

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Estimación del índice de peligrosidad de los volcanes potencialmente activos del
Ecuador.

INGE-2435

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Geología

Presentado por:

Valeria Paulette Vaca Molina

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi familia,
especialmente a mi mamá, papá y hermana,
quienes son mis modelos para seguir y
siempre me han dan ánimo y motivación.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mi familia, amigos y profesores.

A mi familia que todos los días me enseña y fortalece. Me inspiran con su perseverancia, amabilidad y amor. Mi papá y mamá que siempre me recalcaron el valor de mi educación y crecimiento. Mi hermana mayor, Toyita, con quien he crecido y siempre he admirado.

A mi tutor, el PhD. Maurizio Mulas, por ser un excelente mentor, guiarme y darme oportunidades de aprender.

A mis amigos, los que están cerca y lejos, que no se han cansado de escuchar mis chistes malos y anécdotas repetidas. A Vicky por acompañarme a los mercaditos, su apoyo y tiempo para tomarnos un tecito.

También a mis mascotas, aunque no entiendan que hago todo el tiempo en la computadora, aprecio su presencia.

Declaración Expresa

Yo Valeria Paulette Vaca Molina acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 4 de septiembre del 2024



Valeria Paulette Vaca Molina

Evaluadores



Firmado electrónicamente por:
JOSELYNE BARBARA
SOLORZANO CHAUCA

**Mgtr. Joselyne Bárbara Solórzano
Chauca**
Profesor de Materia



Firmado electrónicamente por:
MAURIZIO MULAS .

PhD. Maurizio Mulas
Tutor de proyecto

Resumen

El Ecuador cuenta con 35 volcanes potencialmente activos, los cuales representan una amenaza para la población. Con este trabajo se busca elaborar una base de datos de los parámetros de amenaza volcánica actual mediante la recopilación de información científica para el análisis preliminar del Índice de peligrosidad de los volcanes (IPV) potencialmente activos del Ecuador. El proyecto presentó 5 fases: 1) Selección de volcanes potencialmente activos, 2) Comparación de metodologías de caracterización de amenaza, 3) Búsqueda de información científica, 4) Estimación del IPV preliminar, y 5) Planificación de actividades. El cálculo del IPV permitió realizar una clasificación inicial de peligrosidad volcánica de 5 categorías: muy bajo, relativamente bajo, moderado, relativamente alto y muy alto. Los volcanes Cotopaxi, Tungurahua, Reventador y Guagua Pichincha se encuentran en la categoría muy alto. Se analizaron las características principales de cada categoría y los limitantes. Además, se establecieron propuestas de futuras actividades de campo y laboratorio como tefroestratigrafía y teledetección para fortalecer la información actual de vulcanología. En conclusión, la amenaza volcánica es medida a través del IPV preliminar y se establecen categorías de peligrosidad. Los volcanes de la misma categoría de peligrosidad pueden ser de distintos ambientes de formación y tipologías. Por lo tanto, volcanes con mismo valor de IPV pueden ser localizados en sectores diferentes de Ecuador.

Palabras Clave: Peligrosidad volcánica, mitigación, parámetros, caracterización.

Abstract

There are 35 potentially active volcanoes in Ecuador, which threaten the population. The project seeks to develop a database of current volcanic hazard parameters by collecting scientific information for the preliminary analysis of a Volcanic Hazard Index (VHI) of potentially active volcanoes in Ecuador. The project has 5 phases: 1) Selection of potentially active volcanoes, 2) Comparison between hazard characterization methodologies, 3) Scientific information research, 4) Preliminary VHI estimation, and 5) Activity planning. The VHI estimation allowed for an initial classification of volcanic hazard into 5 categories: very low, relatively low, moderate, relatively high, and very high. Cotopaxi, Tungurahua, Reventador and Guagua Pichincha volcanoes are in the very high category. The main characteristics of each category and the limitations were analyzed. In addition, proposals for future field and laboratory activities such as tephrostratigraphy and remote sensing were established to strengthen current volcanology information. In conclusion, the volcanic hazard is characterized through a preliminary VHI, and a classification of threat levels is established. Volcanoes of the same threat category can have different settings and typologies. Therefore, volcanoes are not geographically located according to VHI.

Keywords: Volcanic hazard, mitigation, parameters, characterization.

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	V
Simbología	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	VIII
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	4
1.3 Justificación del problema.....	7
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo general.....	8
1.4.2 Objetivos específicos	8
Capítulo 2.....	9
2.1 Marco teórico	10
2.1.1 Trabajos previos.....	10
2.1.2 Marco legal	12
2.1.3 Marco geológico	13
2.1.3.1 Tectónica.	13
2.1.3.2 Geomorfología.....	17
2.1.4 Parámetros de amenaza volcánica.	19
2.2 Área de estudio – volcanes seleccionados	20
Capítulo 3.....	22
3.1. Selección de metodología.	23
3.2. Materiales.....	24

3.3. Metodología	24
Capítulo 4.....	29
4. Resultados y análisis	30
4.1 Parámetros de peligrosidad volcánica.....	30
4.2 IPV preliminar	31
4.3 Tabla de futuras actividades.....	39
Capítulo 5.....	46
5.1 Conclusiones y recomendaciones	47
5.1.1 Conclusiones	47
5.1.2 Recomendaciones	48
Referencias.....	50
Apéndice A.....	72

Abreviaturas

a.C. antes de Cristo

AHP Proceso analítico jerárquico

ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CMF Conceptual Multi-hazard Framewok

d.C. después de Cristo

DInSAR Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar

EIRD Estrategia Internacional de Reducción de Desastres

GIS Geographic Information Systems

GVP Global Volcanism Program

IG-EPN Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional

IGM Instituto Geográfico Militar

INAA Análisis por activación neutrónica

INEC Instituto Nacional de Estadística y Censos

IPV Índice de Peligrosidad Volcánica

LA ICPMS Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo mediante ablación laser

LiDAR Light Detection and Ranging

NMS Espectrometría de masas de nucleidos

NOAA Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica

ODS Objetivos del Desarrollo Sostenible

ONU Organización de las Naciones Unidas

SEM Microscopía electrónica de barrido

SIMS Espectrometría de masas de iones secundarios

SN ICPMS Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo mediante nebulización de solución

SNGR Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos

SWIR Short-Wave Infrared Satellite Imagery

TIMS-TEA Espectrometría de masas por ionización termal y análisis de elementos traza

TIR Thermal Infrared Sensor

UNDRR United Nations Office for Disaster Risk Reduction

VEI Volcanic Explosivity Index

VNIR Visible and near-infrared

Simbología

°C	Grados centígrados
cm/año	Centímetros al año
km	Kilometro
km ²	Kilómetros cúbicos
km/h	Kilómetros por hora
m	Metro
ML	Magnitud local
msnm	Metros sobre nivel del mar

Índice de figuras

Figura 1. <i>Mitigación de riesgo volcánico</i>	3
Figura 2. <i>Esquema de problemática, consecuencias y pregunta de investigación</i>	5
Figura 3. <i>Volcanes según su actividad: a) Ecuador continental; b) Islas Galápagos</i>	6
Figura 4. <i>Formación de la cordillera de los Andes</i>	15
Figura 5. <i>Formación de la Provincia Volcánica de las Islas Galápagos</i>	16
Figura 6. <i>Ejemplos de tipos de volcanes</i>	18
Figura 7. <i>Volcanes seleccionados según su actividad</i>	21
Figura 8. <i>Fases de metodología</i>	25
Figura 9. <i>Bibliografía utilizada</i>	27
Figura 10. <i>Simplificación de matriz de parámetros de amenaza volcánica calificados</i>	28
Figura 11. <i>IPV preliminar</i>	37

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Estudios anteriormente realizados</i>	10
Tabla 2. <i>Tipologías de volcanes</i>	17
Tabla 3. <i>Productos volcánicos y sus efectos</i>	20
Tabla 4. <i>Matriz de decisiones</i>	23
Tabla 5. <i>Materiales</i>	24
Tabla 6. <i>Parámetros de amenaza volcánica</i>	26
Tabla 7. <i>Parámetros de peligrosidad volcánica de diferentes contribuciones</i>	30
Tabla 8. <i>Redes de monitoreo volcánico del Ecuador</i>	32
Tabla 9. <i>Matriz resumida de parámetros de peligrosidad volcánica</i>	33
Tabla 10. <i>Peligrosidad preliminar por categoría</i>	34
Tabla 11. <i>Fuentes de información según clase de peligrosidad</i>	38
Tabla 12. <i>Parámetros no encontrados durante búsqueda bibliografía</i>	40
Tabla 13. <i>Actividades propuestas</i>	41
Tabla 14. <i>Métodos para caracterizar cryptotephras</i>	44

Capítulo 1

1.1 Introducción

Alrededor de 800 millones de personas en el mundo viven a 100 km de un volcán potencialmente activo. Y en el caso de Ecuador, el 50% de la población se encuentra en la misma condición (Loughlin et al., 2015). Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) hasta el 2010 al menos el 35% de la población vivía en zonas susceptibles a erupciones volcánicas (INEC, 2010).

Las erupciones volcánicas corresponden a peligros o amenazas de tipo geológico. El término amenazas o peligro se refiere a fenómenos o procesos que pueden ocasionar efectos negativos a la salud, bienes, sociedad, economía y ambiente (INEE, 2010; UNDRR, 1991). Los componentes de riesgo por Fournier D'albe (1979) son definidos como vulnerabilidad, valor y amenaza. Desde el 1991, según la Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de Riesgo de Desastres (UNDRR), el riesgo se compone de vulnerabilidad, exposición y amenaza, en ocasiones incluyendo resiliencia. Para categorizar el riesgo se han elaborado metodologías basados en sus componentes, como los rankings elaborados por Ewert (2007) y Nieto-Torres et al. (2021).

El Ecuador cuenta con más de 77 centros volcánicos cuaternarios en el arco volcánico de los Andes y 21 volcanes Plio-Cuaternarios en las islas Galápagos, de los cuales al menos 28 se encuentran activos desde el Holoceno (Anzieta et al., 2021; Bernard et al., 2022; Ramón et al., 2021). Acorde a Hidalgo et al. (2024), en Ecuador actualmente hay 35 volcanes entre potencialmente activos, activos y en erupción.

Según el Global Volcanism Program (GVP) del Instituto Smithsonian (2024), desde el año 8300 a. C se han producido mínimo 319 erupciones volcánicas en Ecuador. Desde el año 1500 d.C., con un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) mayor o igual a 3, se produjeron 49 erupciones en el continente y 7 en las islas Galápagos (Global Volcanism Program, 2024).

Las erupciones volcánicas representan una amenaza para la población, infraestructura, sectores productivos y al medio ambiente. Por ejemplo, la erupción volcánica de 1640 del volcán Tungurahua resulto en 5000 fallecidos (Loughlin et al., 2015).

El principio de la mitigación de riesgo volcánico es la investigación de los volcanes (Figura 1). La identificación de los volcanes de mayor amenaza es útil para enfocar la atención de los científicos y entes encargados de seguridad (Tilling, 1989).

Figura 1. Mitigación de riesgo volcánico



Nota. Modificado de Tilling (1989).

Aunque las erupciones volcánicas representen una amenaza, la información disponible y el conocimiento actual de la población es escaso. La accesibilidad a información académica y técnica es limitada, la difusión de información por los medios de comunicación carece de bases científicas y el currículo escolar no incluye formación acerca de amenazas volcánicas (Anzieta et al., 2021). Según Wachinger et al. (2013) el conocimiento, experiencia, valores, actitudes y

emociones del individuo pueden influir en su percepción ante el riesgo y sus subsecuentes medidas de adaptación y mitigación. El rol del conocimiento acerca de amenazas naturales es un factor considerado para el análisis de la percepción del riesgo (Bird et al., 2010; Botzen et al., 2009; Plattner et al., 2006).

El análisis de amenaza volcánica ha sido realizado en otros países como base para su gestión de riesgos. Por ejemplo, la Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile desde el 2018 creó un ranking de riesgo de los volcanes activos, el cual actualizan cada 3 años para informar a la comunidad y examinar su contexto volcánico (Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, 2023). Un análisis similar fue realizado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres en México (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2018).

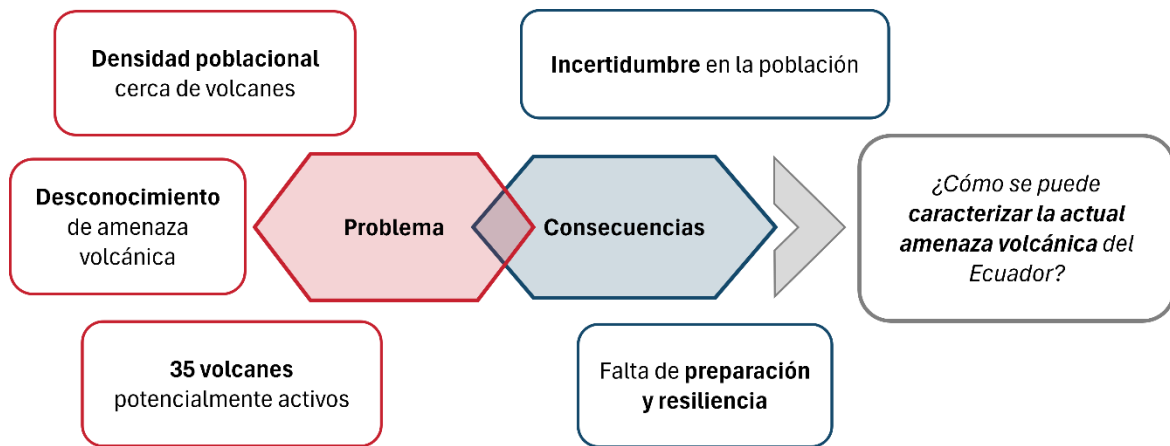
El presente proyecto se planteó debido a la cercanía de la población a los volcanes y el conocimiento actual de la amenaza volcánica e importancia para la percepción del riesgo. El proyecto busca la generación de información acerca de la amenaza volcánica a través de un análisis preliminar del Índice de Peligrosidad Volcánica (IPV) de los volcanes potencialmente activos. El IPV es un indicador de la magnitud de la amenaza volcánica considerando parámetros como su VEI o actividad actual. El IPV puede ser utilizado como herramienta para la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR) en la toma de decisiones y asignación de recursos, así como incentivar la investigación de los volcanes con escasa información disponible.

1.2 Descripción del problema

El conocimiento de las amenazas volcánicas, frecuencia, magnitud e historia eruptiva es escaso a nivel mundial. Se estima que solamente se conoce el 40% de las erupciones explosivas desde 1500 a 1900 y el 15% de grandes erupciones explosivas del Holoceno previas al 1 a. C. (Brown et al., 2014; Deligne et al., 2010; Furlan, 2010).

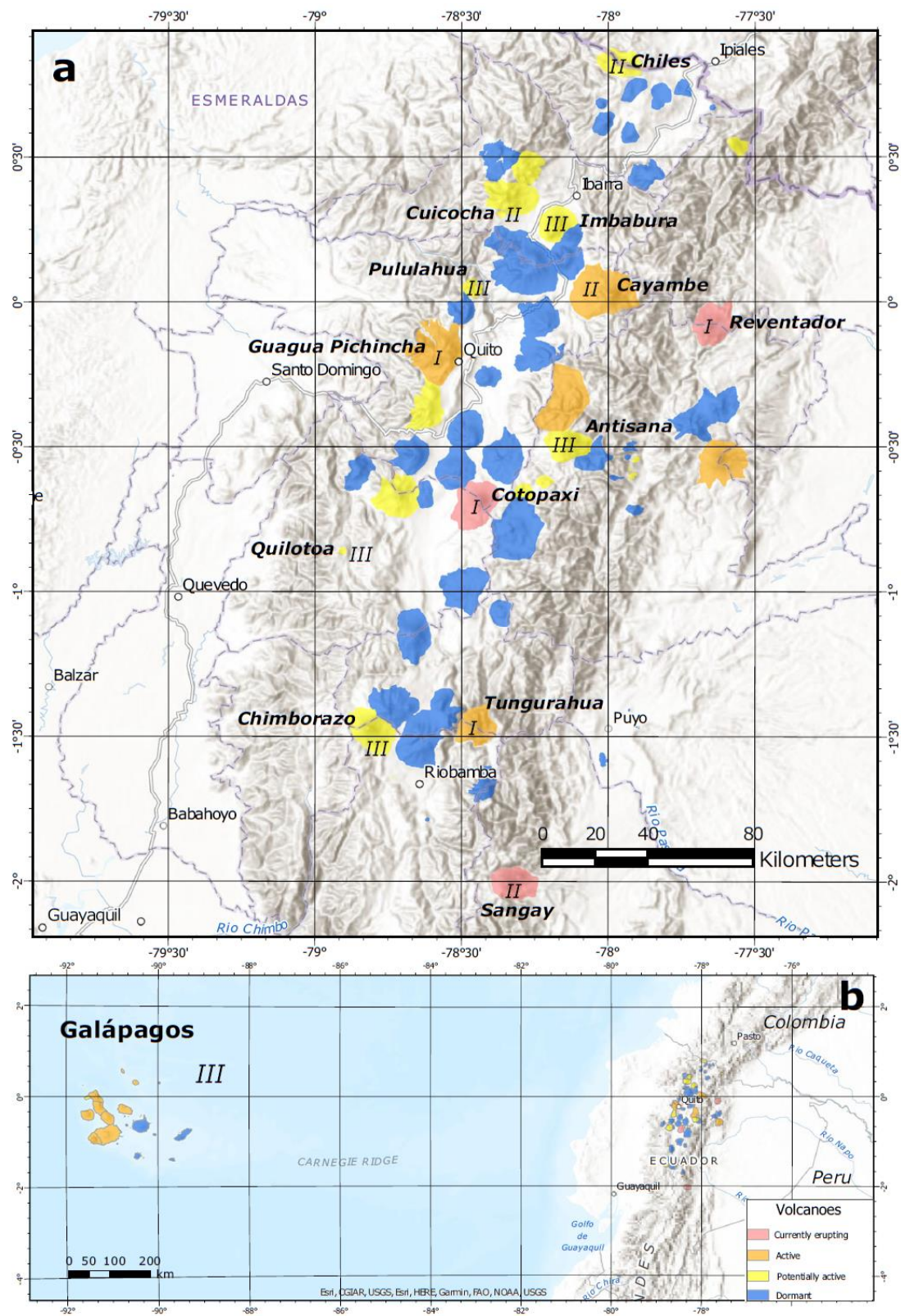
En el Ecuador se presenta un desconocimiento de la amenaza volcánica pese a que existen al menos 35 volcanes potencialmente activos (Hidalgo et al., 2024). Grandes asentamientos humanos se encuentran cerca de volcanes, por ejemplo, en Pichincha, la segunda provincia más poblada del Ecuador (INEC, 2023) se encuentran los volcanes Guagua Pichincha, Pululahua, Iliniza, Antisana, Cayambe y Atacazo-Ninahuilca. El desconocimiento de la amenaza volcánica se ve reflejado en la incertidumbre de la población y la falta de preparación y resiliencia de las comunidades afectadas (Figura 2).

Figura 2. Esquema de problemática, consecuencias y pregunta de investigación



La SNGR es el ente en el Ecuador encargado de las acciones de preparación, respuesta, mitigación y resiliencia ante desastres naturales y antrópicos. La SNGR requiere de una completa evaluación de la amenaza volcánica para la priorización de sus esfuerzos.

Figura 3. Volcanes según su actividad: a) Ecuador continental; b) Islas Galápagos



Nota. Tomado de Hidalgo et al. (2024).

1.3 Justificación del problema

La gestión de riesgos y el monitoreo volcánico son campos nuevos en el Ecuador. El Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) fue instaurada el 1983 para el monitoreo de los volcanes (Hidalgo et al., 2024; Ramón et al., 2021) y juntos a la SNGR, instaurada el 2009 (Gobierno del Ecuador, 2009), es la institución encargada del estudio de las amenazas. Por lo tanto, la preparación ante amenazas volcánicas es una iniciativa reciente y con potencial para mejora. Por ejemplo, de los 99 volcanes del Ecuador (Bernard et al., 2018), se cuenta con:

- 13 mapas de amenaza (p. ej. Mothes y Hall (1991); Hall y Beate (1988); Ruíz et al. (2005)).
- 14 estaciones de monitoreo desde 1988 (Ramón et al., 2021).

La generación y avance de información científica de vulcanología es importante para formar la resiliencia de la comunidad. Los estudios básicos de vulcanología son la base de la mitigación del riesgo (Tilling, 1989).

Las erupciones volcánicas pueden afectar a la población, sus recursos, infraestructura esencial y servicios básicos. Acorde al Instituto Geográfico Militar (IGM) (2018) utilizando la delimitación de los 13 mapas de amenaza volcánica, el área de afectación, en acuerdo a los datos del censo poblacional del 2010 (INEC, 2010), alcanza al 39% de la población, afecta infraestructura de salud, educación energética y vial del 22-28% y a megaproyectos (hidrocarburos, minería, energía y multipropósito) un 27%.

También, el desconocimiento de la amenaza volcánica influye en la gestión de riesgos mediante la priorización de esfuerzos, toma de decisiones, asignación de recursos, capacidad de respuesta y resiliencia y planificación territorial. Por ende, la SNGR, solicito un estudio de caracterización de la amenaza de los volcanes potencialmente activos, como herramienta para la planificación, prevención y mitigación del riesgo volcánico.

Además, el proyecto se alinea a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Asamblea General de las Naciones Unidas (2015) específicamente los objetivos 4, 11, 15 y 17. El Objetivo 4: Educación de calidad, se relaciona al proyecto porque la educación es un componente importante para la resiliencia de una comunidad y mitigación del riesgo. El Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles: se relaciona porque la planificación territorial o crecimiento de una comunidad sostenible toma en cuenta los peligros naturales. El Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres, se relaciona porque las erupciones volcánicas también pueden ocasionar efectos negativos en el medio ambiente. El Objetivo 17: Alianzas para lograr objetivos, se relaciona al proyecto porque se requiere de la colaboración de la academia, sociedad, gobierno e incluso organismos internacionales para priorizar el manejo de la amenaza volcánica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Elaborar una base de datos de los parámetros de amenaza volcánica actual mediante la recopilación de información científica para el análisis preliminar del Índice de peligrosidad de los volcanes potencialmente activos del Ecuador.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Comparar metodologías de índice de peligrosidad volcánica para la selección de parámetros de peligrosidad volcánica.
2. Caracterizar los volcanes potencialmente activos del Ecuador mediante análisis de la información disponible.
3. Planificar las futuras actividades en campo y laboratorio para la recolección de información faltante.

Capítulo 2

2.1 Marco teórico

2.1.1 Trabajos previos

El análisis de amenaza y riesgo volcánico se ha llevado a cabo por varios gobiernos y como iniciativas de investigación. Los estudios suelen variar en los parámetros elegidos ya que se prioriza en función de los objetivos del autor. En la Tabla 1 se muestran ejemplos de estudios similares. Por ejemplo, el Ranking de riesgo específico de Chile, enfoca sus parámetros de exposición en la infraestructura susceptible, incluyendo infraestructura aérea, energética, de transporte y telecomunicaciones. Mientras que, en la contribución de Guimarães et al. (2021) se incluye la resiliencia del país, considerando su capacidad de respuesta y manejo de eventos pasados.

Tabla 1. Estudios anteriormente realizados

Tipo de contribución	Autor	Fecha	Locación	Producto
Ponencia en Cities on Volcanoes 2024	Benjamín Bernard, Marco Córdova, Marjorie Encalada, Silvana Hidalgo, Patricio Ramón, Edwin Telenchana	2024	Ecuador	“IG-EPN's efforts to help prepare Ecuadorian society for volcanic events”: Resume los estudios en vulcanología, observatorios, protocolos de comunicación y programas de concientización para la preparación ante eventos volcánicos.
Documento oficial del gobierno	Gobierno de Chile - Servicio Nacional de Geología y Minería	2023	Chile	Ranking de riesgo específico de volcanes activos de Chile: Análisis de riesgos utilizando 13 factores relacionados con peligro volcánico y 12 relacionados a exposición de la población.
Ponencia en IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos	Gobierno de Perú - Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico	2023	Argentina, Chile, Bolivia y Perú	Mapa regional y ranking de riesgos volcánicos de la zona volcánica central de los Andes: Compararon distintos enfoques para determinar riesgo volcánico como mapeo regional, clasificación de riesgo

					considerando peligro y exposición y ranking de riesgo volcánicos considerando amenaza, exposición y vulnerabilidad.
Artículo científico	Amiel Nieto-Torres, Leticia Freitas Guimarães, Costanza Bonadonna, Corine Frischknecht	2021	América Latina		“A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 2: Application to Latin America”: Realizan un Ranking de Riesgo Volcánico de los volcanes de Latinoamérica utilizando dos ecuaciones que combinan parámetros de amenaza, exposición, vulnerabilidad y resiliencia
Documento oficial del gobierno	Gobierno de México-Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres	2018	México		Realizaron una reevaluación del Riesgo relativo utilizando un coeficiente de riesgo volcánico, parámetros de riesgo (frecuencia eruptiva, productos volcánicos, VEI) y un Índice de exposición poblacional.
Poster para Cities on Volcanoes 2018	Santiago Santamaria, Benjamin Bernard	2018	Ecuador		“Hierarchization of the volcanoes of continental and insular Ecuador based on their threat potential”: Definen tres categorías para los volcanes ecuatorianos según su índice de amenaza.
Artículo científico	John W. Ewert	2007	Estados Unidos		“System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes”: Se presenta una clasificación de 169 volcanes en los Estados Unidos y la Commonwealth de las Islas Marianas del Norte (volcanes de Estados Unidos) en función de 15 factores de peligro y 9 de exposición.

Nota. Obtenido de Bernard et al. (2024), Centro Nacional de Prevención de Desastres (2018), Ewert (2007), Guimarães et al. (2021), Maio et al. (2022), Santamaría y Bernard (2018), Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (2023).

2.1.2 *Marco legal*

El manejo de riesgo de desastres se refiere al análisis y evaluación integral de las amenazas a las que está expuesta una comunidad y su capacidad de resiliencia, para la generación de medidas de prevención, mitigación y respuesta (Sandoval et al., 2023). La disciplina del manejo de riesgos se vio reflejada en la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (EIRD) implementada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 1999. La EIRD establece enfoques para incentivar la aplicación del Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015 (Agrawal, 2018; Miguélez, 2012).

En el presente proyecto se considera la normativa internacional y nacional para la gestión de riesgo. En la normativa internacional se considera el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, sucesor del Marco de Hyogo. Para la normativa nacional, se considera el Plan Específico de Gestión de Riesgos 2019-2030.

El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres fue formulado en la tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas en el 2015. El objetivo principal del Marco de Sendai es la orientación de la gestión de riesgos de amenazas, mediante la prevención, reducción de exposición y vulnerabilidad y preparación para la respuesta y recuperación. Los principales actores son los estados o gobiernos centrales, autoridades, sociedad civil y la academia.

