación y respuesta en cada una de las unidades militares. En la figura 8 se observa que la “Academia de Guerra” tiene una afectación del 100% de sus construcciones, es decir que sus 62 construcciones están localizadas en estas zonas, por otro lado, el Fuerte Militar “San Jorge” tiene una afectación de 30% (43 de sus 143 construcciones están comprometidas), y, finalmente la “Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria” tiene un 99% de afectación (263 de 267 totales).

Figura 13

Unidad Militar según porcentaje del número de construcciones afectadas y sin afectación



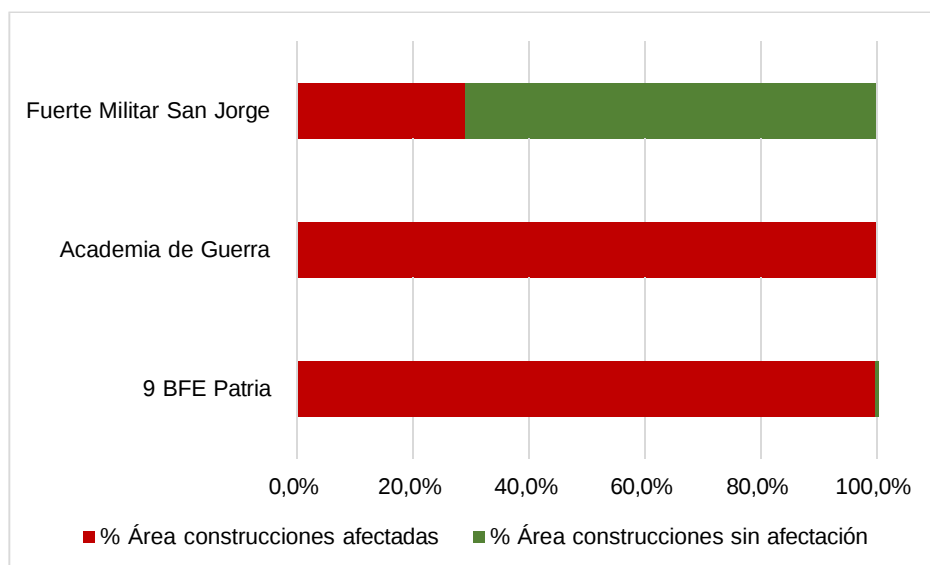
- **Cálculo de área de construcciones afectadas**

En la figura 14 se observa que la “Academia de Guerra” tiene una afectación del 100% del área de sus construcciones, es decir que sus 10.842m² de construcción están localizadas en estas zonas, por otro lado, el Fuerte Militar “San Jorge” tiene una afectación de 29% (8.862m² de sus 30.538m² de construcción están comprometidos), y,

finalmente la Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria” tiene un 99,6% de afectación (56.343m² de 56.557m² totales).

Figura 14

Unidad Militar según porcentaje del área construida afectada y sin afectación



- **Cálculo de costo de reposición de las construcciones afectadas**

En base al trabajo de campo, se obtuvo un valor de USD. 350 a USD. 450 por metro cuadrado de construcción, cabe indicar que este valor es referencial puesto que un análisis de valoración comprende muchos más elementos para definir apropiadamente el costo de reposición de la construcción, sin embargo, se tiene un cálculo aproximado de base que permitirá la toma de decisiones por parte de los comandantes. Con este antecedente, en la tabla 1 se observa el cálculo aproximado de valor de reposición en el caso de pérdida total de las construcciones localizadas en la posible área afectada por flujos de lodo, dando un total de USD. 26.616.572 entre las tres unidades.

Tabla 5

Cálculo aproximado de valor de reposición de las construcciones de las Unidades Militares

Unidad Militar	Valor de reposición aproximado de las construcciones afectadas en dólares
BFE N°9 Patria	19.720.050,00
Academia de Guerra	3.794.822,50
Fuerte Militar San Jorge	3.101.700,00
Total	26.616.572,50

Determinación de la ruta óptima de evacuación en las unidades seleccionadas

Debido a la presencia de un gran número de efectivos militares y personal civil administrativo dentro de las instalaciones, que incrementa la vulnerabilidad, es necesario realizar un análisis de la ruta óptima de una eventual evacuación, determinando las vías de escape, por medio peatonal y vehicular en las tres unidades militares analizadas. A continuación, se describe con mayor detalle los resultados obtenidos según unidad militar.

Los resultados indican el tiempo mínimo necesario para una evacuación del personal por peligro de flujos de lodo (lahares) desde un punto determinado al interior de las Unidades hasta las zonas seguras (calculadas en función de la altura). De esta manera, se proponen dos opciones de salida, considerando que la unidad Militar debe asegurar la disponibilidad de la puerta de salida. En color verde se determinó más óptima considerando el tiempo y las vías.

Ruta óptima de evacuación peatonal y vehicular Brigada de Fuerzas Especiales N°9**“Patria”**

De igual manera se calculó la ruta de evacuación para la Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria”, definiendo que la ruta más próxima a las zonas seguras se localiza hacia el oeste de la Brigada, así mismo, se considera que para el caso de la vivienda fiscal la evacuación vertical es la más óptimo.