El Marco de Sendai presenta las siguientes prioridades (UNISDR, 2015):

- Prioridad 1: Comprender el riesgo de desastres.
- Prioridad 2: Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo.
- Prioridad 3: Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia.
- Prioridad 4: Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.

El Plan Específico de Gestión de Riesgos fue establecido por la Dirección General de la SNGRE para el periodo de 2019-2030 y plantea 7 objetivos alineados a (SNGR, 2015):

- Mejora del conocimiento del riesgo de desastres y acceso a información pública.
- Fortalecimiento de la gobernanza de los actores del SNGRE y sociedad civil.
- Implementación de estrategias de reducción de riesgos y adaptación al cambio climático.
- Incremento de preparación para la respuesta y recuperación temprana durante emergencias.
- Implementación de políticas públicas para la recuperación después del desastre.
- Implementación de políticas públicas para la transferencia del riesgo a nivel público y privado.
- Gestión de cooperación internacional para la gestión de riesgos.

2.1.3 Marco geológico

2.1.3.1 Tectónica.

El Ecuador tiene cuatro regiones: Costa, Sierra, Amazonia e Insular. La Costa se formó con la acreción de bloques/terrazas de corteza oceánica generando fallas y cuencas entre las cuales la mega-falla transversal dextral Dolores-Guayaquil que delimita el Bloque Norandino desde el Golfo de Guayaquil hasta Venezuela (Bulois et al., 2023). Las acreciones se dieron en dos eventos colisionales durante el Santoniano-Campaniano temprano al Campiano-Maastrichtiano y durante el Paleoceno tardío o Eoceno al Eoceno tardío-Oligoceno (Kerr et al., 2002; Spikings et al., 2005). Algunos modelos ponen en duda si fueron dos eventos de colisión (Jaillard et al., 1995) o uno (Vallejo et al., 2019).

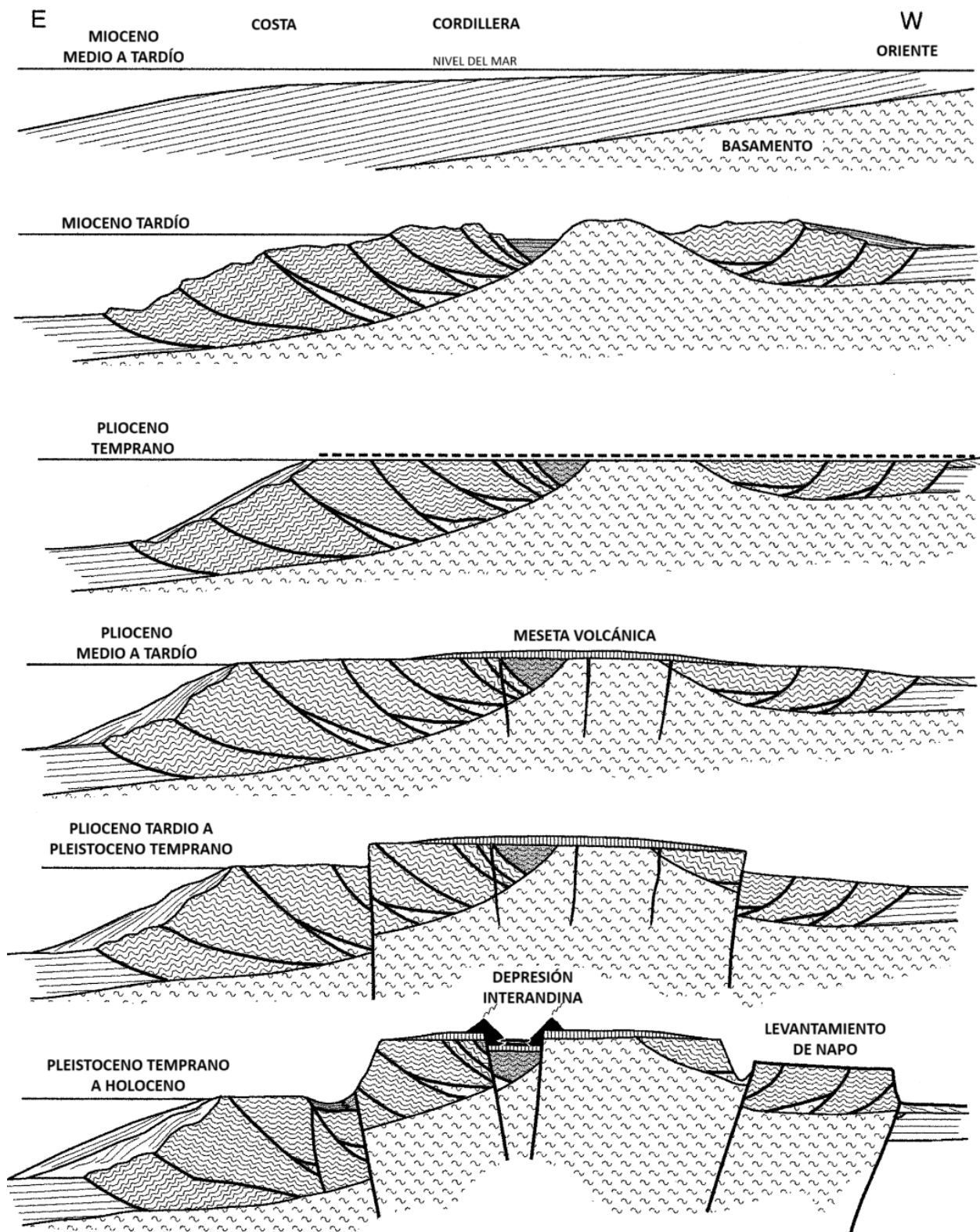
El proceso de acreción de los bloques ha sido debatido por varios autores, con respecto a su velocidad, dirección de rotación y datación (Aizprua et al., 2022; Alemán et al., 2021; Siravo et al., 2021)

La Sierra se caracteriza por la cordillera de los Andes y el Valle Interandino. La Cordillera de los Andes es una cadena montañosa de 650 km de largo y 150 km de ancho conformada por la Cordillera Occidental y Cordillera Oriental que llegan a los 3500 a 4000 m.s.n.m. y se encuentran volcanes de hasta 6000 m. de elevación (Hall et al., 2008). El Valle Interandino es una depresión topográfica en medio de las dos cordilleras y se encuentra delimitada por la falla Pallatanga y el sistema de fallas Peltectec (Coltorti y Ollier, 2000; Tibaldi y Ferrari, 1992).

La formación de la cordillera de los Andes norte (Ecuador y Perú) resulta de la interacción entre las placas Nazca, Sudamericana y del Caribe, donde la placa Nazca se desplaza hacia el este a 6 cm/año por debajo de la placa Sudamericana (Siravo et al., 2021). El levantamiento de la cordillera comenzó en el Mioceno Superior (Figura 4), seguido de una fase de sedimentación en el Plioceno temprano. Después la formación de una meseta volcánica, principalmente la construcción de estratovolcanes, y fallamiento normal del Plioceno medio hasta el Pleistoceno temprano. Desde el Pleistoceno temprano al Holoceno se forma el Valle Interandino y el levantamiento de Napo (Coltorti y Ollier, 2000).

En resumen, la tectónica continental del Ecuador se caracteriza por una cuenca de antearco (Costa), arco volcánico (cordillera de los Andes y Valle Interandino) y cuenca de tras arco (zona subandina o Amazonía) (Jaillard, 2022). El volcanismo continental del Ecuador se debe a la subducción oblicua de la placa Nazca con la Placa Sudamericana (Hall et al., 2008; Le Pennec et al., 2011; Santamaria et al., 2023).

Figura 4. Formación de la cordillera de los Andes

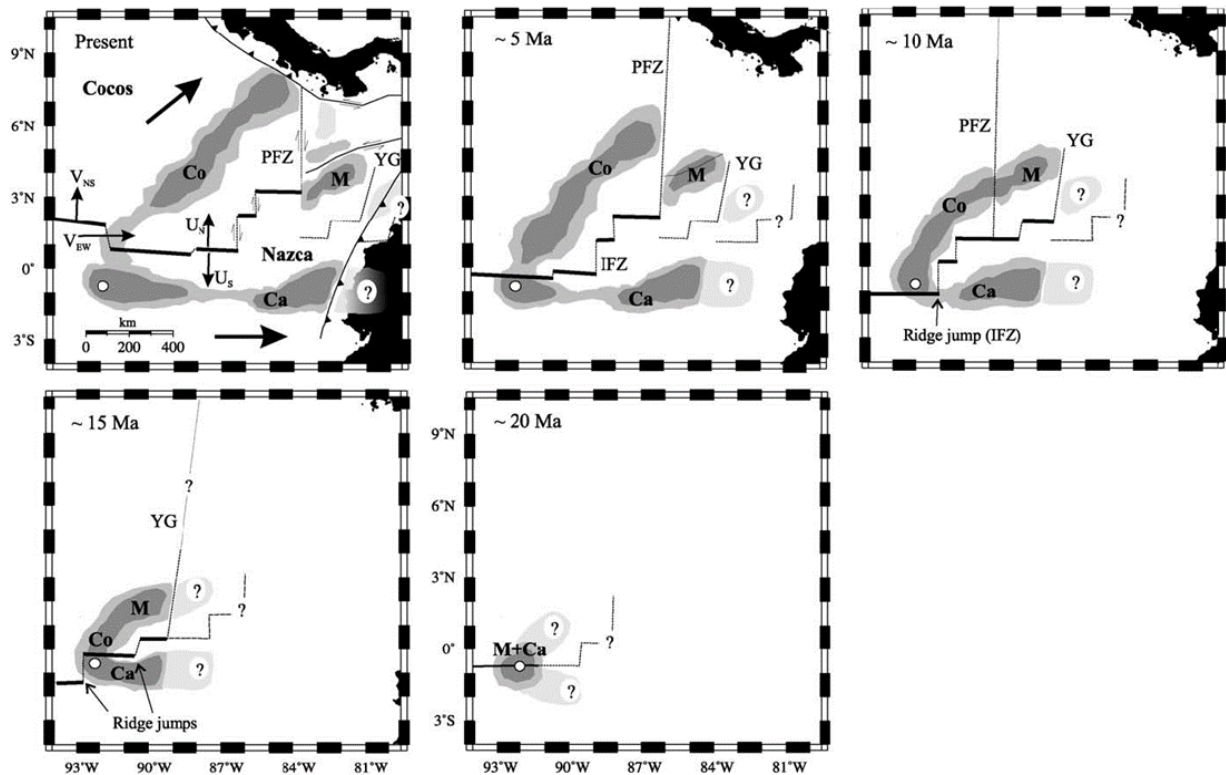


Nota. Modificado de Coltorti y Ollier (2000)

Por otro lado, a 1000 km de la costa ecuatoriana se encuentran las Islas Galápagos las cuales fueron formadas a través de un punto caliente hace aproximadamente 20 millones de años (Figura 5). El punto caliente de las Islas Galápagos se mantiene estacionario mientras que la placa Nazca se desplaza hacia el este. Las cordilleras submarinas Carnegie, Cocos y Malpelo son remanentes del movimiento de las placas tectónicas (Sallarès y Charvis, 2003).

El movimiento de la placa Nazca resulta en la formación de varias islas volcánicas, donde las más jóvenes y activas son las que se encuentran al oeste, cerca del punto caliente y las más antiguas y extintas al este (Harpp y Geist, 2021; Munro y Rowland, 1996). Se estima que la Isla Española, Santa Fe, San Cristóbal y Santiago se formaron respectivamente hace 3 millones, 2.7 millones, 2.3 millones y 1.4 millones de años respectivamente (Harpp y Geist, 2021).

Figura 5. *Formación de la Provincia Volcánica de las Islas Galápagos*



Nota. Modificado de Sallarès y Charvis (2003).

2.1.3.2 Geomorfología.

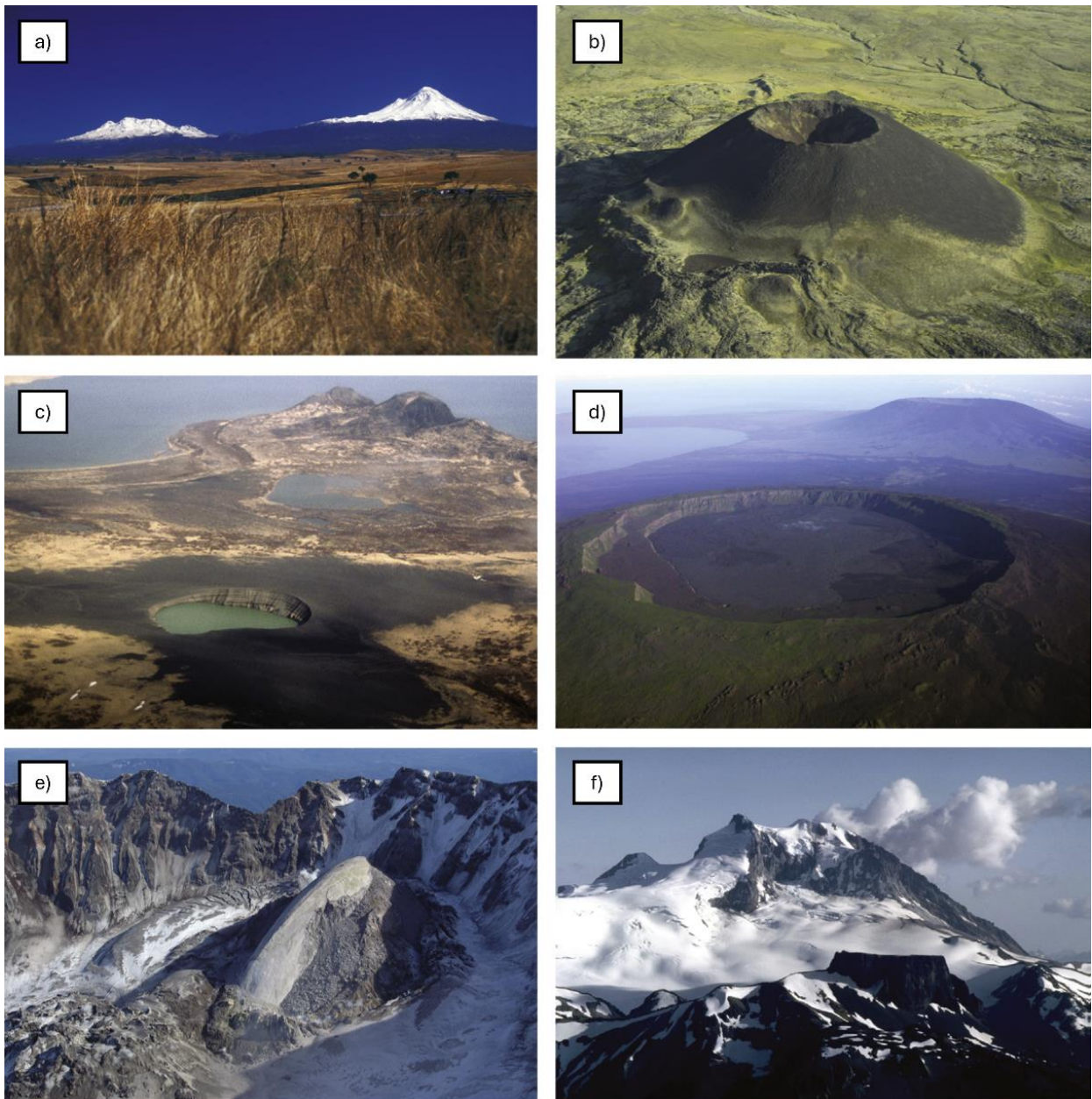
Los volcanes pueden ser clasificados por su morfología en función de su tamaño, estructura, flancos, cráter y reflejan sus procesos internos. Los tipos de volcanes según su morfología pueden ser estratovolcanes (también conocidos como volcanes compuestos), conos piroclásticos, conos de escoria, maar, escudo, domos de lava, tuya y calderas (Figura 6). La Tabla 2 muestra características de algunos tipos de volcanes (de Silva y Lindsay, 2015; Earle, 2019; Siebert et al., 2015; Tilling, 1996).

Tabla 2. *Tipologías de volcanes*

Tipo de volcán	Características
Estratovolcan	- Altura: 2-3 km - Pendiente: 30° - Magma de composición félsica a máfica - Erupciones explosivas a efusivas - Ambiente de formación: Zonas de subducción
Escudo	- Altura: 100-500 m (tipo Galápagos), aproximadamente 1300 m (Hawaiano), >10000 m - Pendiente: <<10° Galapagos, 4° a >25° Hawaii, <<10° - Prevalente en magmas poco viscosos, altas temperaturas y con poco contenido de gas (Magma máfico) - Erupciones efusivas - Ambiente de formación: Plumas mantélicas, hotspots
Cono de escoria	- Altura: ≤ 300 m - Pendiente: 25-38° - Prevalente en magmas viscosos, bajas temperatura y alto contenido de gases - Formación en flancos de volcanes - Principalmente monogenéticos (una sola erupción)
Domos de lava	- Resultado de extrusiones viscosas de magma sin gas - Comúnmente se forman en los cráteres o flancos de estratovolcanes
Caldera	- Altura: 1-2 km - Pendiente: 1-5°, 10-15°
Tuya	- Resultado de extrusiones en casquetes glaciares - Formas planas

Nota. Obtenido de de Silva y Lindsay (2015), Earle (2019); Siebert et al. (2015), Tilling (1996).

Figura 6. Ejemplos de tipos de volcanes



Nota. a) Estratovolcanes Iztaccihuatl (izquierda) y Popocatepetl (derecha) en México; b) Cono piroclástico Eve en el volcán Edziza en Canadá; c) Ukinrek maar en Alaska; d) Volcanes tipo escudo Darwin (frente) y Wolf (fondo) de las Islas Galápagos; e) Domos de lava del Mt St Helens; f) Tuya La Mesa en el Monte Garibaldi. Modificado de Siebert et al. (2015).

Los volcanes de la Cordillera Occidental (p. ej. Guagua Pichincha, Quilotoa, Pululahua) se caracterizan por actividad andesítica y dacítica durante el Holoceno y una fase de construcción de estratovolcán llegando a medir 10-20 km de ancho con calderas de 2-3 km de ancho. Mientras que

volcanes de la Cordillera Oriental (p. ej. Tungurahua, Sangay, El Reventador) se caracterizan por sus flujos de lava andesíticos y son estratovolcanes de 15-20 km de ancho (Hall et al., 2008).

Los volcanes de las Islas Galápagos son basálticos y tipo escudos, característicos por su forma de “plato invertido” (McBirney y Williams, 1969; Nordlie, 1973). Los volcanes de las Islas Galápagos pueden categorizarse en dos subtipos según su morfología (de Silva y Lindsay, 2015; Mougini et al., 1996):

1. Calderas profundas con pendientes máximas $>20^\circ$ por al menos 60% de la altura del volcán. Por ejemplo, los volcanes Wolf, La Cumbre, y Cerro Azul.
2. Calderas poco profundas con pendientes empinada hasta el 10% de la altura del volcán. Por ejemplo, los volcanes Alcedo, Darwin y Sierra Negra.

2.1.4 Parámetros de amenaza volcánica.

El IPV se puede determinar a partir de parámetros relacionados a sus productos volcánicos, historia eruptiva o actividad actual del volcán. El VEI es un índice que estima la magnitud de una erupción con una escala de 0 al 8 con respecto al volumen erupcionado, altura de la columna eruptiva, duración, e inyección troposférica y estratosférica (Newhall y Self, 1982).

Los productos asociados a volcanes pueden ser directos o indirectos. Los directos son de caída (tephra, proyectiles), de flujo (lava, piroclastos, escombros), colapso de sector o flanco, explosiones freáticas, entre otros. Mientras que los indirectos son sismos, erosión y sedimentación, flujos de escombros secundarios, efectos atmosféricos (lluvias o tormentas volcánicas), enfermedades o hambruna (Thouret, 2010). La Tabla 3 muestra las características relacionadas a varios productos volcánicos (Bignami, 2012; Scarpa et al., 1996; Thouret, 2010).

Tabla 3. *Productos volcánicos y sus efectos*

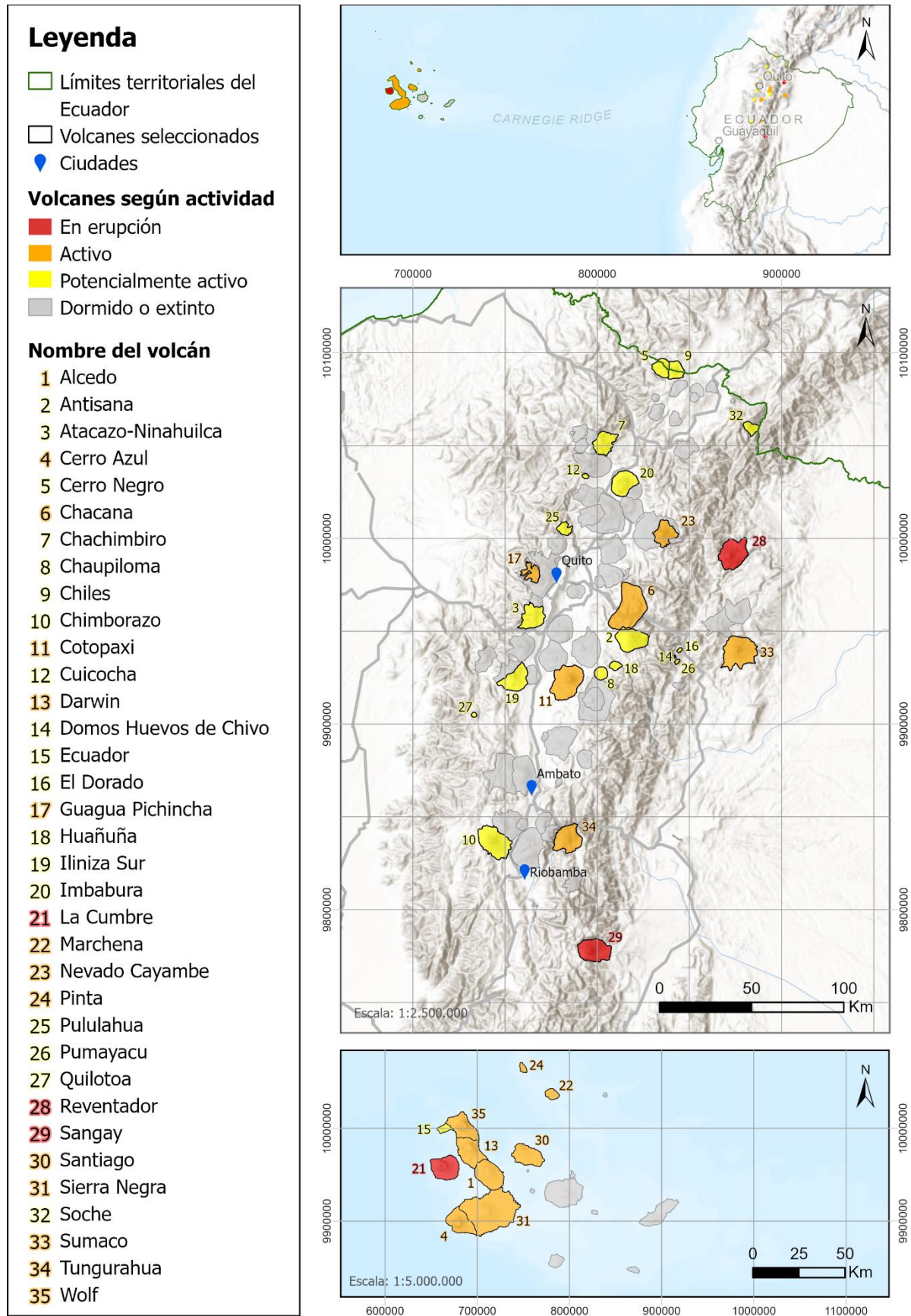
Producto volcánico	Características
Flujos piroclásticos	- Nubes concentradas de fragmentos volcánicos y gases que se desplazan por los flancos del volcán - Velocidad: decenas a cientos de km/h - Temperaturas: 100-900 °C
Flujos de lava	- Emanación de lava usualmente por erupciones efusivas - Temperatura: 650-1200 °C - Velocidad: hasta 60 km/h
Lahares	- Mezcla de agua y cenizas - Pueden ocurrir durante la erupción o después - Distancia: cientos de kilómetros
Colapsos	- Caída resultante de la acumulación de material volcánico e inestabilidad del edificio - Volumen: variable, <0,001 km^3 hasta >5000 km^3
Sismos	- Sismos volcano-tectónicos y sismos de largo periodo - Hipocentros someros - Magnitud: <4 ML
Tsunamis	- Generado a partir de erupciones submarinas, colapso de flancos o flujos piroclásticos - Altura de olas: >30 metros - Velocidad: > 800 km/h

Nota. Obtenido de Bignami (2012), Scarpa et al. (1996), Thouret (2010).

2.2 Área de estudio – volcanes seleccionados

La Figura 7 muestra la ubicación de los 35 volcanes potencialmente activos, activos y en erupción de los cuales se estimará su IPV, 10 en las Islas Galápagos y 25 en Ecuador continental.

Figura 7. Volcanes seleccionados según su actividad



Capítulo 3

3.1. Selección de metodología.

En el presente proyecto se buscó caracterizar la amenaza volcánica del Ecuador debido al desconocimiento actual de su magnitud. Se consideró otras metodologías para definir la amenaza y se contrastaron sus características (Tabla 4). Las otras metodologías consideradas fueron las modelaciones o simulaciones en GIS y un marco conceptual multi-amenaza.

El principal beneficio de las modelaciones y simulaciones es su producción de mapas multi-peligro donde se conoce la extensión espacial de los peligros, no obstante, estos mapas se producen a nivel individual/por volcán y se basan principalmente en erupciones pasadas. Por otro lado, la generación de un marco conceptual multi-amenaza abarca varios fenómenos como erupciones volcánicas, inundaciones, tsunamis y movimientos de masa. Aunque los marcos multi-amenazas presentan una visión integral para la gestión de riesgos, ya no se focaliza en el problema seleccionado.

La metodología seleccionada de estimación del IPV es precursora para la generación de ranking de riesgo volcánico. El IPV permitió abarcar varios volcanes, clasificarlos y compararlos. Además, el IPV considera la historia eruptiva y la actividad actual de los volcanes.