Figura 15 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “BFE N°9 Patria” medio de evacuación: vehículo – velocidad: 60km/h

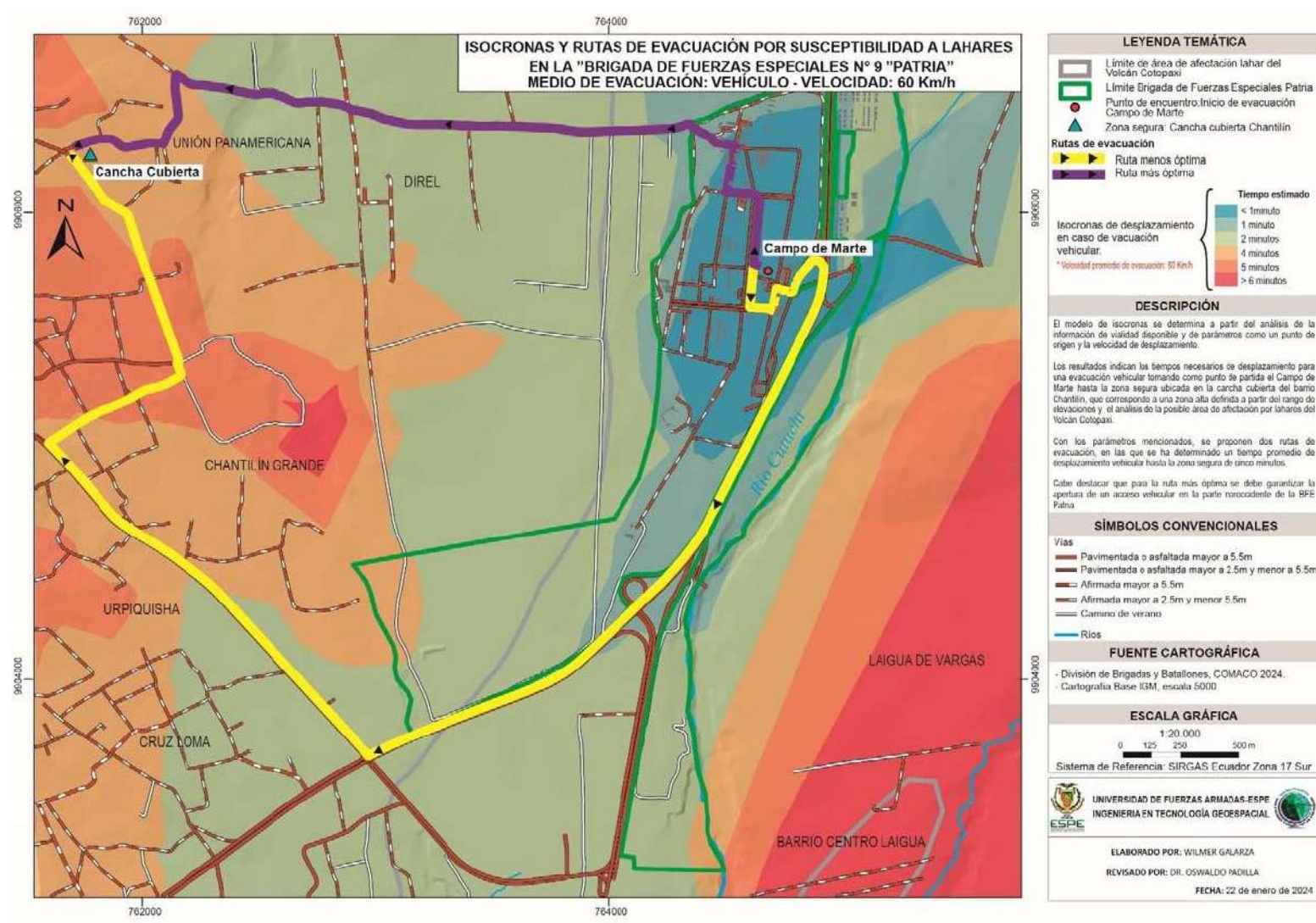
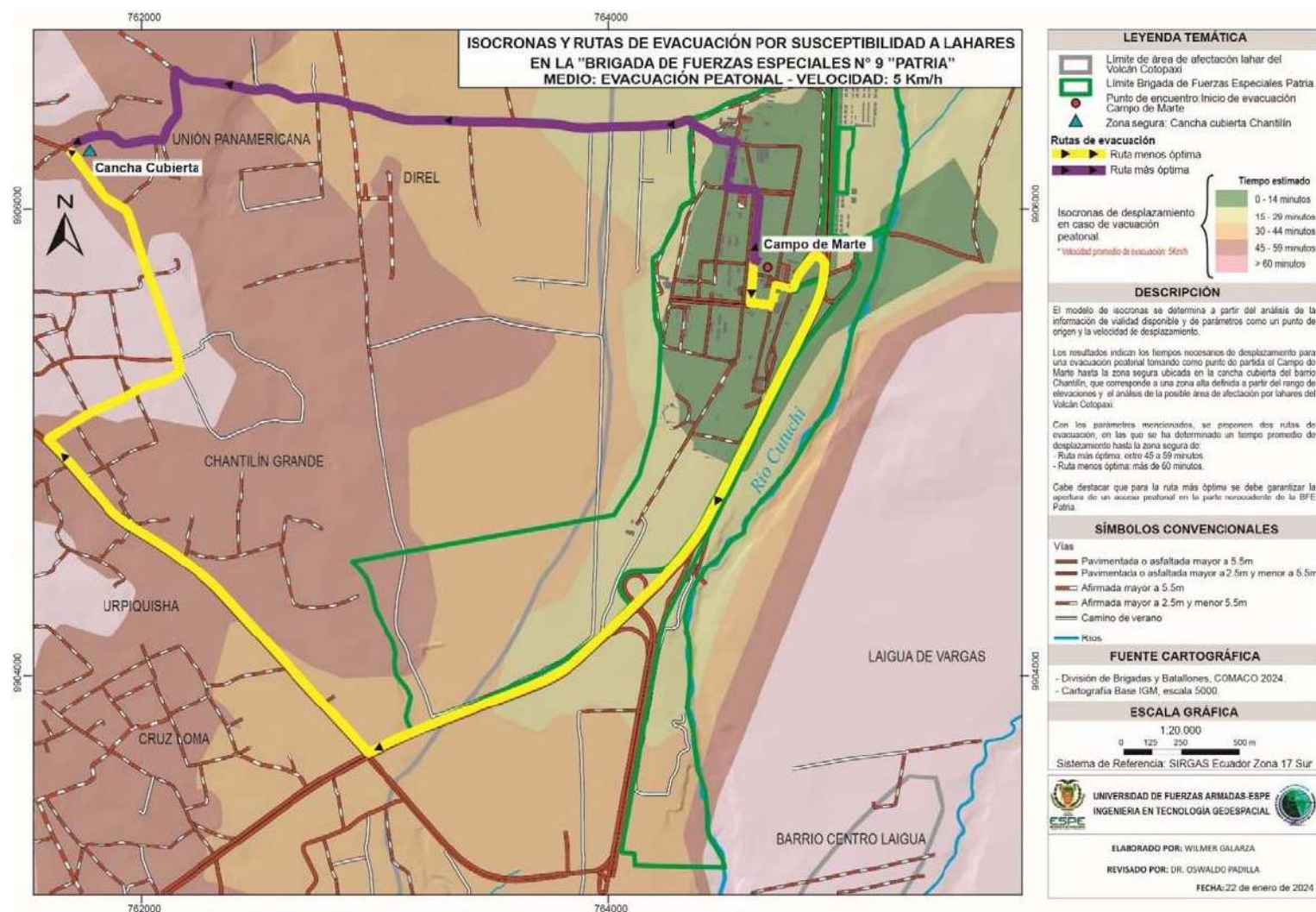


Figura 16 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “BFE N°9 Patria” medio de evacuación: peatonal – velocidad: 60km/h



Ruta óptima de evacuación peatonal y vehicular Academia de Guerra y Fuerte Militar “San Jorge”

Para el caso de la Academia de Guerra y el Fuerte Militar “San Jorge” las rutas óptimas de salida, (sin considerar otros factores como población aledaña entre otros), determinan a FAME como zona segura. Sin embargo, la recomendación es que la evacuación sea vertical, es decir que el personal localice el edificio más alto cercano a su ubicación y en caso de un evento de gran magnitud busque refugio en el último piso.

Figura 17 Isocronas y ruta de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “Academia de Guerra” medio de evacuación: vehículo – velocidad: 30km/h

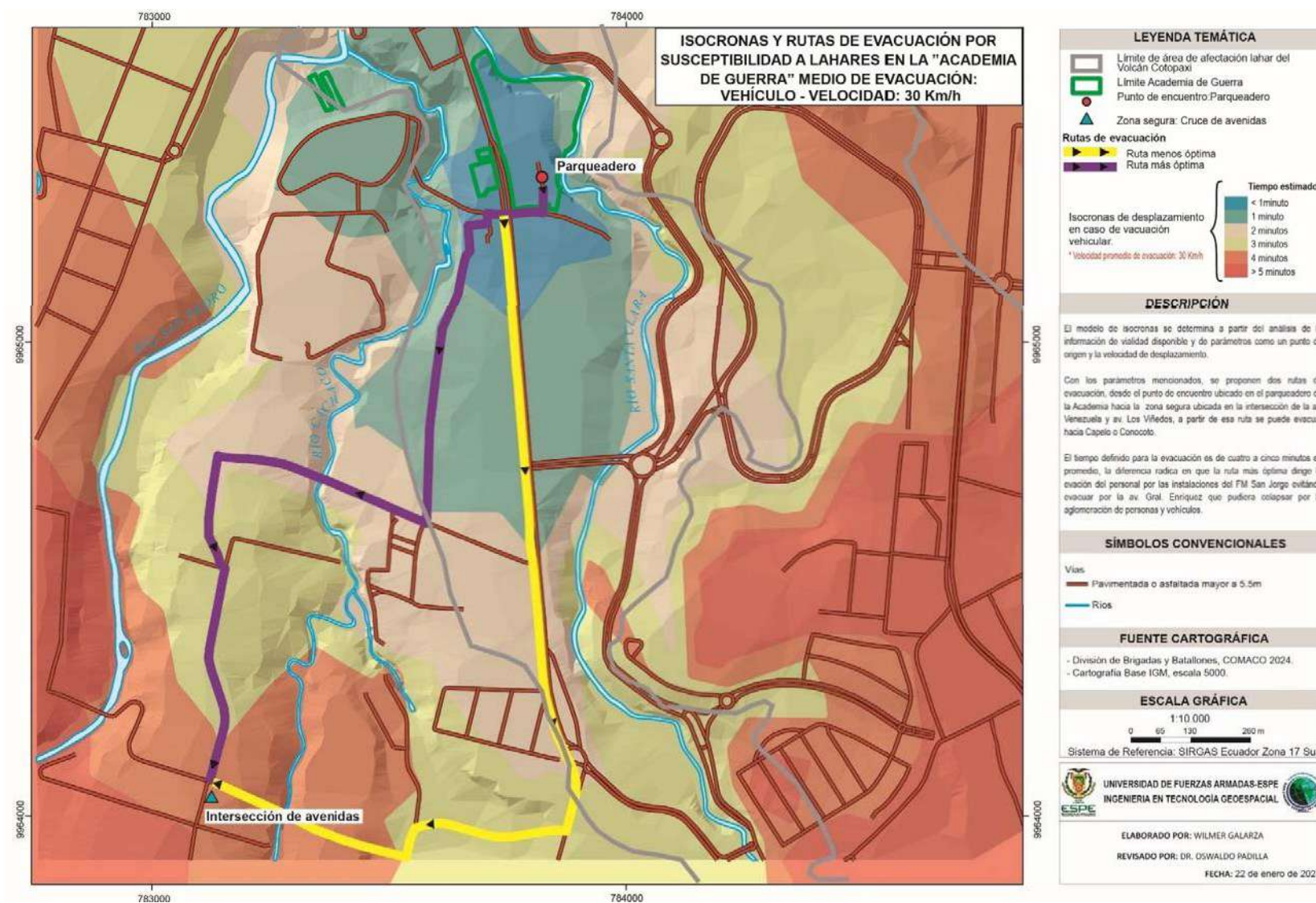


Figura 18 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “Academia de Guerra” medio de evacuación: peatonal – velocidad: 5km/h