Tabla 4. *Matriz de decisiones*

Método	Ejemplos	Cubre varios volcanes	Mapas multi peligro	Clasificación de volcanes	Considera actividad/ estado actual
Ranking de riesgo volcánico - Índice de peligrosidad volcánica	(Ewert, 2007; Nieto-Torres et al., 2021)	✓		✓	✓
Modelaciones y simulaciones de productos volcánicos en GIS	(Alcorn et al., 2013; Felpeto et al., 2007; Reyes-Hardy et al., 2021)		✓		
Conceptual Multi-hazard	(López-Saavedra y Martí, 2023;	✓			✓

Framework (CMF)	Selva et al., 2019)
------------------------	---------------------

3.2. Materiales

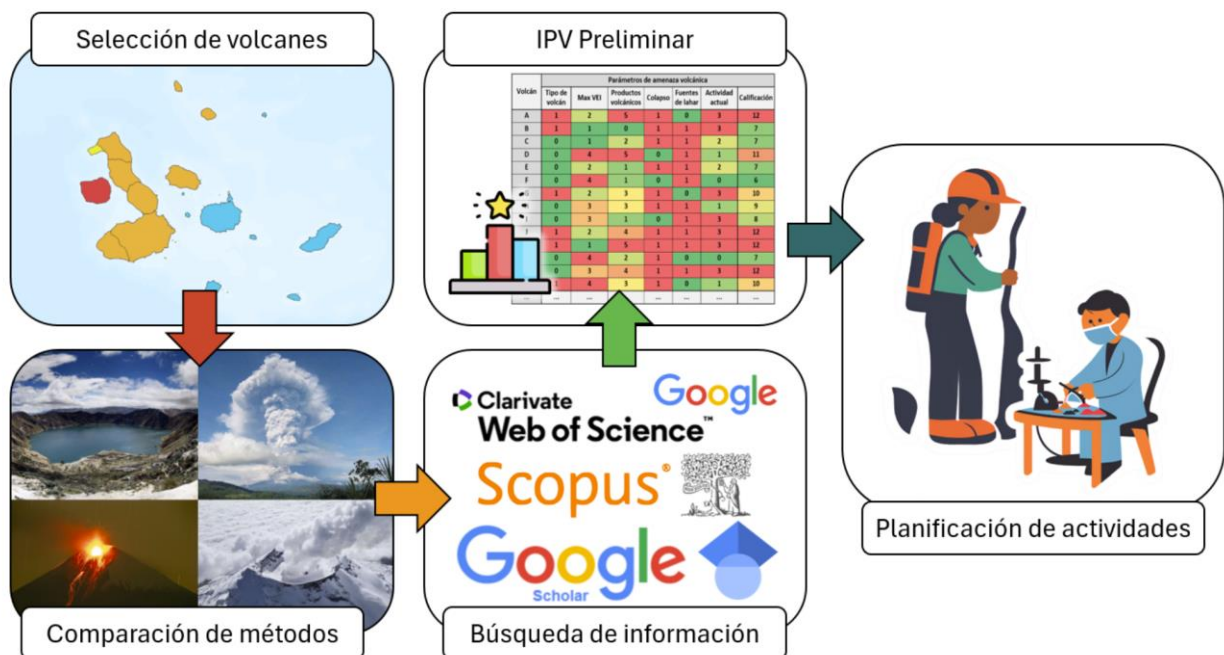
Los materiales utilizados fueron páginas web, buscadores y/o gestores de bases de datos como Google Scholar, GVP, Web of Science y Scopus. A partir de los buscadores se obtuvo artículos científicos, ponencias y posters en conferencias, libros, mapas y bases de datos. La Tabla 5 presenta una explicación y ejemplos de los materiales utilizados durante el proyecto.

Tabla 5. *Materiales para revisión bibliográfica*

Material	Explicación	Ejemplos
Artículos científicos	Publicaciones en editoriales como Journal of Volcanology and Geothermal Research, Journal of Applied Volcanology, Bulletin of the Geological Society of America, entre otros.	(Bernard et al., 2024; Hidalgo et al., 2024)
Ponencias y posters en conferencias	Presentaciones en conferencias como Cities on Volcanoes.	(Bernard et al., 2018; Santamaría y Bernard, 2018)
Libros	Libros con respecto a vulcanología, riesgos volcánicos, geología del Ecuador.	(Loughlin et al., 2015)
Mapas	Mapas multipeligro de volcanes del Ecuador.	(Ruíz et al., 2005)
Bases de datos	Bases de datos nacionales e internacionales.	(Global Volcanism Program, 2024)
Páginas web	Sitios de entidades oficiales	(Instituto Geofísico - EPN, 2017)

3.3. Metodología

La metodología aplicada consiste en 5 fases (Figura 8): 1) selección de volcanes, 2) identificación de parámetros de amenaza volcánica, 3) búsqueda de información, 4) calificación de parámetros y generación del IPV preliminar, 5) planificación de actividades.

Figura 8. *Fases de metodología*

Se realizaron las siguientes fases:

1. La selección de volcanes se refiere a la distinción de los volcanes del Ecuador según su estado actual: extinto o dormido, potencialmente activo, activo y en erupción. Acorde a Bernard (2017b), los potencialmente activos presentan actividad durante el Holoceno (los últimos 11700 años), los activos tuvieron actividad durante el periodo histórico (desde 1532 d.C), y los volcanes en erupción presentan actividad dentro de los últimos dos años.
2. Los parámetros de amenaza volcánica utilizados se encuentran en Nieto-Torres et al. (2021), donde utilizan parámetros relacionados a la historia eruptiva de los volcanes como el VEI máximo, el intervalo de recurrencia y productos volcánicos. Cada uno de los parámetros tiene una ponderación, el valor es proporcional a la peligrosidad del volcán. Los parámetros son resumidos en la Tabla 6. La información recopilada anteriormente fue utilizada para realizar fichas con los parámetros de amenaza volcánica que presenta cada volcán.

Tabla 6. *Parámetros de amenaza volcánica*

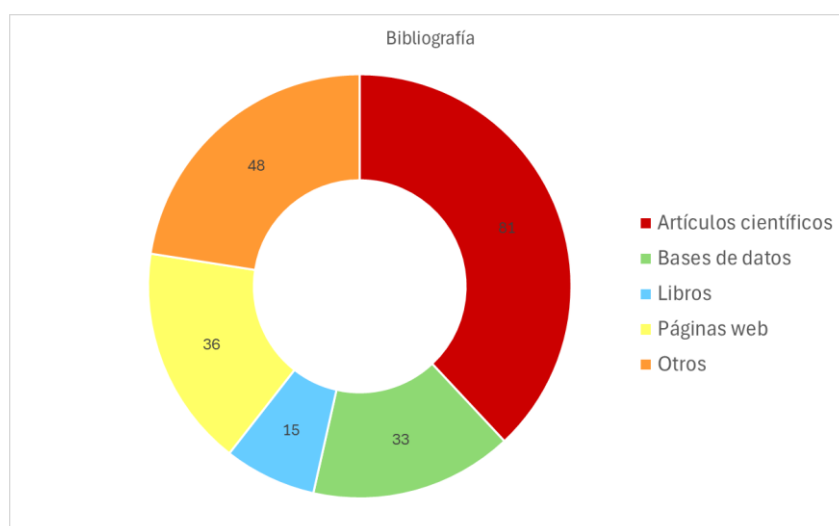
Parámetro	Descripción	Calificación	Calificación máxima
Tipo de volcán	Cono de escoria, escudo pequeño, fisuras	0	1
	Estratocono, domo de lava, complejo volcánico, maar, caldera	1	
VEI máximo	VEI ≥ 7	4	4
	VEI = 5 o 6	3	
	VEI = 3 o 4	2	
	VEI = 2	1	
	VEI ≤ 1	0	
	VEI desconocido; tipo de volcán = 1	1	
	VEI desconocido; tipo de volcán = 0	0	
Intervalo de recurrencia VEI≥ 3	< 50 años	4	4
	50-100 años	3	
	100-1000 años	2	
	1000-10000 años; sin erupción durante el Holoceno, pero erupción formadora de caldera hace > 10000 años	1	
	No erupciones conocidas durante el Holoceno	0	
Tipos de eventos volcánicos	Pyroclastic Density Currents (PDCs) durante el Holoceno	1	1
	Flujos de lava durante el Holoceno. Si se han desplazado más allá del sitio de erupción o flancos y llegado a áreas pobladas	1	1
	Lahares durante el Holoceno. Si se han desplazado más allá de los flancos y llegado a áreas pobladas	1	1
	Tsunamis durante el Holoceno	1	1
	Si el volcán ha presentado actividad freática explosiva durante el Holoceno y/o presenta características termales con suficiente extensión para presentar potencial para actividad explosiva	1	1
Potencial para colapso de sector	Si el volcán ha producido colapso de sector y reconstrucción de su edificio, o tiene alto relieve, flancos empinados o alteración demostrada/inferida	1	1
Fuente de lahares primarios	Si el volcán tiene una fuente permanente de agua o hielo, con volumen de agua mayor a un millón de metros cúbicos	1	1

Actividad sísmica	Ha presentado actividad sísmica en un radio de 20 km alrededor del volcán desde la última erupción	1	1
Deformación del suelo	Ha presentado inflación u otra evidencia de inyección de magma desde su última erupción	1	1
Actividad fumarólica o desgasificación	Ha presentado gases magmáticos o fuentes de calor desde la última erupción	1	1
Puntaje máximo total			19

Nota. Modificado de Nieto-Torres et al. (2021).

- La búsqueda de información bibliográfica y cartográfica incluye publicaciones científicas, posters y ponencias de conferencias, mapas, libros, páginas web y bases de datos. La información recopilada es categorizada por volcán en una base de datos. En total se consultaron 211 fuentes, compuestas principalmente de artículos científicos, en la Figura 9 se muestra la distribución. Los artículos científicos se encontraron en 29 revistas/journals científicos, principalmente el Journal of Volcanology and Geothermal Research y Bulletin of Volcanology.

Figura 9. Bibliografía utilizada



- La calificación de parámetros se realiza comparando la información resumida de las fichas para generar una matriz de datos entre los volcanes y los parámetros de amenaza. Se

califica de acuerdo con la metodología de Nieto-Torres et al. (2021). En la Figura 10 se muestra un ejemplo simplificado de la matriz generada. A partir de la matriz de parámetros de amenaza y volcanes se obtiene un IPV preliminar que se utilizó para clasificar/comparar los volcanes y encontrar partes de la bibliografía que pueden ser complementadas con trabajo en campo o laboratorio.

Figura 10. *Simplificación de matriz de parámetros de amenaza volcánica calificados*

Volcán	Parámetros de amenaza volcánica						Calificación
	Tipo de volcán	Max VEI	Productos volcánicos	Colapso	Fuentes de lahar	Actividad actual	
A	1	2	5	1	0	3	12
B	1	1	0	1	1	3	7
C	0	1	2	1	1	2	7
D	0	4	5	0	1	1	11
E	0	2	1	1	1	2	7
F	0	4	1	0	1	0	6
G	1	2	3	1	0	3	10
H	0	3	3	1	1	1	9
I	0	3	1	0	1	3	8
J	1	2	4	1	1	3	12
K	1	1	5	1	1	3	12
L	0	4	2	1	0	0	7
M	0	3	4	1	1	3	12
N	1	4	3	1	0	1	10
...	...	...	...	...	...	...	...

- La matriz de parámetros de amenaza volcánica nos permite identificar volcanes con menor o insuficiente información disponible. Por ejemplo, los volcanes como El Dorado, Pumayacu y Huevos de Chivo que fueron descubiertos en el 2009, tienen poca información disponible. Mientras que volcanes como Chiles y Cerro Negro que se encuentran en la frontera Ecuador-Colombia, tienen más información disponible porque son monitoreados por el Instituto Geofísico y el Servicio Geológico y Minero Colombiano. Se plantearon cuales actividades campo y de laboratorio se podrían realizar para complementar el IPV.

Capítulo 4

4. Resultados y análisis

4.1 Parámetros de peligrosidad volcánica

Los parámetros de peligrosidad seleccionados pertenecen a la metodología de Nieto-Torres et al. (2021) la cual incluye factores como tipología de volcán, VEI máximo, tasa de recurrencia, productos volcánicos primarios y secundarios y estado actual (Tabla 6). Otros parámetros de peligrosidad volcánica se encuentran en trabajos como el de Alberico et al. (2002) y Aucker et al. (2015). La Tabla 7 muestra parámetros de peligrosidad volcánica de distintos autores.

Tabla 7. *Parámetros de peligrosidad volcánica de diferentes contribuciones*

Autor	Cantidad de parámetros	Tipos de parámetros	Parámetros
Alberico et al. (2002)	7	Geofísicos	Distribución de sismos
			Patrones de deformación del suelo
			Distribución de anomalía de Bourguer
		Geológicos	Distribución de conductos pasados
			Ocurrencia de fallas recientes
		Geoquímicos	Concentración de helio Ocurrencia de fumarolas activas
Aucker et al. (2015)	6	Frecuencia de erupción	Activo, semi-activo, semi-dormido, dormido
		Eventos volcánicos	Flujos piroclásticos
			Lahares
			Flujos de lava
		VEI	Máximo
			Modal
Nieto-Torres et al. (2021)	13	Tipología de volcán	
		VEI máximo	(0 – 8)
		Intervalo de recurrencia	Tiempo
		Eventos volcánicos	Flujos piroclásticos
			Flujos de lava
			Lahares
			Tsunamis volcano-génicos
			Explosiones freáticas
		Potencial de colapso calderico	
		Desencadenante de lahares primarios	Volumen de agua
		Actividad actual	Actividad sísmica
			Deformación del suelo
			Desgasificación

Entre las tres se seleccionó la metodología de Nieto-Torres et al. (2021), porque es la que consideraba una mayor cantidad de parámetros que abarca las características del volcán, la magnitud de sus erupciones, productos volcánicos y su actividad actual. No obstante, el parámetro de tsunamis vulcano-génicos no es aplicable en Ecuador continental, aunque puede suceder en las islas Galápagos (p. ej. colapso del volcán Ecuador). Acorde a la base de datos histórica global sobre tsunamis de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) (2022), desde 1610 a.C hasta el 2022, los tsunamis en Ecuador se han desencadenado solamente por sismos.

4.2 IPV preliminar

Después de la selección de parámetros de peligrosidad volcánica y la búsqueda bibliográfica, se realizaron fichas para cada volcán con la información obtenida (Apéndice A). Las fichas se utilizaron para elaborar una matriz con valores correspondientes a la peligrosidad volcánica. En la

Tabla 9 se resumen los valores obtenidos para cada volcán según los parámetros y su IPV preliminar.

La elaboración del IPV presenta algunos limitantes, como las redes de monitoreo disponibles y la cantidad de información actual. El conocimiento de lo estado actual de los volcanes se ve limitado por el monitoreo. En Ecuador hay tres niveles de monitoreo (Tabla 8). El nivel de monitoreo 1 corresponde a los observatorios que cuentan con varias técnicas de monitoreo: sísmicas (al menos cuatro instrumentos), geodésicas, acústicas y geoquímicas. El nivel de monitoreo 2 se refiere a observatorios con al menos dos técnicas de monitoreo como sísmica, geodésica y ocasionalmente geoquímica/térmica. Mientras el nivel de monitoreo 3 tienen al menos una técnica de monitoreo, usualmente sísmicas.

Los volcanes de las Islas Galápagos tienen una red de monitoreo de nivel 3 que consta de al menos una técnica de monitoreo (Ramón et al., 2021). El volcán Cotopaxi tiene una red de monitoreo de nivel 1 y cuenta con redes sísmicas, geodésicas, acústicas y geoquímicas (Ramón et al., 2021). Algunos volcanes como el volcán Sumaco no tiene red de monitoreo, mientras que los volcanes Chiles y Cerro Negro son observados por el Instituto Geofísico y el Servicio Geológico y Minero de Colombia.

Tabla 8. *Redes de monitoreo volcánico del Ecuador*

Volcanes/Estaciones	Nivel de monitoreo	Cantidad de instrumentos
Cotopaxi	I	90
Tungurahua		66
Guagua Pichincha		12
Reventador		18
Cayambe		8
Sangay	II	33
Chiles-Cerro Negro		19
Cuicocha		5
Antisana	III	9
Chimborazo		4
Imbabura		5
Pululahua		2
Quilotoa		1
Galapágos		10

Nota. Modificado de Hidalgo et al. (2024).

Tabla 9. Matriz resumida de parámetros de peligrosidad volcánica

Volcanes	Tipo de volcán	VEI máx.	Tasa de recurrencia (VEI ≥ 3)	Productos volcánicos	Potencial de colapso	Fuente de lahares primarios	Estado actual	IPV preliminar
Alcedo	0	3	1	1	1	0	3	9
Antisana	1	1	1	2	1	1	0	7
Atacazo Ninahuilca	1	3	1	1	1	0	1	8
Cerro Azul	0	2	2	0	1	0	3	8
Cerro Negro	1	1	1	2	1	0	3	9
Chacana	1	0	1	3	1	0	2	8
Chachimburo	1	2	1	1	1	0	0	6
Chaupiloma	1	1	1	1	0	0	0	4
Chiles	1	1	0	2	1	0	3	8
Chimborazo	1	1	0	3	1	0	0	6
Cotopaxi	1	3	4	4	1	1	2	16
Cuicocha	1	3	0	1	1	0	1	7
Darwin	0	1	1	1	1	0	1	5
Huevos de Chivo	1	1	0	0	1	0	0	3
Ecuador	0	0	0	2	1	0	0	3
El Dorado	1	1	0	1	1	0	0	4
Guagua Pichincha	1	3	2	4	1	0	3	14
Huañuña	1	1	0	1	0	0	0	3
Iliniza Sur	1	3	0	1	1	0	0	6
Imbabura	1	2	0	1	1	0	1	6
La Cumbre	0	2	2	2	1	0	3	10
Marchena	0	1	0	2	1	0	0	4
Nevado Cayambe	1	2	2	2	1	1	2	11
Pinta	0	0	0	0	1	0	0	1
Pululahua	1	3	1	1	0	0	2	8
Pumayacu	1	1	0	1	1	0	0	4
Quilotoa	1	3	1	3	1	1	1	11
Reventador	1	2	4	3	1	0	2	13
Sangay	1	2	2	3	1	0	1	10
Santiago	0	0	0	1	0	0	0	1
Sierra Negra	0	2	4	1	1	0	1	9
Soche	1	3	0	1	1	0	0	6
Sumaco	1	2	2	1	1	0	0	7
Tungurahua	1	3	4	3	1	1	1	14
Wolf	0	2	1	0	1	0	0	4

El valor máximo alcanzado de peligrosidad es de 16 por el volcán Cotopaxi, y el mínimo valor es de 1 de los volcanes Pinta y Santiago. Es importante recalcar que el IPV calculado es

preliminar, ya que puede ser fortalecido o complementado con más información, como la que se propone con las actividades de campo y laboratorio planificadas.

Los valores estimados de IPV permiten generar una clasificación preliminar de la peligrosidad de los volcanes. La metodología de rupturas naturales (Jenks) es utilizada para la clasificación de peligrosidad y riesgo (Basofi et al., 2018; Fariza et al., 2017; Stefanidis y Stathis, 2013). El método de clasificación de rupturas naturales tiene la función de determinar la mejor distribución de valores entre clases, mientras reduce la varianza dentro de una clase y aumenta la varianza entre clases (Jenks, 1967). Zuzak et al. (2022) establece 5 categorías para definir el riesgo de amenazas naturales: muy alto, relativamente alto, moderado, relativamente bajo y muy bajo.

Utilizando la metodología de rupturas naturales de Jenks (1967), la clasificación propuesta por Zuzak et al. (2022) y el IPV preliminar se pueden categorizar los volcanes según su peligrosidad. La Tabla 10 muestra los volcanes que pertenecen a cada categoría.

Tabla 10. *Peligrosidad preliminar por categoría*

Categoría	Rango	Volcanes
Muy bajo	1.0-4.0	Pinta, Santiago, Huevos de Chivo, Ecuador, Huañuña, Chaupiloma, El Dorado, Marchena, Pumayacu, Wolf
Relativamente bajo	4.1-6.0	Darwin, Imbabura, Chachimbiro, Chimborazo, Iliniza Sur, Soche
Moderado	6.1-8.0	Antisana, Cuicocha, Sumaco, Atacazo-Ninahuilca, Cerro Azul, Chacana, Chiles, Pululahua
Relativamente alto	8.1-11.0	Alcedo, Cerro Negro, Sangay, Sierra Negra, La Cumbre, Nevado Cayambe, Quilotoa
Muy alto	11.1-19.0	Guagua Pichincha, Reventador, Tungurahua, Cotopaxi

La categoría “muy bajo” está compuesta de volcanes de las Islas Galápagos y del Ecuador continental. Los volcanes Pinta, Santiago, Ecuador y Wolf predominan los flujos de lava aunque no llegan a poblaciones, el potencial de colapso y explosiones freáticas (Cullen y McBirney, 1987; Geist et al., 2002; Rowland et al., 1994; Swanson et al., 1974). Por otro lado, los volcanes El

Dorado, Pumayacu, Huevos de Chivo, Pumayacu, Huañuña y Chaupiloma, predominan los flujos piroclásticos y potencial de colapso (Barragán y Baby, 2016; Bernard, 2017a; Hall y Mothes, 2010; Mothes y Hall, 2008). Es importante recalcar que los volcanes El Dorado, Pumayacu y Huevos de Chivo fueron recientemente descubiertos en el 2009 (Hall y Mothes, 2010). En esta categoría los volcanes no presentan actividad actual, son volcanes de tipo escudo y domos de lava y hay poca información disponible, en especial de la extensión de los productos volcánicos con respecto a la población (Global Volcanism Program, 2024).

La categoría “relativamente bajo” se compone principalmente de estratovolcanes del Ecuador continental y de un volcán tipo escudo de las Islas Galápagos. Los VEI máximos son de 3 a 5 (Global Volcanism Program, 2024) y entre los eventos que pueden generar predominan los flujos piroclásticos y potencial de colapso calderico. Producen flujos de lava y lahares, pero no se conoce su alcance con respecto a la población, por lo que no se le puede dar un puntaje (Bablon et al., 2022; Bernard et al., 2014; Hidalgo et al., 2007; Samaniego et al., 2012; Tibaldi et al., 2007). También presentan fuentes o desencadenantes de lahares primarios, pero no se conoce la extensión de sus recursos hídricos. En esta categoría los volcanes tampoco presentan actividad actual, a excepción de deformación de suelo del volcán Darwin (Davidge et al., 2017).

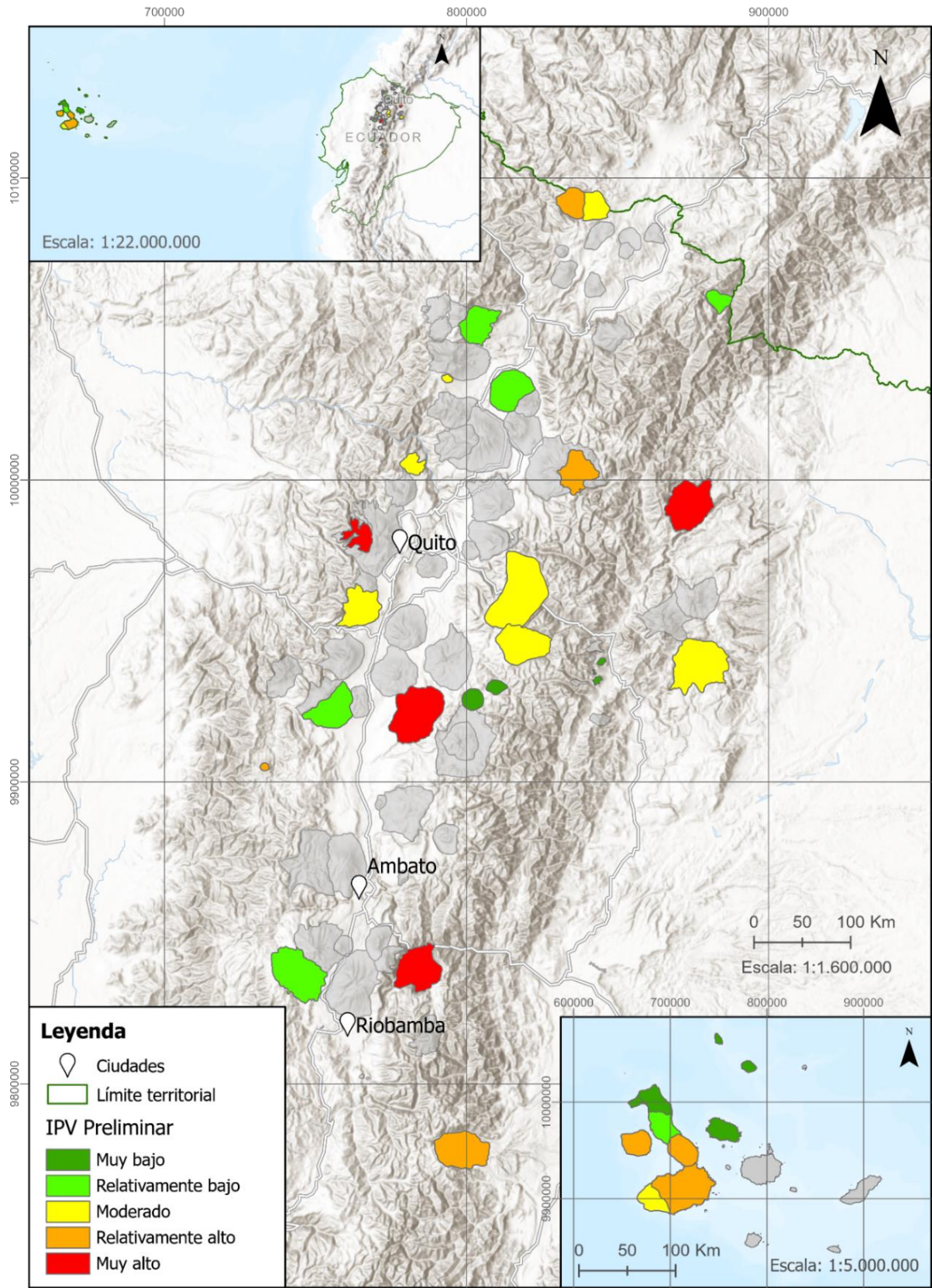
La categoría “moderado” está compuesta de volcanes del Ecuador continental con la excepción del volcán Cerro Azul de Galapagos. Predominan los estratovolcanes con flujos piroclásticos y el potencial de colapso. También generan flujos de lava y lahares, pero su alcance o afectación a la población es desconocido, por lo tanto, no se les atribuye esos puntos. Además, presentan evidencias de periodos de glaciación, lagos cratéricos o sistemas hidrotermales que pueden desencadenar explosiones freáticas o lahares primarios (Andrade et al., 2021; Gunkel et al., 2008a; Hall et al., 2017; Hidalgo et al., 2008; Salgado et al., 2021). De los 13 volcanes 7 presentan actividad sísmica, deformación de suelo o desgasificación. Las erupciones equivalen a VEI de 2 a 5 (Global Volcanism Program, 2024).

Los volcanes de la categoría “relativamente alto” son estratovolcanes (Nevado Cayambe, Sangay, Cerro Negro) y calderas (Quilotoa) del Ecuador continental y volcanes tipo escudo de Galapágos (La Cumbre, Sierra Negra, Alcedo). Las erupciones son de VEI de 2 a 6, y presentan flujos piroclásticos, potencial de colapso y actividad freatomagmática. También generan flujos de lava y lahares, pero hay insuficiente información acerca de su extensión con respecto a la población (Bernard et al., 2019; Chadwick et al., 2011; Geist et al., 1994; Goff et al., 2000; Gunkel et al., 2008b; Hidalgo et al., 2022). Además, todos los volcanes de esta categoría han presentado actividad sísmica, deformación de suelo o desgasificación desde su última erupción o se encuentran en un periodo eruptivo (Global Volcanism Program, 2024).

Los volcanes Guagua Pichincha, Reventador Tungurahua y Cotopaxi son de la categoría “muy alto”, son estratovolcanes de VEI máximos 4 y 5 (Global Volcanism Program, 2024). La mayoría genera flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, explosiones freáticas, con potencial de colapso (Hall et al., 1999; Pistolesi et al., 2011; Robin et al., 2008; Samaniego et al., 2008; Tadini et al., 2022). También han presentado actividad desde su última erupción o se encuentran en un periodo eruptivo.

En cada categoría hay volcanes de distintos tipos, van incrementando los productos/ eventos volcánicos, su nivel de actividad y VEI máximo. Todas las categorías excepto muy alto, muestran volcanes del Ecuador continental y de las Islas Galapágos. El ambiente de formación sea de subducción o punto caliente, no es un condicionante para el nivel de peligrosidad preliminar obtenido. Tampoco hay un área donde se concentren los volcanes de acuerdo con su IPV preliminar. La amenaza volcánica de cada categoría se encuentra distribuida en todo el Ecuador (Figura 11).

Figura 11. IPV preliminar



Por otro lado, un limitante para el desarrollo del IPV preliminar es la cantidad de información. En la Tabla 11 se observa que la cantidad de fuentes promedio por cada categoría incrementa con la peligrosidad. Vale recalcar que la Tabla 11 contiene la bibliografía que fue útil para generar el IPV preliminar y no muestra toda la bibliografía existente con respecto al volcán, ya que no toda fuente presenta información pertinente al presente proyecto. Por ejemplo, el artículo de Candra et al. (2019) acerca de la meteorización y formación del suelo del volcán Alcedo es una contribución relevante para el estudio de pedogénesis de las Islas Galápagos pero no es útil para el IPV.

Además, la Tabla 11, no representa la calidad de la información, en el caso de los artículos científicos se presentan variados índices de impacto. Otro limitante es la accesibilidad a información, por ejemplo, artículos científicos detrás de un muro de pago, información en otros idiomas o documentos no digitalizados. Además, se debe de tomar en consideración que la falta de información de un producto volcánico puede ser por la escasez de fuentes o investigación o porque el volcán no genera ese producto en específico.

Tabla 11. Fuentes de información según clase de peligrosidad

Categoría	Artículos científicos	Bases de datos	Libros	Páginas web	Ponencias y posters	Otros	Total	Promedio
Muy bajo	11	5	2	4	4	7	33	3,3
Relativamente bajo	9	5	4	3	3	7	31	5,17
Moderado	15	7	6	12	2	11	53	6,63
Relativamente alto	29	7	3	12	1	8	60	8,57
Alto	17	9	1	6	1	3	37	9,25

También es posible que los productos que genera un volcán o su comportamiento cambien en el futuro. Por ejemplo, el volcán Cotopaxi cambia de erupciones riolíticas a andesíticas (Hall y Mothes, 2008), o en Guatemala el Volcán del Fuego tiene periodos efusivos y explosivos (Naismith et al., 2024).

4.3 Tabla de futuras actividades

La matriz de parámetros de peligrosidad volcánica permitió reconocer la disparidad en cantidad y calidad de información entre los volcanes ecuatorianos. Como se estableció en la descripción y justificación del problema del proyecto, hay desconocimiento del peligro volcánico en el Ecuador. El desconocimiento se acentúa en volcanes recientemente conocidos o que presentan menos actividad superficial o subterránea reciente.

En la Tabla 12 se muestran los parámetros que requieren de más investigación de cada volcán. Los parámetros menos conocidos son la tasa de recurrencia de erupciones con $VEI \geq 3$, los flujos de lava, lahares, explosiones freáticas, fuente de lahares primarios y actividad actual. La tasa de recurrencia se dificulta en calcular cuando hay registro de una sola erupción como el volcán Chaupiloma, o cuando no se han calculado un VEI de sus erupciones como los domos Huevos de Chivo.

Aunque se reconozca que un volcán emita flujos de lava o lahares, usualmente falta más información acerca de su ubicación o alcance con respecto a la población para aplicar la metodología de Nieto-Torres et al. (2021). Por esa razón, aunque volcanes como el Atacazo-Ninahuilca han generado flujos de lava y lahares, no se les atribuye esos puntos porque no cumple con los lineamientos de la metodología.

Por otro lado, hay volcanes como el Chacana que presentan sistemas hidrotermales, periodos de glaciación o lagos crátericos donde es incierta la ocurrencia de explosiones freáticas. En algunos casos, tampoco se conoce el volumen de agua para la fuente de lahares primarios y en

En la Tabla 13 se proponen actividades de campo y laboratorio útiles para la generación de información que complemente el IPV. Se incluyen ejemplos de contribuciones donde se aplican las actividades.

Tabla 13. *Actividades propuestas*

Parámetros	Actividades	Ejemplos
VEI Máx Tasa de recurrencia VEI ≥ 3	• Tefroestratigrafía y datación de radiocarbono, para cálculo de volumen de tephra y estimación de VEI. • Algunos métodos para el cálculo de volumen de tephra incluyen Exponential Thinning, Power Law y Weibull. • Análisis dendrocronológico de núcleos de árboles para datación (escala en centenas de años). • Teledetección espacial para estimación de volumen de productos volcánicos y altura de columna eruptiva de futuras erupciones.	(Andrade et al., 2022; Bonadonna y Costa, 2012; Mulas et al., 2016; Romero et al., 2021; Urai y Ishizuka, 2011)
Flujos piroclásticos Flujos de lava Lahares Explosiones freáticas	• Tefroestratigrafía y datación de radiocarbono, por ejemplo, datación de carbono 14 en secuencias de tephra lacustre y terrestre a partir de núcleos o testigos de roca, levantamiento en campo o muestreo para reconstrucción de historia eruptiva. • Análisis de componentes (microscopio electrónico de barrido, laminas delgadas, fluorescencia de rayos X y espectrometría) y geoquímica de vidrio volcánico (microsonda electrónica) para distinción entre eventos eruptivos. • Análisis dendrocronológico de núcleos de árboles para datación (escala en centenas de años).	(Andrade et al., 2022; Bonadonna y Costa, 2012; Indriyanto et al., 2023; Mulas et al., 2016; Romero et al., 2021; Yamamoto et al., 2023)
Potencial de colapso	• Evaluación geomorfológica a partir de levantamiento en campo y análisis subáreo (LiDAR). El análisis subáreo puede incluir cálculo de índice de posición topográfica (TPI), índice de rugosidad del terreno (TRI) y relieve relativo. • Aplicación de métodos geofísicos, por ejemplo, ensayos magnetotélúricos, gravitacionales y eléctricos para definir la estructura interna del volcán.	(Arango-Galván et al., 2020; Kósik et al., 2022; Krippner et al., 2018; Tibaldi et al., 2008)

	• Uso de datos satelitales infrarrojos térmicos (TIR), infrarrojos de onda corta (SWIR) e infrarrojos visibles cercanos (VNIR) del radiómetro espacial avanzado de emisión y reflexión térmica (ASTER) para analizar las cicatrices del colapso del domo. • Análisis de datos geológicos y estructurales terrestres y marinos (batimetría), como descripción de unidades estratigráficas y fallas.	
Fuente de lahares primarios	• Mapeo de ventisqueras y glaciares utilizando sistemas de información geográfica y fotogrametría, por ejemplo, ArcticDEM o con imágenes satelitales. • Estudios hidrogeológicos y modelado de los acuíferos volcánicos. • Modelamiento de lagos utilizando datos satelitales, como LiDAR, Landsat y ICESat-2.	(Dai et al., 2024; Melati et al., 2019; Poncela et al., 2022; Rivera y Bown, 2013; Zhang et al., 2022)
Actividad sísmica	• Implementación de técnicas de monitoreo sísmicas, geodésicas, acústicas y geoquímicas, por ejemplo, sensores Multi-GAS. • Uso de técnicas de interferometría (InSAR/DInSAR) para monitoreo y pronóstico de deformaciones superficiales. • Reconstrucción fotogramétrica 3D. • Mediciones de temperatura de agua en lagos crátericos y aguas termales, pH, análisis isotópicos y geoquímicos del agua y temperatura y análisis de fumarolas. • Análisis de inclusiones fluidas para comprender el comportamiento de volcanes dormidos o con poca información disponible acerca de sus erupciones pasadas.	(Antonielli et al., 2014; Boudoire et al., 2023; Hanif et al., 2024; Salas-Navarro et al., 2022; Takahashi et al., 2023; Tournigand et al., 2023)
Deformación del suelo		
Desgasificación		

Las actividades propuestas incluyen trabajo en campo, laboratorio, geodesia y teledetección. Cada metodología presenta sus ventajas, desventajas y variaciones. Las actividades más recurrentes son el uso de imágenes satelitales, fotogrametría y técnicas de teledetección como interferometría, para el potencial de colapso, fuente de lahares primarios y actividad actual del

volcán. Así como estudios de tefroestratigrafía para la caracterización de los productos volcánicos y de los VEI de las erupciones.

La teledetección y fotogrametría representan métodos útiles para el estudio de los volcanes. Los sensores remotos y drones tienen aplicaciones como mapeo geológico, litológico, estructural y geomorfológico (Bhan y Krishnanunni, 1983; Giordan et al., 2020). A partir de los años 1970's hubo un incremento en la cantidad y calidad de datos de sensores remotos e innovaciones como LiDAR e InSAR. LiDAR es una técnica de teledetección que provee con imágenes terrestre de alta resolución, mientras que InSAR registra datos de deformación de la superficie con precisión milimétrica (Griffiths, 2019).

La interferometría/InSAR tiene limitantes como el error provocado por vegetación, obstrucción de la línea de visión, resolución espacial detectable y resolución temporal. Los satélites InSAR no son usualmente utilizados para medidas en tiempo real, aunque si se pueden utilizar en rangos de tiempo cortos desde la toma de datos, hasta horas después (McCormack et al., 2011). La resolución temporal y espacial del LiDAR también tiene limitaciones. Además, la presencia de lluvia, niebla o nubes puede restringir la altitud de la toma de datos (Mona y Marengo, 2016).

Por otro lado, tefroestratigrafía es el estudio de secuencias de tephra y cryptotephra, mediante la descripción de sus propiedades físicas, mineralógicas y geoquímicas para establecer su distribución y edades relativas o numéricas. Tephra proviene de la palabra griega *tefra* que significa “cenizas” pero corresponde a los productos piroclásticos no consolidados de una erupción, incluyendo tamaños de grano de ceniza muy fina hasta bloques métricos. Mientras que la cryptotephra se refiere a los vidrios y cristales microscópicos preservados (Alloway et al., 2013; Lowe, 2011; Shane et al., 2008; Turney et al., 2004).

La tefroestratigrafía se utiliza en la tefrocronología para relacionar secuencias deposicionales de acuerdo con su edad. Se divide generalmente en tres etapas: (1) mapeo de tephras y correlación de estratos, (2) caracterización de tephras y cryptotephras, (3) datación.

Existen varios métodos para la caracterización de tephras (Tabla 14). Así como para la datación de las secuencias mediante métodos radiométricos, incrementales, modelado de edad, equivalencia de edad, relativos e históricos (Lowe y Alloway, 2015; Turney et al., 2004).

Tabla 14. Métodos para caracterizar cryptotephras

Componentes y propiedades de tephra	Principales métodos de análisis
<i>Fragmentos de vidrio</i>	
- Elementos mayores y menores	Microsonda electrónica
- Elementos traza y tierras raras	Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo mediante ablación láser (LA ICPMS) o nebulización de solución (SN ICPMS), análisis por activación neutrónica (INAA), espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS)
- Isótopos de Sr, Nd y Pb	LA-ICP-MS, espectrometría de masas de nucleidos (NMS)
- Morfología de fragmentos	Microscopio óptico, microscopía electrónica de barrido (SEM)
<i>Inclusiones (vidrio)</i>	
- Elementos mayores y menores	Microsonda electrónica
- Elementos traza	SIMS, LA-ICP-MS
<i>Silicatos ferromagnesianos</i>	
- Cristales o fenocristales de piroxenos, anfíboles, olivinos, biotita	Microsonda electrónica
- Geometría de cristales	Microscopio óptico, SEM
<i>Apatita, zircon</i>	
- Cristales o fenocristales de apatita o zircón	Microsonda electrónica, Espectrometría de masas por ionización térmica y análisis de elementos traza (TIMS-TEA)
- Geometría de cristales	Microscopio óptico, SEM
<i>Oxidos de Fe-Ti</i>	
- Elementos mayores y menores	Microsonda electrónica
- Temperatura de erupción	Microsonda electrónica
<i>Feldespatos</i>	
- Cristales o fenocristales de plagioclasa, anortoclasa o sanidina	Microsonda electrónica

Nota. Modificado de Lowe y Alloway (2015).

Uno de los limitantes de la tefroestratigrafía es la removilización de tephra, debido a factores climáticos o antropogénicos. También puede haber errores en la correlación debido a vacíos en el registro estratigráfico, cambios en las propiedades mineralógicas y geoquímicas dentro de un solo periodo eruptivo y similitud entre tephras de distintas erupciones (Lowe, 2011; Shane et al., 2008).

El uso de imágenes satelitales, fotogrametría y estudios tefroestratigráficos son algunas de las actividades propuestas para complementar el IPV. La selección de actividades corresponde a la viabilidad de los proyectos y prioridades de los entes encargados. La Tabla 13 muestra varias opciones disponibles.

Capítulo 5

5.1 Conclusiones y recomendaciones

5.1.1 Conclusiones

El proyecto estableció cinco fases para caracterizar la actual amenaza volcánica del Ecuador, donde se generó una clasificación preliminar de peligrosidad de los volcanes. Cada clasificación presentaba diferentes eventos o productos volcánicos, nivel de actividad y VEI máximo. Vale recalcar que en cada categoría hay distintas tipologías de volcán y ambientes de formación, además los volcanes no están distribuidos geográficamente por IPV. A través del proyecto, utilizando información científica actual:

- Se seleccionó la metodología de Nieto-Torres et al. (2021) para caracterizar la amenaza volcánica. La metodología tenía la mayor cantidad de parámetros, 13 en total, y abarca aspectos acerca de la historia eruptiva, características generales y actividad actual del volcán.
- Se caracterizó mediante el cálculo del IPV preliminar la peligrosidad de los volcanes potencialmente activos. Se clasificaron en cinco categorías: muy bajo, relativamente bajo, moderado, relativamente alto y muy alto. Se obtuvo que los volcanes con peligrosidad muy alta son Guagua Pichincha, Reventador, Tungurahua y Cotopaxi. Los volcanes del mismo nivel de peligrosidad no se encuentran concentrados en un área, están distribuidos en todo el Ecuador.
- Se propuso futuras actividades de campo y laboratorio según los parámetros de peligrosidad volcánica como estudios de tefroestratigrafía y uso de imágenes satelitales. Se plantearon varias opciones de actividades para cada parámetro, con ejemplos estudios realizados anteriormente.

5.1.2 Recomendaciones

El presente proyecto analiza la peligrosidad de los volcanes potencialmente activos del Ecuador y plantea actividades para complementar la información disponible.

Por lo tanto, se establecen las siguientes recomendaciones:

- Realizar un ranking de riesgo preliminar con los valores estimados. Se pueden adaptar los parámetros de los componentes de exposición y vulnerabilidad dependiendo de las prioridades del proyecto. Por ejemplo, en el caso de las Islas Galápagos uno de los parámetros puede ser la cantidad de especies endémicas en exposición.
- Trabajo colaborativo entre academia, sector público y privado para llevar a cabo las actividades de campo y laboratorio planteadas. De acuerdo con las prioridades de los actores claves se puede realizar un proceso analítico jerárquico (AHP) (Saaty, 1987) para seleccionar cuales propuestas son las más efectivas para llevar a cabo. La metodología AHP se ha utilizado para la toma de decisiones en varias ramas de ciencias e ingeniería incluyendo la evaluación de riesgos (Ding et al., 2020; Hoque et al., 2017) . Con la nueva información recopilada se puede estimar un IPV más preciso.
- Implementar la metodología de Nieto-Torres et al. (2021) en cuanto presenta limitaciones como la ambigüedad entre parámetros o ponderación poco apropiada, por ejemplo:
 - La ponderación del parámetro de flujos de lava y lahares es de uno si se han desplazado más allá del sitio de erupción o flancos y llegado a áreas pobladas. Pero la población más cercana varía entre volcanes. La presencia de población corresponde al componente de exposición del riesgo (UNDRR, 1991). Por ejemplo, el Pululahua tiene habitantes asentados en el interior del cráter, mientras hay otros volcanes como en las Islas Galápagos donde no hay población de referencia, como el volcán La Cumbre en Fernandina. Tampoco se considera características del flujo de lava como su volumen, velocidad, recurrencia o longitud.

- Los puntajes de los VEI máximos no son representativos de las diferencias entre las magnitudes de erupciones. Un volcán como el Reventador se le asigna una ponderación de 2 por un VEI de 3, mientras que un volcán como el Quilotoa se le asigna una ponderación de 3 por un VEI de 6. Tendrían solo un punto de diferencia cuando el VEI máximo del Quilotoa representa una erupción 10000 mayor en volumen.
- El parámetro de actividad freática obtiene una ponderación de uno si presenta características termale con suficiente extensión para presentar potencial para actividad explosiva. La extensión necesaria para presentar potencial de actividad explosiva es un criterio ambiguo. Además, se podría considerar sistemas de agua subterráneo, glaciaciones, lagos cratéricos. Algunos volcanes de la isla Isabela son propensos a formar lagos cratéricos pero sus dimensiones son pequeñas comparado a los glaciares del Cotopaxi. Por lo que se podría decir que ambos tienen potencial para explosiones freáticas por la presencia de agua, pero el Cotopaxi tendría mayor potencial que los volcanes en las Islas Galapágos.
- El parámetro de potencial de colapso tiene un puntaje de uno cuando el volcán ha producido colapso de sector y reconstrucción de su edificio, o tiene alto relieve, flancos empinados o alteración demostrada/inferida. El alto relieve o flancos empinados también es un término ambiguo.

Referencias

- Agrawal, N. (2018). *Natural Disasters and Risk Management in Canada*. 49. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1283-3>
- Aizprua, C., Witt, C., Reynaud, J. Y., Poujol, M., & Barba, D. (2022). Comment on “The Chongón/Colonche oroclinal transrotational bending and the coeval opening of the Progreso basin in southwestern Ecuador” by Alemán et al. *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103714. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2022.103714>
- Alberico, I., Lirer, L., Petrosino, P., & Scandone, R. (2002). A methodology for the evaluation of long-term volcanic risk from pyroclastic flows in Campi Flegrei (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116(1–2), 63–78. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00211-1)
- Alcorn, R., Panter, K. S., & Gorsevski, P. V. (2013). A GIS-based volcanic hazard and risk assessment of eruptions sourced within Valles Caldera, New Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.09.005>
- Alemán, A. M., Palencia, A. A., Lezama, E. E., & Montenegro, G. (2021). The Chongón/Colonche oroclinal transrotational bending and the coeval opening of the Progreso basin in southwestern Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103480. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2021.103480>
- Alloway, B. V., Lowe, D. J., Larsen, G., Shane, P. A. R., & Westgate, J. A. (2013). Quaternary Stratigraphy | Tephrochronology. *Encyclopedia of Quaternary Science: Second Edition*, 277–304. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00058-3>
- Andrade, M., Pimentel, A., Ramalho, R., Kutterolf, S., & Hernández, A. (2022). The recent volcanism of Flores Island (Azores): Stratigraphy and eruptive history of Funda

Volcanic System. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 432, 107706.
<https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2022.107706>

Andrade, S. D., Müller, A. V., Vasconez, F. J., Beate, B., Aguilar, J., & Santamaría, S. (2021). Pululahua dome complex, Ecuador: eruptive history, total magma output and potential hazards. *Journal of South American Earth Sciences*, 106.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103046>

Antonielli, B., Monserrat, O., Bonini, M., Righini, G., Sani, F., Luzi, G., Feyzullayev, A. A., & Aliyev, C. S. (2014). Pre-eruptive ground deformation of Azerbaijan mud volcanoes detected through satellite radar interferometry (DInSAR). *Tectonophysics*, 637, 163–177.
<https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2014.10.005>

Anzieta, J., Williams-Jones, G., Bernard, B., Ortiz, H. D., Vallejo, S., & Ruiz, M. (2021). Reviewing volcano hazard and risk communications in Ecuador: Experiences from a fast-format workshop. *Volcanica*, 4(2). <https://doi.org/10.30909/VOL.04.02.309324>

Arango-Galván, C., Pozzo, A. L. M. Del, Flores-Márquez, E. L., González-Morán, T., Vidal-Amaro, M., & Ruiz-Aguilar, D. (2020). Unraveling the complex structure of popocatepetl volcano (Central Mexico): New evidence for collapse features and active faulting inferred from geophysical data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107091. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2020.107091>

Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. In *Naciones Unidas*.
<http://undocs.org/es/A/RES/70/1>

Aucker, M. R., Sparks, R. S. J., Jenkins, S. F., Aspinall, W., Brown, S. K., Deligne, N. I., Jolly, G., Loughlin, S. C., Marzocchi, W., Newhall, C. G., & Palma, J. L. (2015).

Development of a new global Volcanic Hazard Index (VHI). In *Global Volcanic Hazards and Risk*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.024>

Bablon, M., Ratzov, G., Nauret, F., Samaniego, P., Michaud, F., Saillard, M., Proust, J. N., Le Pennec, J. L., Collot, J. Y., Devidal, J. L., Orange, F., Liorzou, C., Migeon, S., Vallejo, S., Hidalgo, S., Mothes, P., & Gonzalez, M. (2022). Holocene Marine Tephra Offshore Ecuador and Southern Colombia: First Trench-to-Arc Correlations and Implication for Magnitude of Major Eruptions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(9). <https://doi.org/10.1029/2022GC010466>

Barragán, R., & Baby, P. (2016). Evolución magmática actual de la zona subandina: volcanes El Reventador y Sumaco, modelos geodinámicos preliminares. In *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo*. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.3017>

Basofi, A., Fariza, A., & Safitri, E. I. (2018). Landslide risk mapping in east Java, Indonesia, using analytic hierarchy process-natural breaks classification. *2018 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems, ISRITI 2018*. <https://doi.org/10.1109/ISRITI.2018.8864367>

Bernard, B. (2017a). (A31) *Volcanes potencialmente activos en Ecuador - Volcanes del Ecuador*. <http://ceniza-ecuador.over-blog.com/2017/03/a31-volcanes-potencialmente-activos-en-ecuador.html>

Bernard, B. (2017b). *Clasificación de los volcanes del Ecuador parte 1: en base a su historia eruptiva*. <http://ceniza-ecuador.over-blog.com/2017/02/a28-clasificacion-de-los-volcanes-del-ecuador-parte-1-en-base-a-su-historia-eruptiva.html>

Bernard, B., Hidalgo, S., Robin, C., Beate, B., & Quijozaca, J. (2014). The 3640–3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast

produced by a satellite dome. *Bulletin of Volcanology*, 76(9). <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0849-z>

Bernard, B., Ramón, P., García, L., Hernandez, S., Vasconez, F. J., Viracucha, G., & Hidalgo, S. (2022). Volcanic event management in the Galápagos Islands, Ecuador. *Volcanica*, 5(1). <https://doi.org/10.30909/vol.05.01.209225>

Bernard, B., Samaniego, P., Tadini, A., Vasconez, F. J., & Hidalgo, S. (2024). Using recent activity to reconstruct eruptive history and develop hazard scenarios at Sangay volcano, Ecuador. *Cities on Volcanoes*.

Bernard, B., Santamaría, S., Hidalgo, S., & Alvarado, A. (2018). How adequate is the Ecuadorian volcanic surveillance system? Insights from threat analysis and monitoring network assessment. *Abstract Volume of the International Meeting Cities on Volcanoes 10*, 913. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2007\)8](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2007)8)

Bernard, B., Stock, M. J., Coppola, D., Hidalgo, S., Bagnardi, M., Gibson, S., Hernandez, S., Ramón, P., & Gleeson, M. (2019). Chronology and phenomenology of the 1982 and 2015 Wolf volcano eruptions, Galápagos Archipelago. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 374. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.02.013>

Bhan, S. K., & Krishnanunni, K. (1983). Applications of remote sensing techniques to geology. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section C: Engineering Sciences*, 6(4), 297–311. <https://doi.org/10.1007/BF02881136/METRICS>

Bignami, C. (2012). Handbook for volcanic risk management: Prevention, crisis management and resilience. In *Handbook for volcanic risk management: Prevention, crisis management and resilience*. MiaVita. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Bird, D. K., Gisladdottir, G., & Dominey-Howes, D. (2010). Volcanic risk and tourism in southern Iceland: Implications for hazard, risk and emergency response education and

training. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(1–2).
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.09.020>

Bonadonna, C., & Costa, A. (2012). Estimating the volume of tephra deposits: A new simple strategy. *Geology*, 40(5). <https://doi.org/10.1130/G32769.1>

Botzen, W. J. W., Aerts, J. C. J. H., & Van Den Bergh, J. C. J. M. (2009). Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors. *Water Resources Research*, 45(10). <https://doi.org/10.1029/2009WR007743>

Boudoire, G., Padeloup, G., Schiavi, F., Cluzel, N., Rafflin, V., Grassa, F., Giuffrida, G., Liuzzo, M., Harris, A., Laporte, D., & Rizzo, A. L. (2023). Magma storage and degassing beneath the youngest volcanoes of the Massif Central (France): Lessons for the monitoring of a dormant volcanic province. *Chemical Geology*, 634, 121603.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2023.121603>

Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: Analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(1).
<https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>

Bulois, C., Saillard, M., Espurt, N., Benítez, P. R., Michaud, F., Barba, D., Peuzin, A., Hernández Salazar, M. J., Schenini, L., Régnier, M., & Ratzov, G. (2023). Structural evolution of the southern Ecuadorian forearc in the Santa Elena Peninsula region. *Journal of South American Earth Sciences*, 130, 104503. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2023.104503>

Candra, I. N., Gerzabek, M. H., Ottner, F., Tintner, J., Wriessnig, K., & Zehetner, F. (2019). Weathering and soil formation in rhyolitic tephra along a moisture gradient on Alcedo Volcano, Galápagos. *Geoderma*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.051>

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2018). *Evaluación del Riesgo Relativo de los Volcanes de México*.