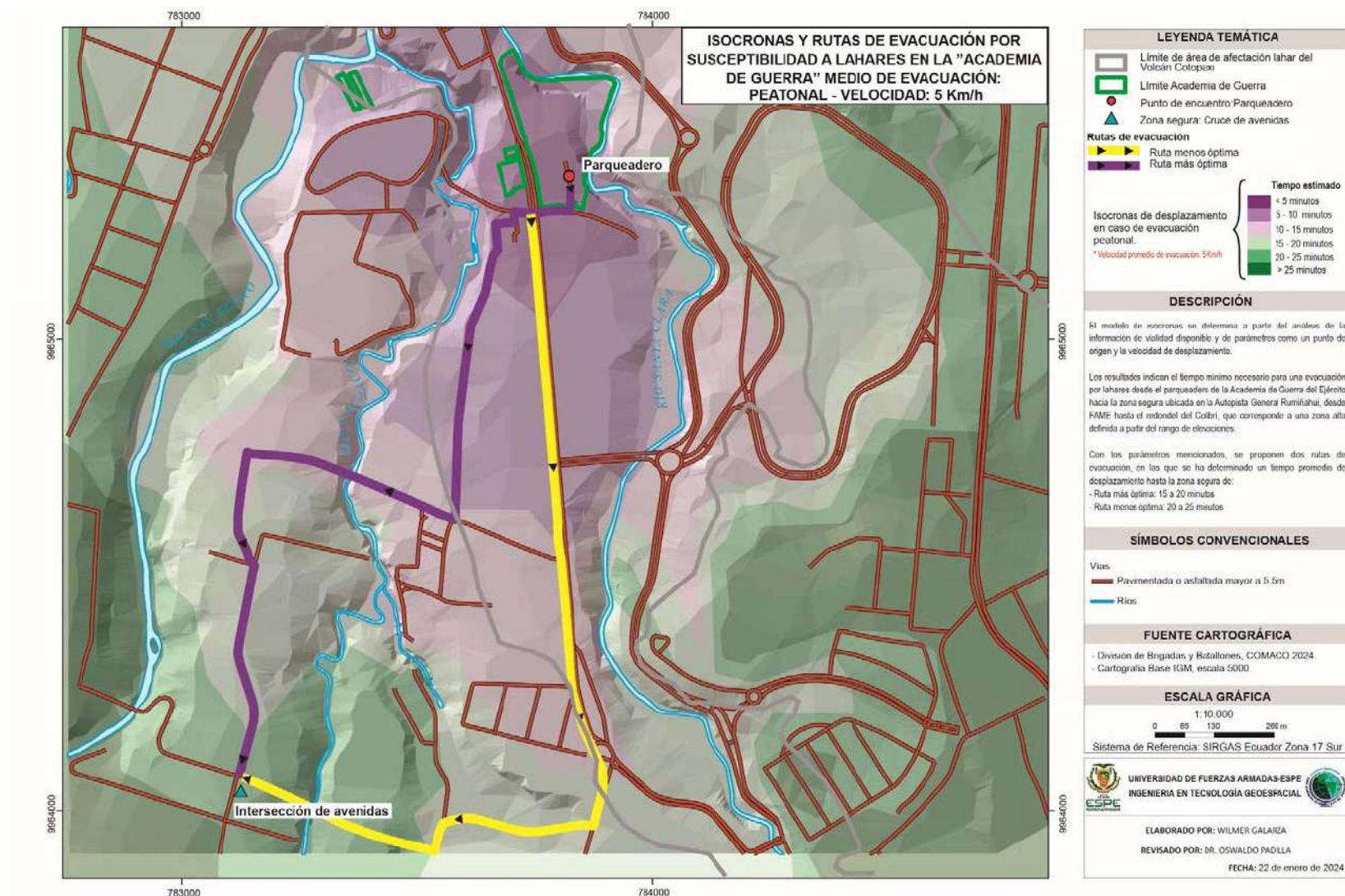


Figura 19 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “Fuerte militar San Jorge” medio de evacuación: vehículo – velocidad: 30km/h

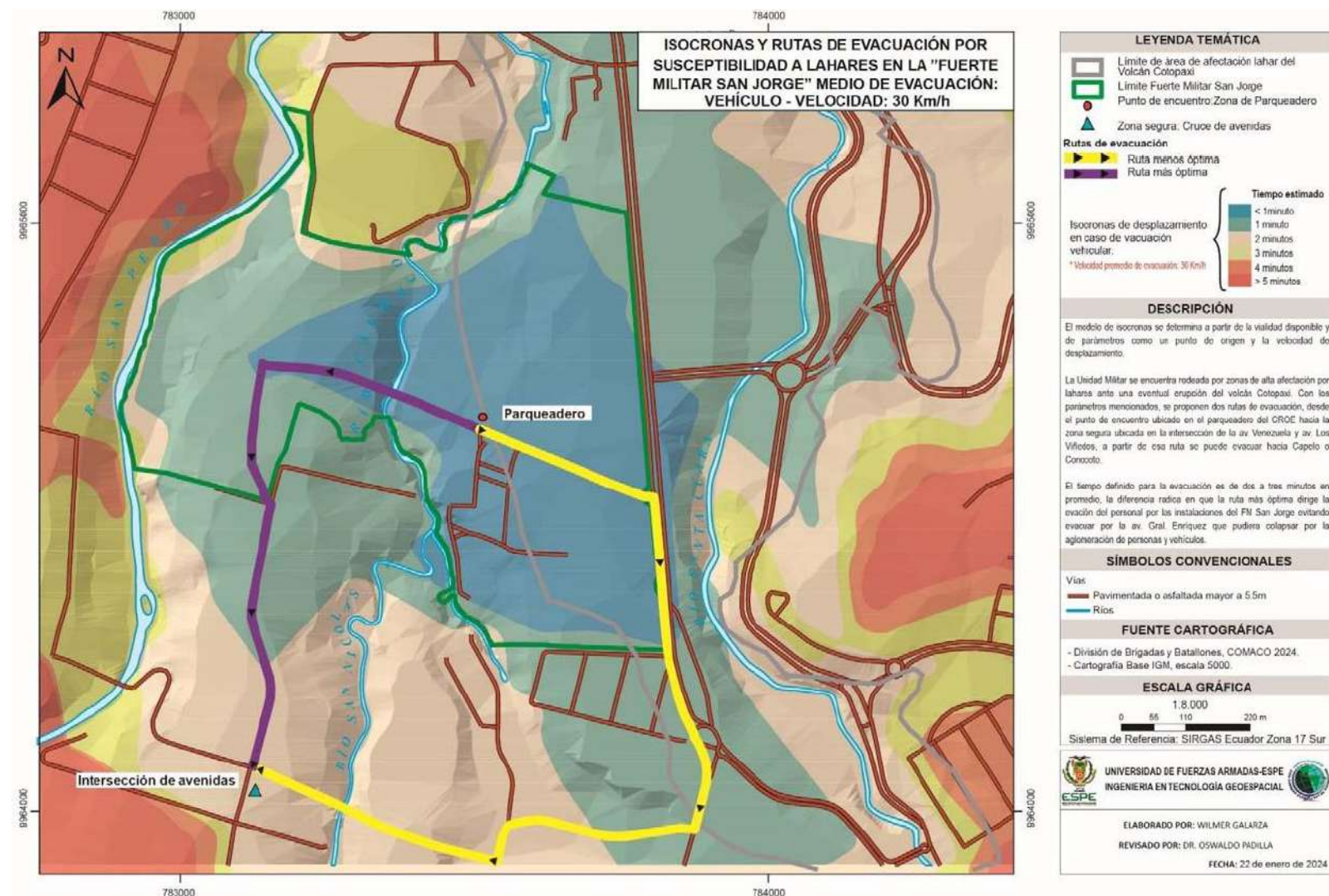
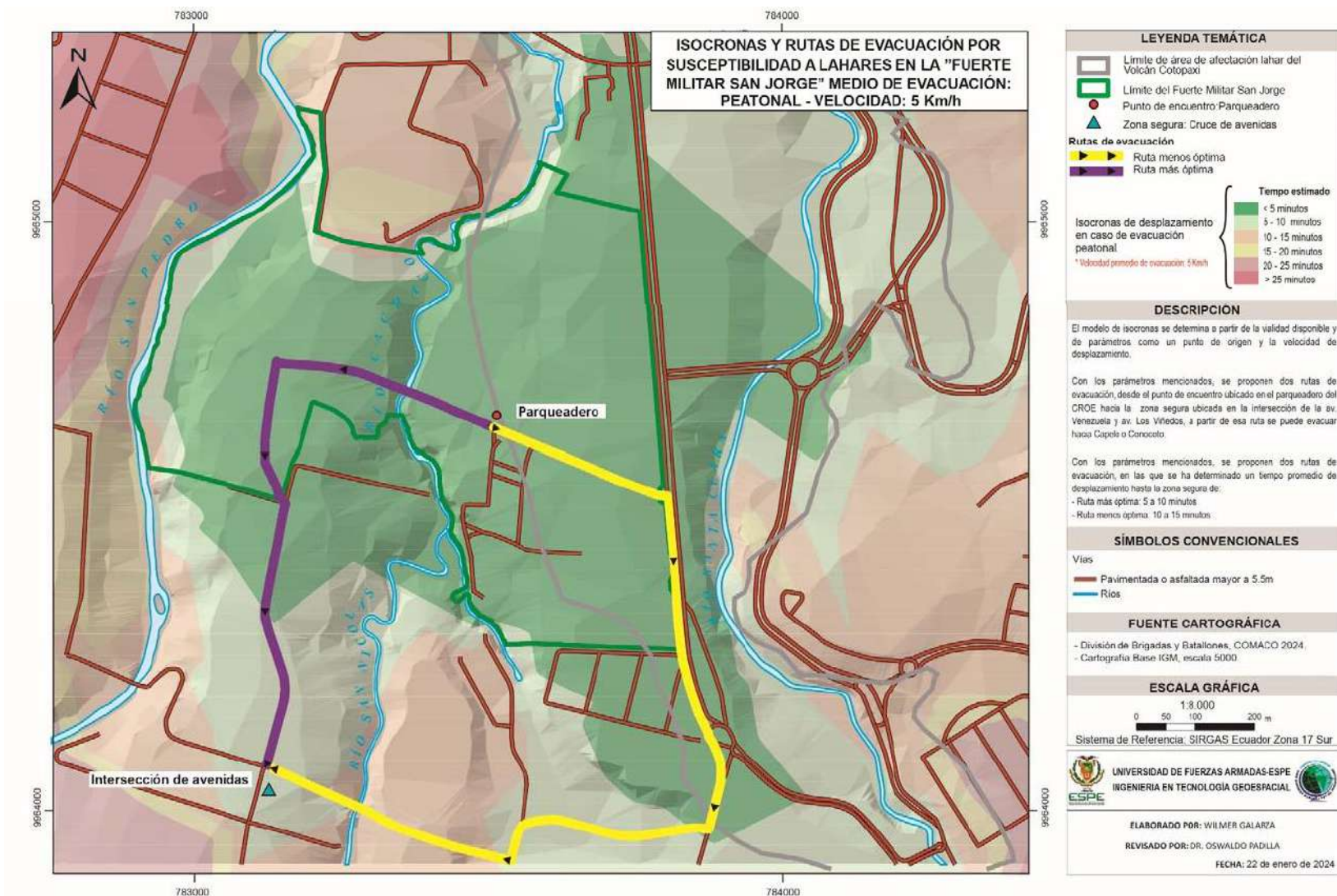


Figura 20 Isocronas y rutas de evacuación por susceptibilidad a lahares en la “Fuerte militar San Jorge” medio de evacuación: peatonal – velocidad: 5km/h



Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones principales

1. Identificación de unidades militares afectadas

Mediante el análisis geoespacial de las variables seleccionadas, así como la determinación de áreas de alta susceptibilidad a la afectación por lahares generados ante una posible erupción del Volcán Cotopaxi, ha permitido identificar que las unidades militares: **Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria”, Academia de Guerra y Fuerte Militar “San Jorge”** están localizadas en una zona de afectación directa. A esta condición se debe sumar la cercanía a elementos hidrográficos de importancia como los ríos Cutuchi, Santa Clara y otros afluentes que aumenta significativamente su exposición a flujos de lodo primarios y secundarios.