Chadwick, W. W., Jónsson, S., Geist, D. J., Poland, M., Johnson, D. J., Batt, S., Harpp, K. S., & Ruiz, A. (2011). The May 2005 eruption of Fernandina volcano, Galápagos: The first circumferential dike intrusion observed by GPS and InSAR. *Bulletin of Volcanology*, 73(6). <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0433-0>

Coltorti, M., & Ollier, C. D. (2000). Geomorphic and tectonic evolution of the Ecuadorian Andes. *Geomorphology*, 32(1–2), 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00036-7)

Cullen, A., & McBirney, A. R. (1987). The volcanic geology and petrology of Isla Pinta, Galapagos archipelago (Pacific). *Geological Society of America Bulletin*, 98(3). [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1987\)98<294:TVGAPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1987)98<294:TVGAPO>2.0.CO;2)

Dai, C., Howat, I. M., van der Sluijs, J., Liljedahl, A. K., Higman, B., Freymueller, J. T., Ward Jones, M. K., Kokelj, S. V., Boike, J., Walker, B., & Marsh, P. (2024). Applications of ArcticDEM for measuring volcanic dynamics, landslides, retrogressive thaw slumps, snowdrifts, and vegetation heights. *Science of Remote Sensing*, 9, 100130. <https://doi.org/10.1016/J.SRS.2024.100130>

Davidge, L., Ebinger, C., Ruiz, M., Tepp, G., Amelung, F., Geist, D., Coté, D., & Anzieta, J. (2017). Seismicity patterns during a period of inflation at Sierra Negra volcano, Galápagos Ocean Island Chain. *Earth and Planetary Science Letters*, 462. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.12.021>

De Silva, S., & Lindsay, J. M. (2015). Primary Volcanic Landforms. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 273–297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00015-8>

Decreto N°1738 (2009).

Deligne, N. I., Coles, S. G., & Sparks, R. S. J. (2010). Recurrence rates of large explosive volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(6). <https://doi.org/10.1029/2009JB006554>

Ding, G., Xin, L., Guo, Q., Wei, Y., Li, M., & Liu, X. (2020). Environmental risk assessment approaches for industry park and their applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 159, 104844. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.104844>

Earle, S. (2019). Types of volcanoes. *Physical Geology-2nd Edition*.

Ewert, J. W. (2007). System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes. *Natural Hazards Review*, 8(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1527-6988\(2007\)8:4\(112\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1527-6988(2007)8:4(112))

Fariza, A., Rusydi, I., Hasim, J. A. N., & Basofi, A. (2017). Spatial flood risk mapping in east Java, Indonesia, using analytic hierarchy process - Natural breaks classification. *Proceedings - 2017 2nd International Conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering, ICITISEE 2017, 2018-January*. <https://doi.org/10.1109/ICITISEE.2017.8285539>

Felpeto, A., Martí, J., & Ortiz, R. (2007). Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166(2), 106–116. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2007.07.008>

Fournier D'albe, E. M. (1979). Objectives of volcanic monitoring and prediction. *Journal of the Geological Society*, 136(3), 321–326. <https://doi.org/10.1144/GSJGS.136.3.0321>

Furlan, C. (2010). Extreme value methods for modelling historical series of large volcanic magnitudes. *Statistical Modelling*, 10(2). <https://doi.org/10.1177/1471082X0801000201>

Geist, D., Howard, K. A., Jellinek, A. M., & Rayder, S. (1994). The volcanic history of Volcán Alcedo, Galápagos Archipelago: A case study of rhyolitic oceanic volcanism. *Bulletin of Volcanology*, 56(4). <https://doi.org/10.1007/BF00302078>

Geist, D., White, W. M., Albarede, F., Harpp, K., Reynolds, R., Blichert-Toft, J., & Kurz, M. D. (2002). Volcanic evolution in the Galápagos: The dissected shield of Volcan Ecuador. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(10). <https://doi.org/10.1029/2002GC000355>

Giordan, D., Adams, M. S., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., De Berardinis, P., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, P., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotilio, M., Salvini, R., Segor, V., Sotier, B., & Troilo, F. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(7), 3437–3481. <https://doi.org/10.1007/S10064-020-01766-2/TABLES/15>

Global Volcanism Program. (2024). Global Volcanism Program. In *Volcanoes of the World*, v. 4.8.4. https://volcano.si.edu/volcanolist_countries.cfm?country=Ecuador

Goff, F., McMurtry, G. M., Counce, D., Simac, J. A., Roldán-Manzo, A. R., & Hilton, D. R. (2000). Contrasting hydrothermal activity at Sierra Negra and Alcedo volcanoes, Galapagos Archipelago, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 62(1). <https://doi.org/10.1007/s004450050289>

Griffiths, J. S. (2019). Advances in engineering geology in the UK 1950–2018. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 52(4), 401–413. <https://doi.org/10.1144/QJEGH2018-171/ASSET/32570216-498C-4840-84E1-F681C88FA024/ASSETS/IMAGES/LARGE/QJEGH2018-171.06.JPG>

Guimarães, L. F., Nieto-Torres, A., Bonadonna, C., & Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 2: Application to Latin America. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.757742>

Gunkel, G., Beulker, C., Grupe, B., & Viteri, F. (2008a). Hazards of volcanic lakes: Analysis of Lakes Quilotoa and Cuicocha, Ecuador. *Advances in Geosciences*, 14. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-29-2008>

Gunkel, G., Beulker, C., Grupe, B., & Viteri, F. (2008b). Hazards of volcanic lakes: Analysis of Lakes Quilotoa and Cuicocha, Ecuador. *Advances in Geosciences*, 14. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-29-2008>

Hall M. L., Beate B., y V. H. C. (1988). *Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el Volcán Tungurahua, Provincia de Tungurahua*.

Hall, M. L., & Mothes, P. A. (2010). New Active Rhyolitic Eruptive Centers, Eastern Foot of the Ecuadorian Andes. *Cities on Volcanoes 6th Meetings*.

Hall, M. L., Mothes, P. A., Samaniego, P., Militzer, A., Beate, B., Ramón, P., & Robin, C. (2017). Antisana volcano: A representative andesitic volcano of the eastern cordillera of Ecuador: Petrography, chemistry, tephra and glacial stratigraphy. *Journal of South American Earth Sciences*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.11.005>

Hall, M. L., Robin, C., Beate, B., Mothes, P., & Monzier, M. (1999). Tungurahua Volcano, Ecuador: Structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91(1–2). [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00047-5)

Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., & Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>

Hall, M. L., & Mothes, P. (2008). The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 70(6), 675–702. <https://doi.org/10.1007/S00445-007-0161-2/METRICS>

Hanif, M., Apichontrakul, S., & Razi, P. (2024). Surface Deformation Monitoring and Forecasting of Sinabung Volcano Using Interferometry Synthetic Aperture Radar and Forest-based Algorithm. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101288. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2024.101288>

Harpp, K. S., & Geist, D. J. (2021). The Galápagos Islands. *Encyclopedia of Geology: Volume 1-6, Second Edition*, 4, 659–673. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12084-6>

Hidalgo, S., Bernard, B., Mothes, P., Ramos, C., Aguilar, J., Andrade, D., Samaniego, P., Yepes, H., Hall, M., Alvarado, A., Segovia, M., Ruiz, M., Ramón, P., & Vaca, M. (2024). Hazard assessment and monitoring of Ecuadorian volcanoes: challenges and progresses during four decades since IG-EPN foundation. In *Bulletin of Volcanology* (Vol. 86, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01685-6>

Hidalgo, S., Monzier, M., Almeida, E., Chazot, G., Eissen, J. P., van der Plicht, J., & Hall, M. L. (2008). Late Pleistocene and Holocene activity of the Atacazo-Ninahuilca Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.05.017>

Hidalgo, S., Monzier, M., Martin, H., Chazot, G., Eissen, J. P., & Cotten, J. (2007). Adakitic magmas in the Ecuadorian Volcanic Front: Petrogenesis of the Iliniza Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159(4). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.007>

Hidalgo, S., Vasconez, F. J., Battaglia, J., Bernard, B., Espín, P., Valade, S., Naranjo, M. F., Campion, R., Salgado, J., Córdova, M., Almeida, M., Hernández, S., Pino, G., Gaunt, E., Bell, A., Mothes, P., & Ruiz, M. (2022). Sangay volcano (Ecuador): the opening of two new vents, a drumbeat seismic sequence and a new lava flow in late 2021. *Volcanica*, 5(2). <https://doi.org/10.30909/vol.05.02.295311>

Hoque, M. A. A., Phinn, S., Roelfsema, C., & Childs, I. (2017). Tropical cyclone disaster management using remote sensing and spatial analysis: A review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 345–354. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2017.02.008>

Indriyanto, J. N., Ohba, T., Hoshide, T., Angkasa, S. S., & Abdurrachman, M. (2023). Eruptive history of the last-1300-years activity of Kelud volcano, Indonesia: Inferences from stratigraphy, chronology, sedimentology, componentry, and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 433, 107723. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2022.107723>

INEC. (2010). *Censo de Población y Vivienda*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>

INEC. (2023). *Boletín Técnico Nacional*. https://inec.censoecuador.gob.ec/public/Boletin_Nacional.html

INEE. (2010). Normas mínimas para la educación: Preparación, respuesta, recuperación. In *Inter-Agency Network for Education in Emergencies* (Issue 2). INEE. <https://inee.org/es/recursos/normas-minimas-para-la-educacion-2010>

Instituto Geofísico - EPN. (2017). *Informe Especial Cerro Azul No. 1 - 2017*. <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1468-informe-especial-cerro-azul-no-1-2017>

Instituto Geográfico Militar. (2018). Atlas de Espacios Geográficos Expuestos a Amenazas Naturales Y Antrópicas. In *Primera Edición* (p. 121). <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/atlas-amenazas-antropicas/>

Jaillard, E. (2022). Late Cretaceous-Paleogene orogenic build-up of the Ecuadorian Andes: Review and discussion. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 230). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104033>

Jaillard, É., Ordoñez, M., Benitez, S., Berrones, G., Jiménez, N., Montenegro, G., & Zambrano, I. (1995). Basin Development in an Accretionary, Oceanic-Floored Fore-Arc Setting; Southern Coastal Ecuador During Late Cretaceous-Late Eocene Time. *Petroleum Basins of South America, January*. <https://doi.org/10.1306/m62593c32>

Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7(1).

Kerr, A. C., Aspden, J. A., Tarney, J., & Pilatasig, L. F. (2002). The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador: Geochemical and tectonic constraints. *Journal of the Geological Society*, 159(5), 577–594. <https://doi.org/10.1144/0016-764901-151>

Kósik, S., Németh, K., & Rees, C. (2022). Integrating LiDAR to unravel the volcanic architecture and eruptive history of the peralkaline Tūhua (Mayor Island) volcano, New Zealand. *Geomorphology*, 418, 108481. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2022.108481>

Krippner, J. B., Belousov, A. B., Belousova, M. G., & Ramsey, M. S. (2018). Parametric analysis of lava dome-collapse events and pyroclastic deposits at Shiveluch volcano, Kamchatka, using visible and infrared satellite data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 354, 115–129. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2018.01.027>

Le Pennec, J. L., Ruiz, A. G., Eissen, J. P., Hall, M. L., & Fornari, M. (2011). Identifying potentially active volcanoes in the Andes: Radiometric evidence for late Pleistocene-early Holocene eruptions at Volcán Imbabura, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06.002>

López-Saavedra, M., & Martí, J. (2023). Reviewing the multi-hazard concept. Application to volcanic islands. *Earth-Science Reviews*, 236, 104286. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2022.104286>

Loughlin, S. C., Sparks, S., Brown, S. K., Jenkins, S. F., & Vye-Brown, C. (2015). Global volcanic hazards and risk. In *Global Volcanic Hazards and Risk*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273>

Lowe, D. J. (2011). Tephrochronology and its application: A review. *Quaternary Geochronology*, 6(2), 107–153. <https://doi.org/10.1016/J.QUAGEO.2010.08.003>

Lowe, D. J., & Alloway, B. (2015). *Tephrochronology*. 783–799. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6304-3_19

Maio, L. Di, Dominguez, L., Frischknecht, C., Biass, S., Guimarães, L. F., & Nieto-torres, A. (2022). *Mapa Regional y Ranking de Riesgos Volcánicos de la Zona Volcánica Central de los Andes*. 176–181.

McBirney, A., & Williams, H. (1969). Geology and petrology of the Galápagos Islands. *Memoir of the Geological Society of America*, 118. <https://doi.org/10.1130/MEM118-p1>

McCormack, H., Thomas, A., & Solomon, I. (2011). The capabilities and limitations of satellite InSAR and terrestrial radar interferometry. *Fugro NPA Limited: Edenbridge, UK*.

Melati, M. D., Fan, F. M., & Athayde, G. B. (2019). Groundwater recharge study based on hydrological data and hydrological modelling in a South American volcanic aquifer. *Comptes Rendus Geoscience*, 351(6), 441–450. <https://doi.org/10.1016/J.CRTE.2019.06.001>

Miguélez, K. (2012). *Introducción a la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres*.

Mona, L., & Marenco, F. (2016). Lidar Observations of Volcanic Particles. *Volcanic Ash: Hazard Observation*, 161–173. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100405-0.00014-8>

Mothes, P. A., & Hall, M. L. (1991). *Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Quilotoa*.

Mothes, P. A., & Hall, M. L. (2008). Rhyolitic calderas and centers clustered within the active andesitic belt of Ecuador's Eastern Cordillera. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 3. <https://doi.org/10.1088/1755-1307/3/1/012007>

Mouginis-Mark, P. J., Rowland, S. K., & Garbeil, H. (1996). Slopes of Western Galapagos volcanoes from airborne interferometric radar. *Geophysical Research Letters*, 23(25), 3767–3770. <https://doi.org/10.1029/96GL03280>

Mulas, M., Cioni, R., Andronico, D., & Mundula, F. (2016). The explosive activity of the 1669 Monti Rossi eruption at Mt. Etna (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 328, 115–133. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2016.10.012>

Munro, D. C., & Rowland, S. K. (1996). Caldera morphology in the western Galápagos and implications for volcano eruptive behavior and mechanisms of caldera formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 72(1–2). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00076-3)

Naismith, A. K., Phillips, J., Barclay, J., Armijos, M. T., Watson, I. M., Chigna, W., & Chigna, G. (2024). Transitions: comparing timescales of eruption and evacuation at Volcán de Fuego (Guatemala) to understand relationships between hazard evolution and responsive action. *Journal of Applied Volcanology*, 13(1), 1–26. <https://doi.org/10.1186/S13617-023-00139-0/FIGURES/10>

Newhall, C. G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87(C2). <https://doi.org/10.1029/jc087ic02p01231>

Nieto-Torres, A., Guimarães, L. F., Bonadonna, C., & Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 1: Methodology. *Frontiers in Earth Science*, 9(August), 1–22. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.697451>

NOAA. (2023). *Natural Hazards Viewer*. <https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/>

Nordlie, B. E. (1973). Morphology and structure of the western galápagos volcanoes and a model for their origin. *Bulletin of the Geological Society of America*, 84(9). [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84<2931:MASOTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<2931:MASOTW>2.0.CO;2)

Pistolesi, M., Rosi, M., Cion, R., Cashman, K. V., Rossotti, A., & Aguilera, E. (2011). Physical volcanology of the post-twelfth-century activity at Cotopaxi volcano, Ecuador: Behavior of an andesitic central volcano. *Bulletin of the Geological Society of America*, 123(5). <https://doi.org/10.1130/B30301.1>

Plattner, T., Plapp, T., & Hebel, B. (2006). Integrating public risk perception into formal natural hazard risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(3). <https://doi.org/10.5194/nhess-6-471-2006>

Poncela, R., Santamarta, J. C., García-Gil, A., Cruz-Pérez, N., Skupien, E., & García-Barba, J. (2022). Hydrogeological characterization of heterogeneous volcanic aquifers in the Canary Islands using recession analysis of deep water gallery discharge. *Journal of Hydrology*, 610, 127975. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.127975>

Ramón, P., Vallejo, S., Mothes, P., Andrade, D., Váscquez, F. J., Yepes, H., Hidalgo, S., & Santamaría, S. (2021). Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, the Ecuadorian Seismology and Volcanology Service. *Volcanica*, 4. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.93112>

Reyes-Hardy, M. P., Aguilera Barraza, F., Sepúlveda Birke, J. P., Esquivel Cáceres, A., & Inostroza Pizarro, M. (2021). GIS-based volcanic hazards, vulnerability and risks assessment of the Guallatiri Volcano, Arica y Parinacota Region, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 109(February). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103262>

Rivera, A., & Bown, F. (2013). Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37°–46°S), Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 345–356. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2013.02.004>

Robin, C., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Mothes, P., & van der Plicht, J. (2008). Late Holocene phases of dome growth and Plinian activity at Guagua Pichincha volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.10.008>

Romero, J. E., Alloway, B. V., Gutiérrez, R., Bertín, D., Castruccio, A., Villarosa, G., Schipper, C. I., Guevara, A., Bustillos, J., Pisello, A., Daga, R., Montiel, M., Gleeman, E., González, M., Morgavi, D., Ribeiro Guevara, S., & Mella, M. (2021). Centennial-scale eruptive diversity at Volcán Calbuco (41.3°S; Northwest Patagonia) deduced from historic tephra cover-bed and dendrochronologic archives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 417, 107281. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2021.107281>

Rowland, S. K., Munro, D. C., & Perez-Oviedo, V. (1994). Volcán Ecuador, Galapágos Islands: erosion as a possible mechanism for the generation of steep-sided basaltic volcanoes. *Bulletin of Volcanology*, 56(4). <https://doi.org/10.1007/BF00302080>

Ruíz, A., Le Pennec, J., Hall, M., & Samaniego Pablo. (2005). *Mapa de los peligros volcánicos asociados con el Complejo Volcánico Imbabura*.

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Salas-Navarro, J., Stix, J., & de Moor, J. M. (2022). A new Multi-GAS system for continuous monitoring of CO₂/ CH₄ ratios at active volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 426, 107533. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2022.107533>

Salgado Loza, J. A., Mothes, P. A., & Córdova, M. D. (2021). New observations on the recent eruptive activity of Sumaco Volcano (Ecuador), based on geochronology, stratigraphy and petrography. *Journal of South American Earth Sciences*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103568>

Sallarès, V., & Charvis, P. (2003). Crustal thickness constraints on the geodynamic evolution of the Galapagos Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(3–4), 545–559. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00373-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00373-X)

Samaniego, P., Barba, D., Robin, C., Fornari, M., & Bernard, B. (2012). Eruptive history of Chimborazo volcano (Ecuador): A large, ice-capped and hazardous compound volcano in the Northern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 221–222. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.01.014>

Samaniego, P., Eissen, J. P., Le Pennec, J. L., Robin, C., Hall, M. L., Mothes, P., Chavrit, D., & Cotten, J. (2008). Pre-eruptive physical conditions of El Reventador volcano (Ecuador) inferred from the petrology of the 2002 and 2004-05 eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.004>

Sandoval, V., Voss, M., Flörchinger, V., Lorenz, S., & Jafari, P. (2023). Integrated Disaster Risk Management (IDRM): Elements to Advance Its Study and Assessment. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(3), 343–356. <https://doi.org/10.1007/S13753-023-00490-1/FIGURES/3>

Santamaría, S., & Bernard, B. (2018). Hierarchization of the volcanoes of continental and insular Ecuador based on their threat potential. *Abstract Volume of the International Meeting Cities on Volcanoes 10*, 906.

Santamaria, S., Quidelleur, X., Samaniego, P., Audin, L., Le Pennec, J. L., Hidalgo, S., Liorzou, C., & Guillou, H. (2023). Timing of Quaternary volcanism and its relationship with tectonics in the central segment of the Ecuadorian Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107895>

Scarpa, R., Tilling, R. I., & Blong, R. J. (1996). Volcanic hazards risk assessment. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, 675–698.

Selva, J., Acocella, V., Bisson, M., Caliro, S., Costa, A., Della Seta, M., De Martino, P., De Vita, S., Federico, C., Giordano, G., Martino, S., & Cardaci, C. (2019). Multiple natural hazards at volcanic islands: a review for the Ischia volcano (Italy). *Journal of Applied Volcanology* 2019 8:1, 8(1), 1–43. <https://doi.org/10.1186/S13617-019-0086-4>

Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. (2023). ¿Qué es ranking de riesgo? - Red Nacional de Vigilancia Volcánica. <https://rnvv.sernageomin.cl/que-es-ranking-de-riesgo/>

Shane, P., Nairn, I. A., Martin, S. B., & Smith, V. C. (2008). Compositional heterogeneity in tephra deposits resulting from the eruption of multiple magma bodies: Implications for tephrochronology. *Quaternary International*, 178(1), 44–53. <https://doi.org/10.1016/J.QUAINT.2006.11.014>

Siebert, L., Cottrell, E., Venzke, E., & Andrews, B. (2015). Earth's Volcanoes and Their Eruptions: An Overview. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 239–255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00012-2>

Siravo, G., Speranza, F., Mulas, M., & Costanzo-Alvarez, V. (2021). Significance of Northern Andes Terrane Extrusion and Genesis of the Interandean Valley: Paleomagnetic Evidence From the “Ecuadorian Orocline.” *Tectonics*, 40(7), e2020TC006684. <https://doi.org/10.1029/2020TC006684>

SNGR. (2015). Plan Específico de Gestión de Riesgo. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Spikings, R. A., Winkler, W., Hughes, R. A., & Handler, R. (2005). Thermochronology of allochthonous terranes in Ecuador: Unravelling the accretionary and post-accretionary history of the Northern Andes. *Tectonophysics*, 399(1–4), 195–220. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2004.12.023>

Stefanidis, S., & Stathis, D. (2013). Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, 68(2). <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0639-5>

Swanson, F. J., Batis Hartmut, W. W., Lexa, J., & Dymond, J. (1974). Geology of Santiago, Rábida, and Pinzón Islands, Galápagos. *Bulletin of the Geological Society of America*, 85(11). [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85<1803:GOSRAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85<1803:GOSRAP>2.0.CO;2)

Tadini, A., Azzaoui, N., Roche, O., Samaniego, P., Bernard, B., Bevilacqua, A., Hidalgo, S., Guillin, A., & Gouhier, M. (2022). Tephra Fallout Probabilistic Hazard Maps for Cotopaxi and Guagua Pichincha Volcanoes (Ecuador) With Uncertainty Quantification. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2). <https://doi.org/10.1029/2021JB022780>

Takahashi, R., Ogino, T., Ohmori, K., & Murayama, Y. (2023). Chemical and thermal changes in hot spring waters and fumarolic gases related to volcanic unrest at Meakandake volcano, Japan: Results of long-term geochemical monitoring from 1986 to 2022. *Journal of*

Volcanology and Geothermal Research, 443, 107934.
<https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2023.107934>

Thouret, J. C. (2010). Volcanic hazards and risks: A geomorphological perspective. In *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527.003>

Tibaldi, A., & Ferrari, L. (1992). Latest Pleistocene-Holocene tectonics of the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 205(1–3), 109–125. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90421-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90421-2)

Tibaldi, A., Pasquare, F. A., Papanikolaou, D., & Nomikou, P. (2008). Discovery of a huge sector collapse at the Nisyros volcano, Greece, by on-land and offshore geological-structural data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(2), 485–499.
<https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2008.06.014>

Tibaldi, A., Rovida, A., & Corazzato, C. (2007). Late Quaternary kinematics, slip-rate and segmentation of a major Cordillera-parallel transcurrent fault: The Cayambe-Afiladores-Sibundoy system, NW South America. *Journal of Structural Geology*, 29(4).
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.11.008>

Tilling, R. I. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 27, Issue 2). <https://doi.org/10.1029/RG027i002p00237>

Tilling, R. I. (1996). *Volcanoes*. US Department of the Interior, Geological Survey.

Tournigand, P. Y., Smets, B., Laxton, K., Dille, A., France, L., Chazot, G., Ho, C., Wauthier, C., Nicholson, E. J., Kasanzu, C. H., Msechu, M., & Kervyn, M. (2023). Remote volcano monitoring using crowd-sourced imagery and Structure-from-Motion photogrammetry: A case study of Oldoinyo Lengai's active pit crater since the 2007–08

paroxysm. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 443, 107918.
<https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2023.107918>

Turney, C. S. M., Lowe, J. J., Davies, S. M., Hall, V., Lowe, D. J., Wastegård, S., Hoek, W. Z., & Alloway, B. (2004). Tephrochronology of last termination sequences in Europe: a protocol for improved analytical precision and robust correlation procedures (a joint SCOTAV–INTIMATE proposal). *Journal of Quaternary Science*, 19(2), 111–120.
<https://doi.org/10.1002/JQS.822>

UNDRR. (1991). *Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options: a Manual for Policy Makers and Planners*. UN.

UNISDR. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. *Resolución Aprobada Por La Asamblea General El 3 de Junio de 2015*.