2. Grado de afectación territorial

Mediante el respectivo cruce de variables en ambiente SIG, se determinó que el área afectada a nivel de unidad militar varía entre el 32,8% y el 100%, esto depende de la unidad militar analizada, en orden ascendente en lo que se refiere a la **Academia de Guerra** presenta una afectación total del 100% que hace referencia a 4,89 ha, la **Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria”** un 82,1% de su territorio está comprometido es decir 196.30 ha, y finalmente el **Fuerte Militar “San Jorge”** presentan un 32,8% de afectación que corresponde a 15 ha.

3. Infraestructura física comprometida

Del cruzamiento de variables, se estableció que la **Academia de Guerra** presenta el 100% de afectación correspondiente a 62 construcciones potencialmente afectadas, a la **Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria”** le corresponde el 99% de afectación a un total de 263 de 267 edificaciones, y el **Fuerte Militar “San Jorge”** tendrá una

afectación del 30% es decir 43 de 143 construcciones podrían sufrir algún tipo de daño.

En términos generales los porcentajes de afectación en áreas construidas, presentan una la afectación que oscila entre el 29% y 100% según la unidad militar analizada.

4. **Costo estimado de reposición de edificaciones afectadas**

Bajo un análisis de valores referenciales de construcción, se estima que sería necesario **USD 26.616.572** aproximadamente para efectos de reposición de las edificaciones afectadas en las tres unidades militares en su conjunto. Este monto es relativo y podría variar según factores específicos de construcción y localización de la unidad militar.

5. **Análisis de rutas de evacuación**

En función de la determinación de las rutas óptimas de evacuación tanto vehicular como peatonal en cada unidad militar, se puede establecer que en el caso de la **Academia de Guerra** y el **Fuerte Militar “San Jorge”**, la ruta óptima de evacuación recomendada tiene como punto final de encuentro (sitio seguro) la Fábrica de Municiones del Ejército (FAME). Para la **Brigada de Fuerzas Especiales N°9 “Patria”**, la ruta óptima más segura se encuentra hacia el oeste de la brigada. Por las condiciones de infraestructura física que posee (edificios de varios pisos), se considera recomendable la evacuación vertical en zonas donde no sea posible la evacuación horizontal inmediata sea vehicular o peatonal.

Recomendaciones para las unidades militares

Se recomienda lo siguiente:

1. Planificación de emergencia y simulacros

Es importante considerar la implementación de un **Plan de Contingencia y Evacuación** que incluya simulacros periódicos para mejorar la respuesta ante una posible erupción del Volcán Cotopaxi. Estos ejercicios deben involucrar a todo el personal considerando los diferentes escenarios de evacuación, así como las alternativas de vías de evacuación ya identificadas.

2. Infraestructura esencial

Es necesario realizar la evaluación de la posibilidad de reforzar o si es necesario considerar la reubicación definitiva de aquellas infraestructuras esenciales fuera de las zonas de alta exposición a lahares, priorizando la protección de **edificios que alberguen a la mayor cantidad de personas como es el caso de los edificios administrativos y viviendas fiscales así como aquellos que almacenen productos delicados como armamentos o explosivos.**

3. Mejoras en las vías de evacuación identificadas

Es imprescindible identificar claramente la disponibilidad de las rutas de evacuación, realizar los mantenimientos preventivos con el fin de conservarlas en condiciones adecuadas y así facilitar el acceso y salida de las mismas. Esto incluye la eliminación de posibles obstrucciones y la señalización clara de las rutas seguras.

4. Sistemas de alerta temprana

Coordinar con el Instituto Geofísico y otras entidades especializadas con el propósito de fortalecer los mecanismos de monitoreo y alerta temprana, asegurando que la información llegue de manera rápida y eficaz a las unidades militares y de esta manera de activen de forma inmediata los protocolos ya establecidos.

5. Capacitación del personal

Es necesario realizar capacitaciones especializadas constantes destinadas al personal militar y administrativo con el objetivo de que comprenda los riesgos volcánicos a los cuales están expuestos y sepan cómo actuar en caso de emergencia. Esto debe incluir protocolos de evacuación, identificación de rutas de evacuación, puntos de encuentro, así como considerar la posibilidad de una evacuación en refugios verticales previamente identificados.

6. Gestiones interinstitucionales

Se podría establecer la necesidad de la suscripción de convenios con instituciones locales y nacionales para coordinar acciones de evacuación y asistencia en caso de emergencia. La cooperación con el COE nacional y provincial es clave para una respuesta efectiva e inmediata.

7. Análisis continuo de riesgos

Es fundamental mantener actualizado el análisis de vulnerabilidad de las unidades militares, esto mediante revisiones periódicas de mapas de peligros volcánicos y la incorporación de nueva información geoespacial y topográfica que pueda ayudar a la toma de decisiones de manera oportuna por parte de las autoridades.

El impacto de una posible erupción del Volcán Cotopaxi, podrá reducirse en las unidades militares, mediante la implementación de las medidas antes descritas, salvaguardando la integridad tanto del personal como de los recursos físicos y estratégicos de cada unidad militar.

Referencias

- Aguilera, E., & Toulkeridis, T. (2005). *El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha* (Coordinación General y Administración: Fundación para el Desarrollo Socioambiental FOES (ed.); Primera, Issue June). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2355.8806>
- Alexander, D. (1993). *Natural Disasters*. Springer.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2024). Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres. *Registro Oficial Suplemento 488*, 1–48.
- Bi, H., & Gelenbe, E. (2019). *Emergency Management Systems and Algorithms: a Comprehensive Survey*. 1–33. <http://arxiv.org/abs/1907.04136>
- Calvo Rey, M. M. (2022). Spatial Information Applied in Disasters Risk Management. *Revista Geografica de Chile Terra Australis*, 58(2), 63–77.
<https://doi.org/10.23854/07199562.202258esp.Calvo63>
- Carreton, A. (2022). Los Sistemas de Información Geográfica Los Sistemas de Información Geográfica. *Patrimonio Inteligente*, 789–804.
- Goodchild, M. F. (2006). *GIS and disasters: Planning for catastrophe*. *Computers, Environment and Urban Systems*.
- Hagenlocher, M., Lang, S., Tiede, D. (2013). *Evaluating the disaster resilience of communities through remote sensing and GIS*. *Natural Hazards*.
- Hall, M. L., Mothes, P. A. (2008). *The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador*. *Bulletin of Volcanology*. 70(6), 675–702.
- IDAE, & IGME. (2008). Manual de Geotermia. In *3C Tecnología_Glosas de innovación aplicadas a la pyme* (Vol. 4, Issue 3). http://www.igme.es/Geotermia/FicherosPDF/Manual_Geotermia_2,5.pdf

Instituto Geofísico. (2024). *Cotopaxi*. <https://www.igepn.edu.ec/cotopaxi>

Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (n.d.). *Crónicas de la erupción del volcán Cotopaxi 2015*. 2015. Retrieved January 10, 2025, from <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1376-cronicas-de-la-erupcion-del-volcan-cotopaxi-2015>

Instituto Nacional de Prevención Sísmica INPRES. (n.d.). *Tipos de erupciones volcánicas*. Retrieved January 28, 2025, from <https://www.argentina.gob.ar/inpres/docentes-y-alumnos/volcanes/tipos-de-erupciones-volcanicas>

Klepak, H. (2018). *La gestión de riesgos y los Ejércitos nacionales: una mirada comparada a la experiencia latinoamericana*. 1–27. <http://www.unisdr.org/fi>

Myers, B., Brantley, S. R., Stauffer, P., & Hendley II, J. W. (2000). ¿Cuáles son las amenazas o peligros volcánicos? *U.S. Geological Survey Fact Sheet, 144*, 1–2. <http://pubs.usgs.gov/fs/fs144-00/fs144-00.pdf>

Organización Panamericana de la Salud. (n.d.). *Erupciones Volcánicas*. Retrieved January 20, 2025, from <https://www.paho.org/es/temas/erupciones-volcanicas>

Padiilla Almeida, O. (2017). *Cálculo de los tiempos de evacuación horizontal y vertical en caso de una eventual erupción del volcán Cotopaxi.pdf* [Universidad de Alcalá]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=252509>

Paz y Miño, E. (2024). *Sismos, volcanes, inundaciones: estos son los riesgos en Ecuador*. <https://gk.city/2024/01/05/riesgos-en-ecuador-sismos-volcanes-inundaciones-explicacion-prevencion/>

Salazar, D., & Ercole, R. D. (2009). *IFEA Percepción del riesgo asociado al volcán*. 38(3), 849–871.

Secretaría Ejecutiva de la Coordinación Nacional para la Reducción de Desastres SECONRED.

(2012). *La vulnerabilidad asociada a los desastres un Marco Conceptual para Guatemala* (p. 30). Dirección de Gestión Integral de Riesgos de la SE-CONRED.

https://conred.gob.gt/documentos/MARCO_CONCEPTUAL_DELAS_VULNERABILIDADE S.pdf

Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (219 C.E.). *Lineamientos para incluir la gestión del riesgo de desastres* (p. 80). <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/10/Lineamientos-para-incluir-la-gestión-del-riesgo-de-desastres-en-el-Plan-de-Desarrollo-y-Ordenamiento-Territorial-PDOT.pdf>

United, N., & Regional, N. (2009). *Uso de la Información Geoespacial en la Prevención de Riesgos*.

World Bank Group. (2024). *Climate Change Knowledge Portal*.

<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/ecuador/vulnerability>

Yepes, H., Laurence, A., Alvarado, A., Beauval, C., Aguiar, J., & Yvonne, F. (216 C.E.). Una nueva visión para la geodinámica del Ecuador: Implicaciones en la definición de fuentes sismogénicas y la evaluación del peligro sísmico. *Tectonics*, 1249–1279.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015TC003941>