Urai, M., & Ishizuka, Y. (2011). Advantages and challenges of space-borne remote sensing for Volcanic Explosivity Index (VEI): The 2009 eruption of Sarychev Peak on Matua Island, Kuril Islands, Russia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 208(3–4), 163–168. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2011.07.010>

Vallejo, C., Spikings, R. A., Horton, B. K., Luzieux, L., Thomsen, T. B., & Winkler, W. (2019). Late cretaceous to miocene stratigraphy and provenance of the coastal forearc and Western Cordillera of Ecuador: Evidence for accretion of a single oceanic plateau fragment. *Andean Tectonics*, 209–236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00010-1>

Wachinger, G., Renn, O., Begg, C., & Kuhlicke, C. (2013). The risk perception paradox-implications for governance and communication of natural hazards. *Risk Analysis*, 33(6). <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01942.x>

Yamamoto, S., Kametani, N., Yoshimoto, M., Miyairi, Y., & Yokoyama, Y. (2023). Eruptive history of Mt. Fuji over the past 8000 years based on integrated records of lacustrine

and terrestrial tephra sequences and radiocarbon dating. *Quaternary Science Advances*, 12, 100091. <https://doi.org/10.1016/J.QSA.2023.100091>

Zhang, Z., Liu, X., & Wright, W. (2022). Spatiotemporal water dynamic modelling of Ramsar-listed lakes on the Victorian Volcanic Plains using Landsat, ICESat-2 and airborne LiDAR data. *Ecological Informatics*, 71, 101789. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2022.101789>

Zuzak, C., Mowrer, M., Goodenough, E., Burns, J., Ranalli, N., & Rozelle, J. (2022). The national risk index: establishing a nationwide baseline for natural hazard risk in the US. *Natural Hazards*, 114(2). <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05474-w>

Apéndice A

Ficha 1: Alcedo

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Shield
Max VEI	1 (Global Volcanism Program, 2024) 5 (Geist, 1994) The calculated height of the eruption plume is 23-30 km and the intensity is estimated to have been 1.2×10^8 kg/s [...] The volume of the subaerial exposures of the main tephra is 1.1 km³ [...] Our conservative estimate of the total volume of tephra is then 3.4 km³ (Geist, 1994) Alcedo is the only western shield that has documented Plinian-style activity, having erupted ~1 km³ of rhyolitic tephra and lava (dense rock equivalent) ~100,000 years ago (Geist et al., 1994, 1995). Geist et al. (1995) attribute the explosive behavior and evolved compositions to extensive crystallization of magma reservoirs in systems that are cooling (Harpp, 2018)
Recurrence rate VEI>3	Recurrencia de intervalo de erupciones explosivas con VEI 4 es de 9170 años (Loughlin, 2015)
Pyroclastic flows	
Lava flows	Alcedo has had one known historical eruption: a lava flow low on the southeast flank that appears in 1960 aerial photographs does not exist in a 1946 set (Geist, 1994)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	A geothermal reservoir of >260 °C underlies the entire SW sector of the caldera and has formed widespread fumaroles an phreatic explosion craters (Goff, 2000)
Collapse potential	As Volcán Alcedo grew, it built an elongate domal shield, which was partly truncated during repeated caldera-collapse and partial-filling episodes. (Geist, 1994) [...] The sequence of collapse scarps on the northwest side, the steep southern walls, and the northeast elongation of the caldera suggest to us that the caldera has been migrating to the south (Geist, 1994)
Primary source lahar	
Seismic unrest	Earthquakes occurred throughout the Isabela Island region, with persistent spatial clusters around Sierra Negra and Alcedo calderas and on the shallow marine shelf between Fernandina and Sierra Negra volcanoes (Figs. 1, 3). Seismicity is largely restricted to the uppermost 2 km of Sierra Negra; depths of earthquakes on Alcedo volcano and the shallow platform outside the array are not well constrained [...] The largest earthquakes occurred on Fernandina ($ML \leq 2.5$) and Alcedo ($ML \leq 3.3$), whereas the largest earthquakes on Sierra Negra were $ML \leq 1.5$ [...] Although earthquakes on Alcedo are outside our array and have largely indeterminate depths, we can correlate periods of seismic activity with deformation revealed in InSAR data. The number of events increases from 15 per month to 34 per month over the period December 2009 to March 2010 when the Alcedo caldera floor dropped by about 12 cm, after a ca. 2-year period of inflation (Davidge, 2017) Repeated unrest events without eruption occurred in Alcedo from 1992 to 2011 , where three of the events were all interpreted by the magma intrusion of platform-shaped sill deformation sources underground (Guo, 2019)

Ground deformation	Earthquakes occurred throughout the Isabela Island region, with persistent spatial clusters around Sierra Negra and Alcedo calderas and on the shallow marine shelf between Fernandina and Sierra Negra volcanoes (Figs. 1, 3). Seismicity is largely restricted to the uppermost 2 km of Sierra Negra; depths of earthquakes on Alcedo volcano and the shallow platform outside the array are not well constrained [...] The largest earthquakes occurred on Fernandina ($ML \leq 2.5$) and Alcedo ($ML \leq 3.3$), whereas the largest earthquakes on Sierra Negra were $ML \leq 1.5$ [...] Although earthquakes on Alcedo are outside our array and have largely indeterminate depths, we can correlate periods of seismic activity with deformation revealed in InSAR data. The number of events increases from 15 per month to 34 per month over the period December 2009 to March 2010 when the Alcedo caldera floor dropped by about 12 cm, after a ca. 2-year period of inflation (Davidge, 2017)
Degassing	Fumarolic activity is distributed along a 4 km long stretch of an E-W to WNW trending fault zone that forms a narrow bench along the lower slope of the southern caldera wall [...] two large fumaroles discharge from very young explosion craters on the south caldera wall approximately 60-80 m above the caldera floor. According to Green (1994), these fumaroles and craters formed in late 1993 to early 1994. [...] At approximately 11:30 a.m. on 7 February 1995, while preparing to sample near Laura fumarole, we heard a muffled explosion and simultaneously felt a small earthquake. Initially, we thought these were manifestations from Fernandina volcano which was erupting approximately 60 km to the northwest. On further reflection, we now believe that the earthquake and explosion were caused by a subterranean event which occurred within the Alcedo hydrothermal system [...] A geothermal reservoir of >260 °C underlies the entire SW sector of the caldera and has formed widespread fumaroles and phreatic explosion craters (Goff, 2000)

Ficha 2: Antisana

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato volcán compuesto
Max VEI	2 (GVP, 2024) Few pyroclastic deposits have been recognized in this part of the volcano, suggesting dominantly effusive recent activity (Bourdon, 2002)
Recurrence rate VEI>3	No se registran erupciones de VEI igual o más de 3 (GVP, 2024) Recurrencia de intervalo de erupciones explosivas con VEI 4 es de 3930 años (Loughlin, 2015)
Pyroclastic flows	The southeastern part represents the old edifice, which encompasses two-thirds of the volcano. It is composed of numerous volcanic breccia deposits, lava and pyroclastic flows whose eruptive history is totally unknown [...] Antisana's northwestern flank is composed of numerous similar lava flows, probably originating from the summit. The extremely fresh appearance of the lava flows suggests that they erupted in Holocene time. Few pyroclastic deposits have been recognized in this part of the volcano, suggesting dominantly effusive recent activity (Bourdon, 2002) Around the western base of the edifice (Antisana III), a large volcano-clastic apron has developed, comprised of thick sequences of tephra, lavas, pyroclastic flow units, debris flow deposits, and their detrital products (Hall, 2016)
Lava flows	The southeastern part represents the old edifice, which encompasses two-thirds of the volcano. It is composed of numerous volcanic breccia deposits, lava and pyroclastic flows whose eruptive history is totally unknown [...] Antisana's northwestern flank is composed of numerous similar lava flows, probably originating from the summit. The extremely fresh appearance of the lava flows suggests that they erupted in Holocene time. Few pyroclastic deposits have been recognized in this part of the volcano, suggesting dominantly effusive recent activity [...] Two important monogenetic lava flows seem related to the most recent activity of Antisana volcano; located a few kilometers away

		to the north from the main edifice, these are the Antisanilla y Potretillos lava flows, which are respectively 10 and 15 km long (Bourdon, 2002)
		Three distinct eruptive centers or edifices are recognized on Antisana (Antisana I, II, III). Antisana I: comprised of lava and breccia sequences that are inclined steeply (~35°) away to the SW. Antisana I's interior is extensively altered hydrothermally. (Hall, 2016) Antisana II: Principal lava sequences: Its lower flanks are also comprised of a thick series of older lava flows [...] The flows are generally 100-200 m wide, 5-20 m thick, and up to 4 km long. (Hall, 2016) The Cuyuja lavas: Perhaps the most interesting event in Antisana's history corresponds to the appearance of unusually long, chemically unique, andesitic lava flows, herein called the Cuyuja lava flows. They are traceable from the SE foot of Antisana II's edifice down the Quijos River valley for 73 km. Along this trajectory the flows have left numerous flat lava terraces, which today are the sites of Cuyuja, Baeza, Borja, Chaco, and Santa Rosa towns. (Hall, 2016) Antisana III: All Late Pleistocene and Holocene lava flows originated from this summit and flowed mainly to the N, W, and SW (Hall, 2016) TABLE 2. Dimensions and approximate ages of Antisana III's youngest lava flows and associated tephra units (Hall, 2016)
Lahars		In general, the displayed successions in these columns (Antisana III northwest sector) are comprised of a variable series of dark andesitic scoria and lithic lapilli and ash layers, occasional pumice tephra beds, lava flow units, and to a lesser degree lahar and glacial-fluvial units (Hall, 2016)
Tsunamis		
Phreatic potential?	explosion	Glacier 15 is located on the active Antisana volcano, the subject of this study. Antisana volcano is located in the Eastern Cordillera of the Ecuadorian Andes (0°28'S, 78°09'W) 40 km east of Quito and is one of the 17 glaciers inventoried by Hastenrath (Manciati, 2014) Glaciers, ice falls, and ice-covered rock faces characterize most flanks down to 4700-5100 m. During the 1960's glaciers covered ~26 km ² and had an estimated volume of 0.8 km³ , but during the past decades the ice limit has retreated upslope many hundreds of meters (Hall, 2016)
Collapse potential		Antisana II suffered a sector collapse about 15,000 years ago which was followed by the birth and growth of Antisana III (Hall, 2016) The volcano's development includes the formation and destruction of two older edifices (Antisana I and II) during a 400 ka period (Hall, 2016)
Primary lahar source		Lahar deposit was derived from the advancing near-coeval HHJ (Huagra-Halina) lava flow which transformed into a lahar along its course, a likely scenario given Antisana's large volume of snow and ice (Hall, 2016) Glaciers, ice falls, and ice-covered rock faces characterize most flanks down to 4700-5100 m. During the 1960's glaciers covered ~26 km ² and had an estimated volume of 0.8 km³ , but during the past decades the ice limit has retreated upslope many hundreds of meters (Hall, 2016)
Seismic unrest		Durante el año 2020, el volcán Antisana ha tenido una actividad interna baja (menos de 20 sismos por día, sin deformación notable) y no ha tenido actividad superficial particular (Bernard, 2020)
Ground deformation		Durante el año 2020, el volcán Antisana ha tenido una actividad interna baja (menos de 20 sismos por día, sin deformación notable) y no ha tenido actividad superficial particular (Bernard, 2020)
Degassing		Fumarole vents have not been identified on the edifice ; however mountaineers sometimes report the odor of SO₂ gas at the higher elevations (Hall, 2016)

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Caldera, erupción pliniana (Hidalgo, 2005) Grupo de domos de lava
Max VEI	5 (Global Volcanism Program, 2023) (Hidalgo, 2008)
Recurrence rate VEI>3	VEI 5: 320 BCE, 2490 BCE. VEI 4: 3490 VCE, 6910 BCE (Global Volcanism Program, 2023) The last two eruptive events (N5 and N6) took place at around 4400 ± 35 yr BP and 2270 ± 15 yr BP, producing huge plinian and pyroclastic flow deposits (VEI=5) (Hidalgo, 2008)
Pyroclastic flows	The intra caldera domes activity produced several plinian tephra²-fall and pyroclastic flow deposits . Almeida (1996) reported 6 different tephra levels (N 1 to N6). [...] 133 major and trace element whole-rock analyses of samples of lava flows, domes and pyroclastic deposits , have been carried out at the Université de Bretagne Occidentale. (Hidalgo, 2005). Explosive activity at ANVC during the Holocene produced thick tephra layers and huge pyroclastic flow deposits that have traveled several kilometers westward from the vent. (Hidalgo, 2008) El estudio de Hidalgo, 2008 incluye isopacas de las erupciones plinianas (N5 y N6). Los productos son principalmente caídas de tephra y depósitos de flujos piroclásticos [...] Parte de estos depósitos de flujos y caídas piroclásticas afloran en la vía Aloag Santo Domingo y en el sur de Quito. (Hidalgo, s.f) El principal peligro asociado al crecimiento de un domo de lava es su potencial inestabilidad y la consecuente formación de flujos piroclásticos de bloques y ceniza [...] Tanto el Atacazo-Ninahuilca como el Pululahua han dado lugar a la formación de grandes flujos piroclásticos de pómez, sobre todo en el período holocénico. [...] El Atacazo-Ninahuilca ha provocado grandes caídas de piroclastos en cinco ocasiones durante los últimos 12 mil años, la última vez hace 2.250 años, aproximadamente. (Andrade, 2012)
Lava flows	133 major and trace element whole-rock analyses of samples of lava flows, domes and pyroclastic deposits , have been carried out at the Université de Bretagne Occidentale. (Hidalgo, 2005)
Lahars	Una de las consecuencias principales de la deposición de una ignimbrita es la formación de grandes lahares . En efecto, al estar conformadas por ceniza y fragmentos de pómez, las ignimbritas se erosionan fácilmente con el agua de los ríos y las lluvias, lo que da lugar a la formación de lahares (flujos de lodo) (Andrade, 2012) Es posible encontrar depósitos que muestran la ocurrencia de lahares secundarios que se produjeron como efecto de la removilización de las ignimbritas depositadas durante las grandes erupciones explosivas. (Andrade, 2012)
Tsunamis	
Phreatomagmatic/phreatic explosion potential?cON	Existen evidencias de la presencia de un sistema hidrotermal activo, cuyas manifestaciones en superficie son la presencia de fumarolas en la base del Domo La Cocha y de aguas termales , llamadas Aguas Calientes en el flanco sur del edificio. (Hidalgo, s.f)
Collapse potential	It suffered a destabilization event, which produced a caldera type depression (Hidalgo, 2005) El principal peligro asociado al crecimiento de un domo de lava es su potencial inestabilidad y la consecuente formación de flujos piroclásticos de bloques y ceniza (Andrade, 2012)
Primary lahar source	Es posible que en épocas anteriores al Holoceno se hayan producido lahares primarios en el Atacazo-Ninahuilca, dado que el volcán se encontraba a la época cubierto por un manto glaciár. (Andrade, 2012)

Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	Los gases muestreados en estas fuentes presentan una firma geoquímica típica de sistemas asociados a volcanes. (Hidalgo, s.f.)

Ficha 4: Cerro Azul

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Volcán basáltico escudo
Max VEI	La erupción volcánica más grande descrita en el volcán Cerro Azul tuvo lugar en 1943 con un índice de explosividad volcánica de 3 (> 10 millones de m ³ de piroclastos emitidos) (IG, 2017).
Recurrence rate	VEI 3 1943 (Global Volcanism Program, 2023)
VEI>3	Recurrencia de intervalo de erupciones explosivas con VEI 4 es de 720 años (Loughlin, 2015)
Pyroclastic flows	
Lava flows	En los últimos 5000 años, su intensa actividad eruptiva ha cubierto con flujos de lava la mayoría de su superficie. En su caldera se encontraron lavas con más de 50 000 años de edad. [...] El máximo recorrido de estos flujos fue de 12 km desde su punto de emisión (que no es necesariamente la caldera sino que pueden generarse desde los flancos) con espesores que alcanzan 1-4 m. La presencia del volcán Sierra Negra al NE del volcán Cerro Azul representa un cambio de pendiente en la morfología. Flujos de lava que recorren en esta dirección cambian su curso hacia el NW o SE en el contacto Sierra Negra-Cerro Azul. Durante la erupción del 2008 los flujos de lava hasta 10 km por los flancos SE y E del volcán con un ancho promedio de 2-3 km. (IG, 2017). The flanks of Cerro Azul are covered with both aa (~60%) and pahoehoe (~40%) lava flows. Flows reach up to 12 km long and are 1±4 m thick, generally, depending on the local slope. (Naumman, 1999)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	A small cone or plug occupies the center of the crater, which contained a small lake during the 1991, 1993, and 1995 field seasons and was nearly full during the eruptive period in 1998. [...] Several episodes of volumetrically minor hydrovolcanism have punctuated the Hawaiian and Strombolian volcanism at Cerro Azul, both within the caldera and on the southern caldera rim. (Naumman, 1999)
Collapse potential	The nesting also indicates several stages of caldera collapse with different centers of collapse, followed by partial refilling. (Naumman, 1999) Sector collapse is known elsewhere in the Galapagos, in places such as the southwest flank of Cerro Azul volcano and other places also include the west face of Pinta and the west face of Santa Fe. (Hall,2006)
Primary lahar source	A small cone or plug occupies the center of the crater, which contained a small lake during the 1991, 1993, and 1995 field seasons and was nearly full during the eruptive period in 1998 (Naumman, 1999)
Seismic unrest	Se produjo un incremento de la actividad sísmica en la erupción del 29 de mayo del 2008, acompañado de flujos de lava. El 30 de mayo se registró un sismo de 3.7 de magnitud. (IG, 2017).

	En el 2017 hubo un incremento de la actividad sísmica en Sierra Negra y Cerro Azul. No ocurrió erupción. Los sismos se encuentran principalmente al suroeste del volcán, dentro de un radio de 20 km. (IG, 2017).
Ground deformation	Según los resultados del procesamiento de los datos radar del satélite Sentinel-1 realizado por Marco Bagnardi de la Universidad de Leeds, se observa una clara deformación del volcán Cerro Azul entre el 8 y el 20 de marzo de 2015. Esta deformación se caracteriza por una inflación del flanco sur-oriental del volcán de aproximadamente 14 cm y asociada a una deflación de la cumbre de aproximadamente 11.2 cm. (IG, 2017)
Degassing	El 30 de mayo se registró un sismo de 3.7 de magnitud con una emisión de SO₂ de 10.597 kt. La mayor emisión de SO₂ fue observada por el instrumento OMI el 31 de Mayo con 21.820 kt. [...] En el 2017 hubo un incremento de la actividad sísmica en Sierra Negra y Cerro Azul. No ocurrió erupción. Los sismos se encuentran principalmente al suroeste del volcán, dentro de un radio de 20 km. (IG, 2017).

Ficha 5: Cerro Negro

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato Volcán / Complejo Volcánico
Max VEI	Por el momento no existe un registro de erupciones Holocénicas en el CV-CCN , además del depósito de avalancha de escombros del Cerro Negro (Santamaría, 2017) 1936 Jul 17 Confirmed Eruption Max VEI: 2 (GVP)
Recurrence rate VEI>3	Por el momento no existe un registro de erupciones Holocénicas en el CV-CCN , además del depósito de avalancha de escombros del Cerro Negro (Santamaría, 2017) Recurrencia de intervalo de erupciones explosivas con VEI 4 es de 3990 años (Loughlin, 2015)
Pyroclastic flows	Estudios en marcha han confirmado que el flujo piroclástico que ocupa el valle al oeste de la caldera de este volcán tiene una edad de 3400 aAP aproximadamente (Calvache, 1998,com. pers.). Sin embargo, parece que esta erupción no tuvo mayor impacto en el Callejón Interandino, pues allí no se observa evidencia de este flujo ni de su supuesta caída de ceniza (Mothes, 1998) En el volcán Chiles se tienen pocos registros de flujos piroclásticos, mientras que en Cerro Negro existen depósitos de flujos piroclásticos más importantes como el conocido “Flujo de Mayasquer” que alcanza 8.5 km, lo que indica la posibilidad de tales eventos en una futura erupción (IG, ¿?) Episodios efusivos y piroclásticos: Depósitos piroclásticos de obsidiana, pómez y ceniza. Lavas andesíticas con textura cordada y en bloques. (García, 2019) Cerro Negro consists both lavas and pyroclastics (including ignimbrite) and debris avalanches associated with the collapse of the flank (Taussi, 2023)
Lava flows	Volcán Chiles and Cerro Negro de Mayasquer are stratovolcanoes that straddle the Ecuador–Colombian border and have had no recorded historical eruptions. Volcán Chiles last erupted about 160,000 yr ago whilst andesitic and dacitic lava flows in Cerro Negro caldera are possibly of Holocene age (Ebmeier, 2016) Episodios efusivos y piroclásticos: Depósitos piroclásticos de obsidiana, pómez y ceniza. Lavas andesíticas con textura cordada y en bloques. [...] El edificio volcánico del VCN es una secuencia de flujos de lava y flujos piroclásticos emplazados en 5 episodios (García, 2019) Cerro Negro consists both lavas and pyroclastics (including ignimbrite) and debris avalanches associated with the collapse of the flank (Taussi, 2023)

Lahars	Todos los afloramientos rocosos corresponden a lavas y los afloramientos de materiales no litificados incluyen depósitos de sedimento glacial (morrenas), depósitos volcanoclásticos (lahares y flujos piroclásticos) y depósitos de talus (Resumen de las características de los afloramientos visitados en el área de estudio en la Tabla 3) (García, 2019)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	El cráter del volcán Cerro Negro contendría un pequeño lago cratérico caliente , con 82°C de temperatura, de donde se escapaban gases de H ₂ S y CO ₂ . Igualmente, hacia la orilla del lago y en la pared oriental del cráter indican la presencia de solfataras, con varios puntos de coloración amarilla por el azufre precipitado (Monsalve, 2016)
Collapse potential	The most significant morphological features are horseshoe-shaped collapsing structures affecting the northern slope of Chiles and the western slope of Cerro Negro, respectively [...] Cerro Negro consists both lavas and pyroclastics (including ignimbrite) and debris avalanches associated with the collapse of the flank (Taussi, 2023)
Primary lahar source	El cráter del volcán Cerro Negro contendría un pequeño lago cratérico caliente (Monsalve, 2016)
Seismic unrest	Desde inicios del 2013, en la zona del CVChCN se registró (por parte del IGEPN y OVSPasto) sismos denominados “volcano-tectónicos” (asociados a fracturamiento al interior del sistema volcánico), algunos de ellos con magnitudes entre 3 y 5,6, sentidos por la población en la zona. Adicionalmente, se tienen registro de sismos de origen volcánico, deformación y algunos cambios en las fuentes termales, como fluctuaciones en pH y temperatura, aumento de concentraciones de CO₂, salida de Azufre elemental, entre otros (Monsalve, 2016) The first measured unrest near Chiles–Cerro Negro volcanoes took place in 2013–2014 and consisted of three episodes of VT seismicity and a brief period of uplift in October 2014. After a Mw 5.6 earthquake on 20th October 2014, uplift ceased and seismicity began to fall (Ebmeier, 2016) Muchos epicentros en el área corresponden a enjambres energéticos relacionados a actividad de los volcanes Chiles-Cerro Negro durante 2013-2015, pero también se observa sismicidad dispersa con tendencia general SE-NW que probablemente se origina en varias de las fallas y segmentos de fallas documentadas en la región (Bocanegra, 2017) Desde el 27 de mayo de 2022 se registra un nuevo incremento en la actividad sísmica de la zona del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro y sus alrededores, que incluye la ocurrencia de sismos asociados con fallamiento frágil en la roca (sismos tipo volcano-tectónico) y con sismos relacionados con actividad de fluidos (sismos tipo largo-período). Estos últimos con profundidades más someras que las registradas en los años anteriores. Esta actividad alcanzó un pico en la mañana del 25 de Julio con un sismo de magnitud 5.6 Mw (magnitud momento) y sus réplicas (IG, 2022) More recently, another seismic swarm (up to 147,000 events, mainly with ML < 3.6; IG-EPN, 2019b) occurred from September 2018 to July 2019 (Taussi, 2023) Del seguimiento de la actividad de los VOLCANES CHILES Y CERRO NEGRO, el MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, a través del SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC), informa que: En la semana comprendida entre el 16 y el 22 de enero de 2024, se mantuvieron niveles de sismicidad bajos, tanto en ocurrencia como en energía liberada, similares a los registrados para la semana anterior. La sismicidad predominante continúa siendo la relacionada con fracturamiento de roca del edificio volcánico (SGC, 2024)
Ground deformation	Las bases geodésicas de cGPS ubicadas en las cercanías del volcán Chiles registran actualmente patrones de deformación en los flancos del volcán (IG, 2022) Se mantienen los procesos de deformación volcánica, de acuerdo con los registros de los sensores instalados en el terreno y sensores remotos satelitales (SGC, 2024)

Degassing	El cráter del volcán Cerro Negro contendría un pequeño lago cratérico caliente, con 82°C de temperatura, de donde se escapaban gases de H ₂ S y CO ₂ . Igualmente, hacia la orilla del lago y en la pared oriental del cráter indican la presencia de solfataras, con varios puntos de coloración amarilla por el azufre precipitado (Monsalve, 2016)
------------------	--

Ficha 6: Chacana

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Caldera
Max VEI	0
Recurrence rate VEI>3	
Pyroclastic flows	La caldera Chacana presenta también actividad desde el Pleistoceno al presente con flujos piroclásticos y secuencias volcánicas que han entrado en el Callejón Interandino entre Pintag y El Quinche (Villares, 2010)
Lava flows	Lavas vítreas, tobas soldadas e ignimbritas, de composición dacítica a riolítica, comprenden los flancos externos del edificio. Brechas y tobas rellenan la depresión de la caldera, las cuales están cubiertas por extensos flujos de lava dacítica, seguida por sedimentos. Una resurgencia o levantamiento ocurrió entre 1.5 y 0.44 Ma y elevó estos sedimentos lacustres y fluviales hasta una altura de más de 4000 msnm. Esta resurgencia precedió y aparentemente resultó en la actividad volcánica muy explosiva (riolítica) que empezó hace 210 mil años, que generó flujos y caídas de pómez en los sectores de Pintág, Pifo, y Quinche, así como el gran derrame de lava de Cuyuja y Baeza. En las erupciones de los 180 – 165 mil años, cayó un extenso depósito de pómez en toda la región, lo que fue seguido por grandes flujos de obsidiana dentro de la caldera. Varios flujos de lava de composición dacítica y andesítica han sido erupcionados desde una franja de fracturas en la caldera durante los últimos 40 mil años, el último siendo en 1760 en Papallacta. (IG, s.f) Outward-sloping packages of ignimbrites, lava flows, and tuffs comprise the north, west, and southwest outer flanks (Hall, 2008) Los últimos eventos volcánicos de la Caldera Chacana corresponden a la emisión de dos flujos de lava históricos de composición andesita ácida, bastante parecidos entre sí y que son los flujos Pinantura y Papallacta depositados en 1728 y 1773 respectivamente (Beate, 2009) Actividad post colapso – Flujos de lava históricos: Piñantura (1728 DC) Papallacta (1773 DC): La caldera Chacana ha emitido dos flujos de lava en los últimos 300 años. Uno de ellos se encuentra en el flanco exterior de la caldera (Flujo Pinantura) y el otro en el interior (Flujo Papallacta) (Villares, 2010) Flujo Pinantura: Desciende hacia el SW por el valle glaciar Muerte Pungo hasta la quebrada El Lisco, en donde cambia de dirección y fluye hacia el NW. Su centro de emisión está ubicado en el sector de Muerte Pungo, en donde, la acumulación de lava obstruye el drenaje y forma la Laguna de Muerte Pungo al Norte del flujo. (Villares, 2010) Flujo Papallacta: Desciende por el valle del Río Tumiguina entre la Serie Tablones y el Cerro Cojanco, en este último se encuentra el centro de emisión, en una roca caja de andesitas y dacitas negras. Hacia el Este, el final del flujo choca con las series riolíticas tempranas, represa el drenaje del Río Tambo y forma la Laguna Papallacta. En el otro extremo, en cambio, represa el drenaje del valle Tumiguina y forma la Laguna Tumiguina (Villares, 2010)
Lahars	Flanco exterior de la Caldera- Serie Tablones- Depósitos de lahars: Está en la Loma Machipungo, en el sector de Rodeocunga y en la base de la loma Quincharrumi [...] Carrasco (1987) describe a estas rocas como aglomerados volcánicos y flujos laháricos. Las incluye dentro de la Secuencia Volcánica Limpichic (Unidad VIII). En la Hoja Geológica de Pintag (DGGM 1981-1983) está considerado dentro de los volcánicos indiferenciados pliocénicos asignados a la Fm. Pisayambo (Villares, 2010)

Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	Los periodos de glaciación han dejado rasgos característicos como valles colgados, circos y morrenas laterales, frontales y terminales que se encuentran distribuidas en los valles del Tambo, Cachiyacu, Salve Faccha y Oyacachi (Pilicita, 2013)
Collapse potential	The caldera rim is irregular in shape and height, but where best developed on the west side it has a height of 500 m. The central depression is everywhere filled, first by ignimbrites, tuffs, and breccias of siliceous nature associated with the volcanism of the outer flanks, and later by post-collapse volcanism consisting of lava emissions of intermediate composition and subsequently by detrital sediments. Post-collapse resurgence began sometime after 0.44 Ma and has uplifted these infilling sediments to heights that define the present continental divide (4200 m) (Hall, 2008)
Primary lahar source	Los periodos de glaciación han dejado rasgos característicos como valles colgados, circos y morrenas laterales, frontales y terminales que se encuentran distribuidas en los valles del Tambo, Cachiyacu, Salve Faccha y Oyacachi (Pilicita, 2013)
Seismic unrest	Actividad hidrotermal y sísmica (IG, s.f.)
Ground deformation	
Degassing	Actividad hidrotermal y sísmica (IG, s.f.)

Ficha 7: Chachimbiri

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Stratovolcano Compound volcano (Bernard, 2014)
Max VEI	3 (3640-3510 BC) According to the total volume of tephra (73–82×106 m3) the eruption must be considered moderate to large with a Volcanic Explosivity Index of 3 (Newhall and Self 1982). This eruption is the largest Holocene eruption of Chachimbiri volcano (Bernard, 2014) The directed blast was followed by a sub-Plinian eruption that produced a 7–11×106 m3 (DRE) fallout deposit in Chachimbiri highlands (Bernard, 2014)
Recurrence rate VEI>3	Daticiones de erupciones en 3640-3510 AC y de 5690 AC (Bernard, 2011)
Pyroclastic flows	El Tumbatu (segundo edificio del Chachimbiri) se caracteriza por la extrusión de domos dacíticos que emitieron grandes flujos piroclásticos de tipo “ceniza y bloques”. [...] Estos productos se encuentran en Cahuasqui y en la zona de Tumbabiro. [...] La explosión dirigida de 3640-3510 años AC: En la parroquia de Urcuquí se encuentra un depósito piroclástico con un espesor que varía de pocos decímetros a más de 6 metros y cubre más de 50 km2 (Bernard, 2011) The eruption, dated between 3640 and 3510 years BC, extruded a ~650-m-wide and ~225-m-high rhyodacite dome [...] The high velocity (>120 m s⁻¹) pyroclastic density current produced by dome decompression traveled more than 10 km and was able to cross several deep valleys and overpass a >200 m high hill 8 km from the source. It spread over 62 km2 and destroyed a large area of the Urcuquí district, burying remains of human settlements. The directed blast was followed by a sub-Plinian eruption that produced a 7–11×106 m3 (DRE) fallout deposit in Chachimbiri highlands (Bernard, 2014)

Lava flows	The Chachimburo project area is located in the Chachimburo volcanic complex, composed of andesitic lava flows and pyroclastic deposits associated with dacitic domes (Calderón, 2014)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	This complex (Chachimburo geothermal field) is characterized by a set of mixed chloride-bicarbonate warm springs , with temperatures between 25 and 61°C, located up to 5.5 km apart from each other. In addition, this area of interest has cold gas manifestations with hydrothermal alteration in its higher topographical zones. (Calderón, 2014) La zona es famosa por sus fuentes de agua termal, manifestaciones de un sistema hidrotermal activo (Bernard y Robin, s.f)
Collapse potential	El Huanguillaro (primer edificio del Chachimburo) fue destruido por un deslizamiento gigante , generando un depósito de avalancha de más de 25 km desde la fuente. [...] Chachimburo ha tenido tres grandes episodios de construcción y dos episodios de destrucción (Bernard, 2011) In the first stage an Andesitic stratovolcano was formed with big effusive flows of lava streaming radially from the eruptive centre. After the formation, the volcano suffered a collapse and generated a debris avalanche flowing towards the east . These events occurred in medium Pleistocene between 500,000 and 300,000 years ago. [...] In the second stage, andesitic and dacitic domes were formed by eruptions in the collapsed caldera. A second landslide occurred flowing to the east with an escarpment associated with the first collapse (Calderón, 2014)
Primary lahar source	This complex (Chachimburo geothermal field) is characterized by a set of mixed chloride-bicarbonate warm springs , with temperatures between 25 and 61°C, located up to 5.5 km apart from each other. In addition, this area of interest has cold gas manifestations with hydrothermal alteration in its higher topographical zones. (Calderón, 2014) La zona es famosa por sus fuentes de agua termal, manifestaciones de un sistema hidrotermal activo (Bernard y Robin, s.f)
Seismic unrest	Un estudio sismológico reciente ha mostrado que ocurren numerosos sismos en la zona pero que son demasiado pequeños (<M2.5) para ser sentidos por la población. Sin embargo, no se sabe si esa actividad se relaciona con una falla tectónica o con actividad magmática (Bernard y Robin, s.f)
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 8: Chaupiloma

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Domos (Bernard, 2017)
Max VEI	
Recurrence rate VEI>3	Se conoce que su actividad más reciente se desarrolló aproximadamente entre los 15000 y 6300 años AP en base a estratigrafía glaciar y tefrocronología (Bernard, 2017)
Pyroclastic flows	Este centro volcánico está compuesto por varios domos riolíticos cubiertos por flujos piroclásticos (Bernard, 2017)
Lava flows	
Lahars	

Tsunamis
Phreatic explosion potential?
Collapse potential
Primary lahar source
Seismic unrest
Ground deformation
Degassing

Ficha 9: Chiles

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato Volcán / Complejo Volcánico
Max VEI	Por el momento no existe un registro de erupciones Holocénicas en el CV-CCN , además del depósito de avalancha de escombros del Cerro Negro (Santamaría, 2017) 1936 Jul 17 Confirmed Eruption Max VEI: 2 (GVP)
Recurrence rate VEI>3	Por el momento no existe un registro de erupciones Holocénicas en el CV-CCN , además del depósito de avalancha de escombros del Cerro Negro (Santamaría, 2017)
Pyroclastic flows	En el volcán Chiles se tienen pocos registros de flujos piroclásticos , mientras que en Cerro Negro existen depósitos de flujos piroclásticos más importantes como el conocido “Flujo de Mayasquer” que alcanza 8.5 km, lo que indica la posibilidad de tales eventos en una futura erupción (s.f.)
Lava flows	Episodios efusivos y piroclásticos: Lavas andesíticas masivas compuestas principalmente por plagioclasas y piroxenos [...] La actividad predominantemente efusiva del VC ha sido caracterizada como una secuencia de seis episodios de franjas de lavas (García, 2019) Chiles volcano activity was mostly effusive and produced thick lava flows between 500 and 5 ka (Taussi, 2023)
Lahars	Todos los afloramientos rocosos corresponden a lavas y los afloramientos de materiales no litificados incluyen depósitos de sedimento glacial (morrenas), depósitos volcanoclásticos (lahares y flujos piroclásticos) y depósitos de talus (Resumen de las características de los afloramientos visitados en el área de estudio en la Tabla 3) (García, 2019)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	En el siglo XIX la presencia de fumarolas estuvo posiblemente asociada a actividad eruptiva entre 1850 y 1860, la cual es señalada algunas veces hacia el sector de las Lagunas Verdes en el flanco sur del volcán (en el Ecuador). Según las condiciones actuales del área, éstas podrían haber sido erupciones menores de tipo freático a freatomagmático (Monsalve, 2016) Identifican dos fuentes termales importantes en el VC, estas son: Aguas Hediondas (AH) y Baños Chiles (BC). (García, 2019) “...Sigue el Chiles (Lat. 0°54'N. Long. 77° 53'W., 4.470 metros) en la frontera con el Ecuador, con su monte de nieve y hielo , y con una gran caldera sin señales de actividad en su parte inferior” (Ramírez, 1975) (Monsalve, 2016) Este autor, al hacer el resumen de la actividad de los volcanes de Colombia, incluye al Cerro Negro de Mayasquer, anotando que está en el grupo de los “volcanes con magma o explosiones freáticas conocidas” . Pero en el mapa de localización que denomina “zona volcánica terciaria” es Chiles el que está incluido dentro de este grupo (Monsalve, 2016)

Collapse potential	The most significant morphological features are horseshoe-shaped collapsing structures affecting the northern slope of Chiles and the western slope of Cerro Negro, respectively (Taussi, 2023)
Primary source	lahar “...Sigue el Chiles (Lat. 0°54’N. Long. 77° 53’W., 4.470 metros) en la frontera con el Ecuador, con su monte de nieve y hielo , y con una gran caldera sin señales de actividad en su parte inferior” (Ramírez, 1975) (Monsalve, 2016)
Seismic unrest	Desde inicios del 2013, en la zona del CVChCN se registró (por parte del IGEPN y OVSPasto) sismos denominados “volcano-tectónicos” (asociados a fracturamiento al interior del sistema volcánico), algunos de ellos con magnitudes entre 3 y 5,6, sentidos por la población en la zona. Adicionalmente, se tienen registro de sismos de origen volcánico, deformación y algunos cambios en las fuentes termales, como fluctuaciones en pH y temperatura, aumento de concentraciones de CO₂, salida de Azufre elemental, entre otros [...] Desde finales de 1923 y comienzos de 1924, en la zona del CVChCN, se registró una importante sismicidad; en algunos casos, los sismos fueron asociados por la población a actividad eruptiva del volcán Chiles. Al respecto, en la página web del IGEPN (http://www.igepn.edu.ec/index.php/un-dia-como-hoy) se encuentra: “14/12/1923. Terremoto con grave afectación en la provincia del Carchi [...] Testigos presenciales afirmaron haber visto actividad eruptiva en el volcán Chiles, hacia el lado occidental.” (Monsalve, 2016) In October 2013, a seismic swarm consisting of >1000 recorded events per day occurred 2–6 km south of Chiles. Two further VT swarms took place in February–May 2014 and September–December 2014 [...] The 2014 VT swarms had increasing duration and event rate, but were separated by periods of low-level seismicity of the order of 10s to 100s of events per day. [...] After a Mw 5.6 earthquake on 20th October 2014, uplift ceased and seismicity began to fall (Ebmeier, 2016) Muchos epicentros en el área corresponden a enjambres energéticos relacionados a actividad de los volcanes Chiles-Cerro Negro durante 2013-2015, pero también se observa sismicidad dispersa con tendencia general SE-NW que probablemente se origina en varias de las fallas y segmentos de fallas documentadas en la región (Bocanegra, 2017) More recently, another seismic swarm (up to 147,000 events, mainly with ML < 3.6; IG-EPN, 2019b) occurred from September 2018 to July 2019 (Taussi, 2023) Desde el 27 de mayo de 2022 se registra un nuevo incremento en la actividad sísmica de la zona del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro y sus alrededores, que incluye la ocurrencia de sismos asociados con fallamiento frágil en la roca (sismos tipo volcano-tectónico) y con sismos relacionados con actividad de fluidos (sismos tipo largo-período). Estos últimos con profundidades más someras que las registradas en los años anteriores. Esta actividad alcanzó un pico en la mañana del 25 de Julio con un sismo de magnitud 5.6 Mw (magnitud momento) y sus réplicas (IG, 2022)
Ground deformation	Del seguimiento de la actividad de los VOLCANES CHILES Y CERRO NEGRO, el MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, a través del SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC), informa que: En la semana comprendida entre el 16 y el 22 de enero de 2024, se mantuvieron niveles de sismicidad bajos, tanto en ocurrencia como en energía liberada, similares a los registrados para la semana anterior. La sismicidad predominante continúa siendo la relacionada con fracturamiento de roca del edificio volcánico (SGC, 2024) Las bases geodésicas de cGPS ubicadas en las cercanías del volcán Chiles registran actualmente patrones de deformación en los flancos del volcán (IG, 2022) Se mantienen los procesos de deformación volcánica, de acuerdo con los registros de los sensores instalados en el terreno y sensores remotos satelitales (SGC, 2024)
Degassing	Strong bubbling gases occur in various hot springs such as Aguas Hediondas and Aguas Negras (Taussi, 2023)

Ficha 10: Chimborazo

Type of volcanic hazard

Volcano type	Estrato volcán compuesto
Max VEI	
Recurrence rate VEI>3	Durante el Holoceno, la actividad del Chimborazo ha sido caracterizada por al menos 7 eventos explosivo de pequeña magnitud, cuyos depósitos cubren los flancos Este y Norte del volcán [...] En base a las dataciones realizadas podemos estimar un periodo de recurrencia de al menos 1 evento explosivo cada milenio, durante los últimos 7-8000 años y que la última erupción habría ocurrido entre 1200 y 1500 aAP. (Barba, 2006) The Chimborazo eruptive activity consisted of small-volume explosive events that occurred at quite regular intervals, between about 8000 and 1000 yr ago (Samaniego, 2012) Recurrencia de intervalo de erupciones explosivas con VEI 4 es de 22700 años (Loughlin, 2015)
Pyroclastic flows	The youngest edifice, CH-III, is the highest summit of the complex. It is awell-preserved andesitic stratocone (lava flows, pyroclastic flows, surge, and tephra deposits) constructed on CH-I and CH-II lavas. (Bernard, 2008) The products of this edifice (Basal Edifice CH-I) are represented by two thick sequences of lava flows, two notable pyroclastic flow units, and the Riobamba debris avalanche deposit (Samaniego, 2012) Representados en el sketch geológico de Samaniego, 2012
Lava flows	The youngest edifice, CH-III, is the highest summit of the complex . It is awell-preserved andesitic stratocone (lava flows, pyroclastic flows, surge, and tephra deposits) constructed on CH-I and CH-II lavas. (Bernard, 2008) The products of this edifice (Basal Edifice CH-I) are represented by two thick sequences of lava flows, two notable pyroclastic flow units, and the Riobamba debris avalanche deposit (Samaniego, 2012) Representados en el sketch geológico de Samaniego, 2012
Lahars	Se han encontrado dos depósitos de lahar rojo, uno al norte y otro al suroeste, los que posiblemente comparte el mismo origen y edad. La localidad tipo se encuentra en el sector de Huayhuayacu (flanco norte). (Barba, 2006) Lahar deposits crop out over the north, west and southwest catchment areas, with an overall surface area of 8 km2 . The catchment area of the Río Colorado valley contains ubiquitous, red-coloured lahar deposits, which overlie moraines of the YD period and underlie those of the Neo-glacial period [...] These lahar deposits were associated with the first two explosive events of Chimborazo during the Holocene (Samaniego, 2012) Representados en el sketch geológico de Samaniego, 2012
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	La presencia del casquete glaciar en la cumbre, la fuerte pendiente de sus flancos y su ubicación tan cercana a las zonas pobladas de Riobamba y Ambato, son factores que resultan en un riesgo potencial elevado (IG, s.f.) Paralelamente con la construcción del, CH III (Edificio más joven) ocurrieron varios episodios de glaciación, los más importantes son: maxi glacial de 33- 14 ka AP, tardi - glaciar de 12 - 10 ka AP y el neo-glaciar desde 5 ka AP al presente (Barba, 2006)
Collapse potential	Es un volcán compuesto por tres edificios sucesivos. El edificio Basal, principalmente efusivo, que habría estado activo entre 120 y 60 mil años antes del presente. Su construcción se habría dado en dos etapas, siendo la última la formación de un complejo de domos. Este edificio fue afectado por un gran colapso sectorial ocurrido hace 60-65 mil años, el mismo que produjo una avalancha de escombros cuyo depósito está distribuido sobre la planicie de la ciudad de Riobamba (IG, s.f.) Fault activity is thus the most likely candidate for a collapse trigger (Bernard, 2008)

Primary lahar source	Periglacial melting processes can provide the water source for secondary lahars triggered by volcanic and/or meteorological phenomena on volcanoes. Between December 2015 and April 2016, four major lahars were reported southeast of Chimborazo volcano (Ecuador). (Vasconez, 2021) La presencia del casquete glaciar en la cumbre, la fuerte pendiente de sus flancos y su ubicación tan cercana a las zonas pobladas de Riobamba y Ambato, son factores que resultan en un riesgo potencial elevado (IG, s.f.) Paralelamente con la construcción del, CH III (Edificio más joven) ocurrieron varios episodios de glaciación, los más importantes son: maxi glacial de 33- 14 ka AP, tardi - glacial de 12 - 10 ka AP y el neo-glacial desde 5 ka AP al presente (Barba, 2006)
Seismic unrest	At the time of the lahar occurrence (December 2015 and April 2016), an increase in the number of events was recorded. The main peaks were observed in December 2015, March and May 2016 with 41, 27 and 36 seismic events, respectively. For comparison, before (from April 2014 to November 2015) and after lahar occurrence (since August 2016) the medians were of 2 and 7 seismic events per month. Nowadays, the seismic behavior of Chimborazo is not well-known because seismic levels are low, data recording is intermittent and unrest periods have never been reported. (Vasconez, 2021)
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 11: Cotopaxi

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato volcán compuesto
Max VEI	5 (Global Volcanism Program, 2023)

Recurrence rate VEI>3	Fecha	MAX VEI	Fecha	MAX VEI
	2015 Aug 14 - 2016 Jan 24	3	1130 ± 75 years	5
	1903 Sep 26 - 1904 Dec	3	0950 (?)	3
	1880 Feb - 1880 Jul	3	0770 ± 75 years	4
	1877 Jan - 1877 Sep 2	4	0740 ± 75 years	4
	1869 Jul - 1869 Aug	3	0180 ± 100 years	4
	1853 Sep 13 - 1853 Sep 15	3	0150 (?)	4
	1803 Jan 4 - 1803 Jan 5	3	0070 ± 150 years	4
	1768 Apr 4	4	0050 BCE (?)	3
	1766 Feb 10 - 1766 Dec	3	0230 BCE ± 200 years	4
	1744 May - 1744 Dec	4	0400 BCE (?)	4
	1743 Apr	3 (?)	1050 BCE (?)	4
	1742 Dec 9	3 (?)	2050 BCE (?)	5
	1742 Jun 15 - 1742 Jul	3 (?)	2640 BCE ± 200 years	5
	1698	3 (?)	3280 BCE ± 500 years	5
	1534 Jun - 1534 Jul	4	3880 BCE ± 75 years	5
	1532 Nov 15	4	4350 BCE ± 75 years	5
	1350 (?)	4	5820 BCE ± 75 years	5
(Global Volcanism Program, 2023)				
Pyroclastic flows	Pyroclastic-density-current (PDC) deposits of the last 800 years were located within the tephra sequence [...] Three main types of PDC deposits are distinguished (Pistolesi, 2013): 1. Matrix-supported scoria bomb- and block-bearing deposits that partially fill the narrow canyons of the cone and spread onto the plateau at valley exits to form tongue-like deposits with low levees (scoria-flow deposits). 2. Lithic-rich scoria flows made up of juvenile, crystal-rich, dense andesite clasts, and subordinate black scoria 3. Surge-like, cross-bedded, fine-grained deposits intercalated with fallout beds that reflect emplacement by very energetic explosions The present andesitic eruptive history began ca. 4000 yr B.P. with tens of eruptions characterized by scoria and pumice falls, lava flows, and pyroclastic flows, all of which have contributed to the present edifice . Minor rhyolitic eruptive episodes may have occurred around 2100 yr B.P. (Pistolesi, 2011) TABLE 1. HISTORICAL CHRONICLES AND REPORTS CONCERNING COTOPAXI ACTIVITY FROM THE TIME OF THE SPANISH CONQUEST (Pistolesi, 2011)			
Lava flows	The recent eruptive activity of Cotopaxi consists of Plinian outbursts of VEI 3–4 (at least 20 episodes in the last 2000 years; Barberi et al., 1995; Pistolesi et al., 2011), with associated lava flows, long-lasting ash eruptions and minor Strombolian activity (Pistolesi, 2014) The present andesitic eruptive history began ca. 4000 yr B.P. with tens of eruptions characterized by scoria and pumice falls, lava flows, and pyroclastic flows, all of which have contributed to the present edifice . Minor rhyolitic eruptive episodes may have occurred around 2100 yr B.P. (Pistolesi, 2011) TABLE 1. HISTORICAL CHRONICLES AND REPORTS CONCERNING COTOPAXI ACTIVITY FROM THE TIME OF THE SPANISH CONQUEST (Pistolesi, 2011)			
Lahars	The ice-capped Cotopaxi volcano is known worldwide for the large-scale, catastrophic lahars that have occurred in connection with historical explosive eruptions (Pistolesi, 2014)			

	Its path is generally parallel to the Pan American Highway, the major state road connecting the country from north to south. Many small-scale lahars have followed this drainage in the past (b100 million m³), as well as some large-scale historical flows that severely impacted the population (Pistolesi, 2014) The stratigraphy of debris flow deposits in the Cutuchi quarries (Fig. 3) clearly highlights that the period between 1200 and 1500 AD is characterized by lahar events of large (N500 million m³) scale, which carried meter-sized boulders and left deposits more than 20 m thick (Pistolesi, 2014) TABLE 1. HISTORICAL CHRONICLES AND REPORTS CONCERNING COTOPAXI ACTIVITY FROM THE TIME OF THE SPANISH CONQUEST (Pistolesi, 2011)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	Cotopaxi II occurred from 13,200 yr B.P. to 4100 yr B.P. Cotopaxi experienced six important rhyolitic cycles that culminated with a major flank collapse. This period of activity consisted of tephra falls, dome collapses, phreatomagmatic activity, and huge lahars. Andesitic activity was subordinate (Pistolesi, 2011)
Collapse potential	Its steep flanks (30°–35°) culminate in a crater hosting a tephra cone (Hradecka et al., 1974), which in turn harbors a smaller crater, the active vent of historic eruptions (Pistolesi, 2014) A huge flank failure occurred ca. 4500 yr B.P. (Barberi et al., 1995; Hall, 1977, 2004; Hall and Mothes, 2008; Smyth and Clapperton, 1986), forming a dry debris avalanche in the Río Pita channel [...] Cotopaxi II occurred from 13,200 yr B.P. to 4100 yr B.P. Cotopaxi experienced six important rhyolitic cycles that culminated with a major flank collapse. This period of activity consisted of tephra falls, dome collapses, phreatomagmatic activity, and huge lahars. Andesitic activity was subordinate (Pistolesi, 2011)
Primary source	lahar The most recent large-scale lahar event occurred in 1877 when scoria flows partially melted ice and snow of the summit glacier, generating debris flows that severely impacted all the river valleys originating from the volcano (Pistolesi, 2014) Three different triggering processes for Cotopaxi lahars, which correspond to the different types of lahar deposits identified for events occurring in the last 800 years of eruptive activity (Pistolesi, 2014): 1. Pyroclastic surge events with limited dispersal with limited snow/ice melting 2. Erosive, pyroclastic scoria-flow lobes able to cut deep canyons into the ice cap, leaving 40–50 m-high cliffs of exposed ice 3. Lithic- and scoria-rich, highly erosive, radially distributed pyroclastic flows related to the collapse of dense eruption columns that have the ability to scour the entire surface of the glacier No direct data exist on thickness or areal extent of the ice cap of Cotopaxi during the XVIII century. Its lower limit was first reported by Reiss (1873) to range between 4550 m and 4760 m a.s.l. Conversely, the present-day snout of the glacier is between 4600 m and 5200 m (Jordan, 1983; Cáceres, 2005), and the glacier has a total area of 13.9 km², an average thickness on the upper NW flank between 30 and 120 m (Cáceres, 2005), and a total volume of ≈0.7 km³ (Pistolesi, 2014)
Seismic unrest	On October 21, 2022, the volcano started a new eruptive episode with a short duration tremor that produced ash fallout on the upper part of the cone (Hidalgo, 2024)
Ground deformation	
Degassing	Actividad fumarólica

Ficha 12: Cuicocha

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Caldera Volcánica / lago cratérico, consiste en una caldera con cinco domos dacíticos localizados dentro
Max VEI	5 (1150 BCE) (Global Volcanism Program, 2023)
Recurrence rate VEI>3	VEI 5 – 1150 BCE (Global Volcanism Program, 2023)
Pyroclastic flows	Evidencias de la explosión del domo Cuicocha son los depósitos de flujos piroclásticos observados en las canteras del poblado de Quiroga , que pueden alcanzar hasta 18 m de espesor (Almeida, 2017).
Lava flows	Las fases finales en la evolución del Cotacachi se han caracterizado por la formación de domos de lava ejemplo de ello son los domos Piribuela y Loma Negra al oriente del volcán y Wolf y Yerovi en el interior de la laguna de Cuicocha (Almeida, 2017).
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	The physical characteristics of Cuicocha surge deposits (i.e., highly fragmented, fine-grained deposits, presence of accretionary lapilli, and cross/layered stratification) reveal that an intense phreatomagmatic activity took place during a new dome construction phase in a subaqueous environment (Almeida, 2023).
Collapse potential	El domo Cuicocha fue destruido por una gran explosión hace 3100 años AP , generando una morfología de tipo caldera (Almeida, 2017).
Primary lahar source	_Caldera Volcánica / lago cratérico, consiste en una caldera con cinco domos dacíticos localizados dentro
Seismic unrest	En el periodo que el Instituto Geofísico lleva vigilando instrumentalmente al complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha se ha observado al menos 10 enjambres sísmicos desde el año de 1990 . En octubre del 2018 hasta el día 4 se registraron 62 eventos volcano-tectónicos , los cuales corresponden a fracturas de roca. El sismo de mayor magnitud fue de 2.5 MLv y se registró el día 2 de octubre a las 10:58 (TL). De los 62 sismos, 10 eventos pudieron ser localizados (fases en 4 estaciones). Los epicentros se ubican en la caldera del Cuicocha y en la parte norte de la misma. (IG, 2018) 3 de enero de 2023 se registraron varios sismos en la provincia de Imbabura. Pese a su magnitud pequeña, fueron sentidos en varias poblaciones de los cantones de Cotacachi, Otavalo, Antonio Ante, San Miguel de Urcoquí e Ibarra (reporte del SNGRE). Los epicentros se encuentran al oriente del complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha, a profundidades menores a 10 km. Esta serie de eventos constituyen lo que se conoce como un enjambre sísmico. (IG, 2023)
Ground deformation	La deformación no muestra ninguna anomalía que pueda relacionarse con un ascenso de una cantidad de magma en el interior del volcán . (IG, 2018)
Degassing	A partir del año 2011, el Instituto Geofísico ha realizado 17 campañas de medición del flujo de CO ₂ . Los valores de CO ₂ registrados en la Laguna de Cuicocha se encuentran dentro de los rangos medidos en otras campañas y no reflejan un incremento significativo de la desgasificación de este gas . (IG, 2018)

Ficha 13: Darwin

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Caldera Volcánica / lago cratérico, consiste en una caldera con cinco domos dacíticos localizados dentro
Max VEI	5 (1150 BCE) (Global Volcanism Program, 2023)
Recurrence rate VEI>3	VEI 5 1150 BCE (Global Volcanism Program, 2023)
Pyroclastic flows	Evidencias de la explosión del domo Cuicocha son los depósitos de flujos piroclásticos observados en las canteras del poblado de Quiroga , que pueden alcanzar hasta 18 m de espesor (Almeida, 2017).
Lava flows	Las fases finales en la evolución del Cotacachi se han caracterizado por la formación de domos de lava ejemplo de ello son los domos Piribuela y Loma Negra al oriente del volcán y Wolf y Yerovi en el interior de la laguna de Cuicocha (Almeida, 2017).
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	The physical characteristics of Cuicocha surge deposits (i.e., highly fragmented, fine-grained deposits, presence of accretionary lapilli, and cross/layered stratification) reveal that an intense phreatomagmatic activity took place during a new dome construction phase in a subaqueous environment (Almeida, 2023).
Collapse potential	El domo Cuicocha fue destruido por una gran explosión hace 3100 años AP , generando una morfología de tipo caldera (Almeida, 2017).
Primary lahar source	_Caldera Volcánica / lago cratérico, consiste en una caldera con cinco domos dacíticos localizados dentro
Seismic unrest	En el periodo que el Instituto Geofísico lleva vigilando instrumentalmente al complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha se ha observado al menos 10 enjambres sísmicos desde el año de 1990 . En octubre del 2018 hasta el día 4 se registraron 62 eventos volcano-tectónicos , los cuales corresponden a fracturas de roca. El sismo de mayor magnitud fue de 2.5 MLv y se registró el día 2 de octubre a las 10:58 (TL). De los 62 sismos, 10 eventos pudieron ser localizados (fases en 4 estaciones). Los epicentros se ubican en la caldera del Cuicocha y en la parte norte de la misma. (IG, 2018) 3 de enero de 2023 se registraron varios sismos en la provincia de Imbabura. Pese a su magnitud pequeña, fueron sentidos en varias poblaciones de los cantones de Cotacachi, Otavalo, Antonio Ante, San Miguel de Urcuquí e Ibarra (reporte del SNGRE). Los epicentros se encuentran al oriente del complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha, a profundidades menores a 10 km. Esta serie de eventos constituyen lo que se conoce como un enjambre sísmico. (IG, 2023)
Ground deformation	La deformación no muestra ninguna anomalía que pueda relacionarse con un ascenso de una cantidad de magma en el interior del volcán . (IG, 2018)
Degassing	A partir del año 2011, el Instituto Geofísico ha realizado 17 campañas de medición del flujo de CO2. Los valores de CO2 registrados en la Laguna de Cuicocha se encuentran dentro de los rangos medidos en otras campañas y no reflejan un incremento significativo de la desgasificación de este gas . (IG, 2018)

Ficha 14: Huevos de Chivo

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Domo de lava (GAD Municipal de Quijos, 2015)
Max VEI	
Recurrence rate VEI>3	
Pyroclastic flows	
Lava flows	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits, ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites, lahars deposits, and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010)
Lahars	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits, ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites, lahars deposits , and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	Aliso's higher elevations (max. 4300m) were glaciated in the Pleistocene , however today a sub-tropical cloud forest prevails at its lower elevations (min. 1800m) (Hall & Mothes, 2010)
Collapse potential	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits , ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites, lahars deposits, and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010)
Primary lahar source	Aliso's higher elevations (max. 4300m) were glaciated in the Pleistocene , however today a sub-tropical cloud forest prevails at its lower elevations (min. 1800m) (Hall & Mothes, 2010)
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 15: Ecuador

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Escudo
Max VEI	0 (GVP)
Recurrence rate VEI>3	1150 (after) Confirmed Eruption Max VEI: 0 (GVP) No eruptions have been recorded since the archipelago was discovered in 1535 (Rowland, 1994)
Pyroclastic flows	The scenarios that involve preferential build-up are not supported by large amounts of pyroclastic material exposed in the caldera walls (McBirney and Williams 1969) or any obviously more viscous flows occurring around the caldera (Rowland, 1994)

Lava flows	Caldera Rim Lavas: Cosmogenic He exposure ages were determined on two samples from the exposed interior of caldera rim lavas, one from midway up the caldera wall and one from the base of a steep cliff in the outer part of the shield. Two splits from the sample from the outward-facing cliffs yield afes of 3400 ± 800 and 800 ± 300 years. The sample from the caldera wall yields an age of 2800 ± 400 y (Geist, 2002) Based on our mapping (Fig. 5) we estimate that there are almost 100 separate flows. On the north flank of the rift there are so many dark flows that it was difficult to differentiate them in the satellite images. About 75% of the flows are a'a. Their average lengths and areas are -3 km and -2 km 2, respectively, but because most entered the ocean these are minimum values (Rowland, 1994)
Lahars	
Tsunamis	The collapse of Volcan Ecuador could have occurred over many years and at a very slow rate, or it could have occurred all at once. If the collapse happened over a long period of time such as the slow creep of Kilaueaís southern flank, there would be little to no effects on the sea surface and therefore no production of a tsunami. On the other hand, if the collapse occurred rather quickly due to some kind of stress that might have caused the mass to slide along an existing fault line, the disturbance to the sea surface would have been significant causing a rather large tsunami to be created. To be able to determine if there was a tsunami, further research would want to focus on the other Galapagos Islands for signs of inundation, along with looking in places such as Australia, Tahiti, and New Zealand (Hall, 2006)
Phreatic explosion potential?	At the oceanward ends of these faults, magma interacted with water to produce the large tuff cone southeast of Cabo Berkeley as well as Punta Vincente Roca (Rowland, 1994)
Collapse potential	Ecuador is a volcano that is located on the northwestern tip of Isabela Island has experienced a collapse sometime in the last 100000 yBP that caused the volcano to lose it westernmost half [...] It appears to be missing its entire western half as seen in Fig. 2. The best explanation for this halving of the volcano is a lateral sector collapse (Hall, 2006) Volcan Ecuador experienced one or more catastrophic sector collapse events, the net effect of which was to remove the entire western half of the volcano. The age of the sector collapse is not known, buit it probably took place near the time that the shield building phase of the volcano waned, ar about 100 Ka (Geist, 2002)
Primary lahar source	
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	
Ficha 16: El Dorado	
Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato volcán (GAD Municipal de Quijos, 2015)
Max VEI	
Recurrence rate VEI>3	
Pyroclastic flows	El volcán se ubica entre Bermejo y Logmaplaya, en las estribaciones orientales correspondientes a la Quebrada Logmaplaya se han encontrado depósitos de flujos piroclásticos y domos colapsados (Barragán, 2012)

Lava flows	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits, ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites, lahars deposits, and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010)
Lahars	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits, ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites, lahars deposits , and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	Aliso's higher elevations (max. 4300m) were glaciated in the Pleistocene , however today a sub-tropical cloud forest prevails at its lower elevations (min. 1800m) (Hall & Mothes, 2010)
Collapse potential	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits, ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites, lahars deposits, and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010) El volcán se ubica entre Bermejo y Logmaplaya, en las estribaciones orientales correspondientes a la Quebrada Logmaplaya se han encontrado depósitos de flujos piroclásticos y domos colapsados (Barragán, 2012)
Primary lahar source	Aliso's higher elevations (max. 4300m) were glaciated in the Pleistocene , however today a sub-tropical cloud forest prevails at its lower elevations (min. 1800m) (Hall & Mothes, 2010)
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 17: Guagua Pichincha

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato volcán compuesto
Max VEI	5
Recurrence rate VEI>3	VEI 3: 2001, 1831, 1566 VEI 4: 1660, 70 VEI 5: 930 (Global Volcanism Program, 2023)
Pyroclastic flows	The CE 1660 eruption occurred primarily in October–November 1660 with its climax on the 28 October, resulting in pumice falls and pyroclastic currents [...] The greatest volume of pyroclastic currents was directed westward towards uninhabited areas, whereas on the eastern side they were stopped by the topographic relief of Rucu Pichincha and flowed down the Lloa and Mindo Valleys, thereby protecting Quito (Colombier, 2022) The eruption that ended the Historic cycle occurred in 1660 CE (Robin et al., 2008) and caused severe tephra fallout in Quito and pyroclastic density currents on the western side of the volcano (Tadini, 2022)

		Deposits of ash fall and mudflows (secondary lahars) have been found in the Quito basin, and deposits of pyroclastic flows have been identified on the sparsely populated western flanks [...] Pyroclastic flows descended out to 11 km westward and flowed downvalley in the Cristal and Cinto rivers channels. Similarly, mud flows (lahars) also descended the Cristal river valley (Telenchana, 2019)
Lava flows		En el Holoceno medio, hace 4 000 años aproximadamente, se registra el segundo periodo, con la formación de un nuevo edificio (Toaza) con la extrusión de flujos de lava viscosa y de domos dentro del anfiteatro, y que termina con un colapso parcial. (Pavón, 2021) Remnant units on the eastern, northeastern and northwestern flanks consist of lava flows and tephra sequences whose distribution and inclination point to an original sub-symmetrical cone about 9 km in basal diameter (Robin, 2010) Sketch of the geological map of the PVC (Robin, 2010) Sketch diagrams showing the main development stages of the PVC (Robin, 2010)
Lahars		Deposits of ash fall and mudflows (secondary lahars) have been found in the Quito basin, and deposits of pyroclastic flows have been identified on the sparsely populated western flanks [...] Pyroclastic flows descended out to 11 km westward and flowed downvalley in the Cristal and Cinto rivers channels. Similarly, mud flows (lahars) also descended the Cristal river valley (Telenchana, 2019) Eruption 10th Century: pyroclastic flows mapped 24 km from de crater and 6 km from Mindo. Secondary lahar deposits are found in Quito basin and W flanks. Pyroclastic fall covered the W and NW, affected Quito (12 cm in the downtown) (Telenchana, 2019) In AD 1660, an eruption produced severe ash and lapilli fallout in the city as well as numerous lahars [...] Moreover, historic chronicles report notable eruptive episodes before the 1660 eruption, especially in 1566, 1575, and 1582, which also resulted in ash and lapilli falls in Quito, as well as pyroclastic flows and lahars in the valleys which descend the western flanks of the complex [...] Rain-triggered reworking of tephra, producing lahars on the eastern flanks of Guagua and Rucu Pichincha, represents another dangerous phenomenon that could affect the western and central parts of Quito (Robin, 2008)
Tsunamis		
Phreatic potential?	explosion	Phreatic activity also has been reported throughout historic times [...] In the mid to late 1980s, Guagua Pichincha volcano experienced phreatic explosions, particularly after heavy rains (Hidalgo, 2024) Recurrent activity has been characterised by cycles of phreatic explosions and dome-forming eruptions (including Vulcanian phases), which culminate in Plinian activity (volcanic explosivity index VEI 4–5) (Colombier, 2022)
Collapse potential		Guagua Pichincha (1999) - a series of large explosions, dome emplacements, and collapses began that were associated with intense long-period seismic activity. (Hidalgo, 2024) Repeated episodes of dome formation and destruction occurred from late-September through mid-December 1999 and two main explosive eruptions on the 5 and 7 October, together with several additional Vulcanian eruptions (Colombier, 2022) Guagua Pichincha volcano has been affected by two major sector collapses (at ~11 and ~4 ka): after the latter one (“Toaza” sector collapse; Robin et al., 2008) the eruptive history has been characterized mainly by phases of growth and destruction of a dome complex located in the landslide scar (“Cristal Dome”) (Tadini, 2022) En el Holoceno medio, hace 4 000 años aproximadamente, se registra el segundo periodo, con la formación de un nuevo edificio (Toaza) con la extrusión de flujos de lava viscosa y de domos dentro del anfiteatro, y que termina con un colapso parcial. (Pavón, 2021)
Primary lahar source		According to the time of occurrence, lahars can be divided into “primary” lahars, defined as debris flows that are directly triggered by an eruption, and “secondary” lahars that are post-eruption events. In the case of the Pichincha there is a practical reason for this distinction as it is possible that primary lahars are larger. Rainstorms accompanying major eruptions sometimes produce intense precipitation, probably much

	more intense than the ordinary rainfall that occurs at the high altitudes of the volcano. However, as of yet it has not been possible to identify the triggering mechanisms of all the lahars present on the fans and to correlate the events with eruptions (Canuti, 2002)
Seismic unrest	Actividad hidrotermal y fumarólica (IG,2015) Since this eruptive phase, the volcano has resumed its quiet state with only occasional bouts of seismic or deformation anomalies that quickly die back (Hidalgo, 2024)
Ground deformation	Since this eruptive phase, the volcano has resumed its quiet state with only occasional bouts of seismic or deformation anomalies that quickly die back (Hidalgo, 2024)
Degassing	Actividad hidrotermal y fumarólica (IG,2015)

Ficha 18: Huañuña

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Dome (Mothes & Hall, 2008) Lava dome (Santamaria, 2023)
Max VEI	
Recurrence rate VEI>3	
Pyroclastic flows	It appears to have a resurgent dome center, encircled by glacial valleys that contains its youngest ash-flow deposits, and farther afield, by outward-sloping ignimbrites (Fig. 3). Late glacial moraines are covered by its pyroclastic flow deposits. (Mothes & Hall, 2008)
Lava flows	
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	It appears to have a resurgent dome center, encircled by glacial valleys that contains its youngest ash-flow deposits, and farther afield, by outward-sloping ignimbrites (Fig. 3). Late glacial moraines are covered by its pyroclastic flow deposits. (Mothes & Hall, 2008)
Collapse potential	
Primary lahar source	It appears to have a resurgent dome center, encircled by glacial valleys that contains its youngest ash-flow deposits, and farther afield, by outward-sloping ignimbrites (Fig. 3). Late glacial moraines are covered by its pyroclastic flow deposits. (Mothes & Hall, 2008)
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 19: Iliniza Sur

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Stratovolcan (Santamaria, 2022)
Max VEI	5 During the Upper South Iliniza (SI) stage, the uppermost part of this edifice was destroyed by the highly explosive Jatuncama phase (VEI 5) leaving a 30–40 m thick ignimbrite sequence (~35 ka) [...] Although a high explosive phase was identified at Iliniza volcano, this event was unique throughout its eruptive history and are absent in the Holocene eruptive chronology (Santamaria, 2022)
Recurrence rate VEI>3	
Pyroclastic flows	Iliniza volcano exhibits volcanological characteristics that are similar to other Volcanic Front edifices, including the presence of dacite lava domes and a thick pyroclastic density current (PDC) deposit, both associated with its late eruptive stages (Santamaria, 2022) South Iliniza (5245 m.a.s.l.), is a large stratocone, built at least several hundred thousands years after the North Iliniza, is made of andesitic and dacitic lava flows and thick pyroclastic flow deposits located in the outer flanks. (Hidalgo, 2007)
Lava flows	The Iliniza eruptive activity extended into the Late Pleistocene and Holocene with the extrusion of the Tishigcuchi lava dome, and the emission of the Pongo lava flow dated at 6 ± 4 ka (Santamaria, 2022) Dataciones de K-Ar de muestras de flujos de lava son incluidas con ubicación y edad y mapa geológico de Iliniza en Santamaria2022.url South Iliniza (5245 m.a.s.l.), is a large stratocone, built at least several hundred thousands years after the North Iliniza, is made of andesitic and dacitic lava flows and thick pyroclastic flow deposits located in the outer flanks. (Hidalgo, 2007)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	The late Pleistocene glaciations strongly modified the morphology of Iliniza volcano (Hidalgo, 2001), as shown by the different stages of glacial erosion exhibited by its two edifices [...] the South Iliniza glacial valleys are narrow and less incised preserving the conical shape of the edifice. The lowest frontal and lateral moraines are recognizable at the base of the cone at about 3700 m asl on the eastern flank and 3800 m asl on the northern and southern flanks (Santamaria, 2022) Outcrops near the center of the edifice show moderated hydrothermal alteration . Glacial striations preserved on the northern lava flow confirm its pre-LGM age (roughly 35–20 ka) (Santamaria, 2022) The older moraines, which cover the whole edifice, have their lower limits at 3400 m.a.s.l. They correspond to the Full Glacial Period (Clapperton, 1990) and therefore yield a minimum age of 30 Ka. (Hidalgo, 2007)
Collapse potential	The Iliniza eruptive history does not include any major flank collapse, as no avalanche deposits or morphological remains suggesting a collapse amphitheater were identified. However, the occurrence of the Iliniza volcano above an active strike-slip fault system, the potential weakening of its flanks caused by weathering and hydrothermal alteration, and the steeply inclined slopes of its uppermost areas increase the risk of a potential collapse promoted by a tectonic event (Santamaria, 2022) This edifice suffered an explosive event, which formed a small caldera 1 km in diameter (Hidalgo, 2007)
Primary source	lahar The late Pleistocene glaciations strongly modified the morphology of Iliniza volcano (Hidalgo, 2001), as shown by the different stages of glacial erosion exhibited by its two edifices [...] the South Iliniza glacial valleys are narrow and less incised preserving the conical shape of the edifice. The

	lowest frontal and lateral moraines are recognizable at the base of the cone at about 3700 m asl on the eastern flank and 3800 m asl on the northern and southern flanks (Santamaria, 2022) Outcrops near the center of the edifice show moderated hydrothermal alteration. Glacial striations preserved on the northern lava flow confirm its pre-LGM age (roughly 35–20 ka) (Santamaria, 2022) The older moraines, which cover the whole edifice, have their lower limits at 3400 m.a.s.l. They correspond to the Full Glacial Period (Clapperton, 1990) and therefore yield a minimum age of 30 Ka. (Hidalgo, 2007)
--	---

Seismic unrest

Ground deformation

Degassing

Ficha 20: Imbabura

Type of volcanic hazard

Volcano type	Estrato volcán compuesto
Max VEI	3 Using the trapezoidal rule approximation technique to calculate the volume of tephra fall deposits and neglecting the lost ash-sized fraction and the ballistic component, as well as setting the minimum near-vent thickness at 3 m gives a bulk volume of about $82 \times 10^6 \text{ m}^3$. (Le Pennec, 2011)
Recurrence rate VEI>3	Recurrencia de intervalo de erupciones explosivas con VEI 4 es de 108000 años (Loughlin, 2015)
Pyroclastic flows	Notably, the original volcano strata preserved in the Imbabura-DAD is composed of two main kind of deposits: lava flows (massive and blocky) and block-and ash flows (andesitic to dacitic); these deposits have been strongly deformed during avalanche emplacement [...] The dominant avalanche facies observed in the Imbabura-DAD is the edifice-derived block-facies, corresponding mainly to ancient lava and pyroclastic flows derived from Imbabura-I (Andrade, 2009)
Lava flows	El Imbabura antiguo se compuso de seis unidades estratigráficas constituidas principalmente de flujos de lava apilados en aproximadamente 1.000 m de espesor. [...] Flujos de lavas andesíticas (57 a 62% de sílice en peso de óxido), de edad desconocida pero pertenecientes probablemente al Imbabura reciente, recorrieron distancias de 4 a 6 km en el flanco sur del volcán (Ruiz, 2004)
Lahars	Durante los últimos milenios hasta el período histórico, se han producido flujos de lodo en ciertos flancos del volcán (Ruiz, 2004)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	Glacial deposits , mainly represented by lateral and minor terminal moraines can be observed almost all around the edifice, from the ~4200 m down to the ~3000 m level [...] These glacial troughs show a significantly developed U-shape between the ~3600 m and ~3900 m level as seen in topographic contours and profiles (Fig. 4.18). Uphill from the ~3900 m level, however, the lateral borders of the valleys are covered by either moraine deposits or by the lavas of the Imbabura-II-2 unit, suggesting that at least two episodes of glacier development with different intensity occurred during the development of Imbabura
Collapse potential	El Imbabura antiguo colapsó deforma catastrófica hacia el noroeste , hace más de 43.000 años, formando una avalancha que recorrió 16 km en esa dirección, cubriendo una superficie de alrededor de 160 km ² .

	Importantes fases de actividad del Taita Imbabura han sido datadas hacia 30.000 y 15.000 años antes del presente [...] La última fase se caracteriza por el crecimiento de domos de lava viscosa (dacitas con 64% de sílice) que colapsaron hacia el este y el norte [...]El evento más notable es una poderosa explosión, datada de 28.000 años antes del presente, que provocó primeramente el colapso del flanco sudoeste del Taita Imbabura (Ruiz, 2004)
Primary source	lahar Glacial deposits, mainly represented by lateral and minor terminal moraines can be observed almost all around the edifice, from the ~4200 m down to the ~3000 m level [...] These glacial troughs show a significantly developed U-shape between the ~3600 m and ~3900 m level as seen in topographic contours and profiles (Fig. 4.18). Uphill from the ~3900 m level, however, the lateral borders of the valleys are covered by either moraine deposits or by the lavas of the Imbabura-II-2 unit, suggesting that at least two episodes of glacier development with different intensity occurred during the development of Imbabura
Seismic unrest	No presenta actividad reciente (IG, s.f.) La actividad sísmica registrada en el volcán Imbabura en el año 2020 se considera baja. La red de monitoreo sísmico del volcán Imbabura registró un total de 32 sismos, la actividad estuvo caracterizada principalmente por eventos de fractura (VT's) y en menor número por eventos híbridos (HB's), eventos de largo período (LP's) y eventos tectónicos (TECT's); la actividad sísmica es menor, en cuanto a ocurrencia, con respecto al año anterior (134 eventos). Se localizaron un total de 3 eventos sísmicos, los cuales se distribuyen dentro de una distancia epicentral de hasta 12 km con respecto a la cumbre y cuyas profundidades no superan los 12 Km bajo el nivel del mar. (INFORME ANUAL - VOLCAN IMBABURA AÑO 2020)
Ground deformation	No presenta actividad reciente (IG, s.f.)
Degassing	No presenta actividad reciente (IG, s.f.)

Ficha 21: La Cumbre

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Shield, caldera, pyroclastic cone (s)
Max VEI	4
Recurrence rate VEI>3	VEI 4: 1968 VEI 3: 1825 (Global Volcanism Program, 2023) El sábado 2 de marzo del 2024 a las 23h50 (hora de las Galápagos), el volcán Fernandina (La Cumbre) inició un nuevo proceso eruptivo, 4 años después de su última erupción (enero 2020). (IG, 2024)
Pyroclastic flows	The surface inuts found on Fernandina are aa and pahoehoe lava flows, vent structures (cinder and spatter cones), phreatomagmatic ash, and partially vegetated to barren soul developed on both lava and ash [...] The apron also consists of lava flows, but the contribution of pyroclastic material causes slopes to be slightly grater. The summit platform contains the highest areal concentration of pyroclastics, which may explain how it has grown higher than the rest of the flanks (Rowland, 1996) Exposed in the walls of the caldera are extensive sequences of lava flows (most of them thick and flat-lying), numerous dikes, and a few pyroclastic units (Rowland, 1992)

	Sketch map of SPOT scene of Fernandina collected 25 October 1988 (view from W at 22 ~ from nadir), numbers on flows indicate inferred order of eruption, and numbers around W rim indicate locations from which photographs of Figs. 7-10 were taken (all by P Mougini-Mark in late September 1989) (Rowland, 1992)
Lava flows	INFORME ESPECIAL DEL VOLCÁN FERNANDINA N° 2 – 2020: El 12 de enero del 2020, poco antes de las 18h10 Tiempo local de Galápagos (TG = UTC - 6 horas o Tiempo del Ecuador - 1 hora), el volcán Fernandina inició su tercera erupción en menos de 3 años. Esta erupción fue precedida por un incremento de la actividad sísmica (Informe Especial N°1). Sobre esta situación se comunicó a la Dirección del Parque Nacional Galápagos (DPNG), alertándoles de que podía sobrevenir una erupción como ocurrió en ocasiones anteriores. La erupción se inició poco antes de las 18h10, desde una fisura circunferencial ubicada bajo el borde oriental de la caldera a una elevación aproximada de 1300-1400 m sobre el nivel del mar, provocando la emisión de flujos de lava en el flanco oriental [...] Cabe destacar que no hay asentamientos humanos en la zona de la erupción y que la dirección del viento lleva el gas hacia el occidente-noroccidente, al lado opuesto de las islas pobladas (Isabela, Santa Cruz, Floreana y San Cristóbal). En caso de que los flujos de lava ingresen al mar, se recomienda permanecer alejados, puesto que se pueden producir explosiones y liberación de gases nocivos cuando la lava entra en contacto con el agua. Adicionalmente, los flujos de lava pueden provocar extensos incendios, como ocurrió durante la erupción de 2017 (IG, 2020) Recently, on 12 January 2020, the Fernandina volcano started erupting again. Eruptive fissures surrounding the caldera have opened and caused the lava to flow. The eruption has lasted for 9 hours. The lava flow covered an area of 3.8 square kilometers [...] lava is likely to descend from the volcano summit and flow until the slope breaks without reaching the sea(as happened in 2020, 2017 2005) at the time of circumferential eruptions near the crater (Chandni, 2020) Multispectral ASTR satellite image used to map the 1995 and 2005 lava flows. (Chadwick, 2011)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	The 1968 eruption of Fernandina resulted in a major caldera floor collapse event that was accompanied by explosive phreatomagmatic activity owing to the presence of a lake on the caldera floor (Simkin and Howard, 1970; Howard et al., in press) (Harpp, 2018)
Collapse potential	The 1968 eruption of Fernandina resulted in a major caldera floor collapse event that was accompanied by explosive phreatomagmatic activity owing to the presence of a lake on the caldera floor (Simkin and Howard, 1970; Howard et al., in press) (Harpp, 2018) Only 3 weeks after the 1968 flank eruption, a major (volcanic explosivity index of 4) explosive eruption at the base of the western caldera wall deposited over 5 m of tephra on the western rim, dusted a ship 350 km west of the volcano, and triggered the world's largest caldera collapse since that of Katmai in 1912. Subsidence over the following 9 days was largely (Allan, 2000) Chronology 1968 Events (Simkin, 1970): On 15 May a small earthquake (4.5 Mb, where mlb is the earthquake magnitude as determined from body wave characteristics by the U.S. Coast and Geodetic Survey). Flank eruption. Precollapse seismicity. Clouds of 11 June. Major explosion. Eruption. Lightning. Ashfall. Seismic swarm. Late collapse activity
Primary lahar source	Following the collapse, lava flows from the caldera's southeast end, on and near the 1968 boundary fault, cascaded 600 m into the new caldera lake in 1972, 1973, and 1977 [...] These 1978 flows covered much of the caldera's northwestern floor and heated the 2 km ² lake [...] Fernandina's caldera lake water swiftly percolated into the new avalanche deposits, and only small pools survived in 1989 (Allan, 2000)
Seismic unrest	Informe volcánico especial- Fernandina- 2021 - N°02: Durante los últimos días, en el volcán Fernandina ubicado en el archipiélago de las Galápagos, se ha reportado actividad fumarólica visualizada en el sector de su cráter. En los últimos meses, el volcán no ha presentado eventos sísmicos que sugieran un comportamiento anómalo; sin embargo, se observan pequeños episodios de tremor sísmico similares a otros observados desde hace varios años ; esto se puede evidenciar en la figura 1, donde se muestran las señales de tremor de hoy, así como la de meses atrás (junio de 2021) (IG, 2021)

	Desde su última erupción en enero de 2020, la frecuencia y la magnitud de los sismos en el volcán Fernandina (La Cumbre) aumentó progresivamente, lo que sugiere que el magma se ha acumulado a niveles poco profundos. En la segunda mitad de 2022 se detectaron una serie de sismos con magnitudes mayores a 4, y a principios de diciembre de 2022 se produjo una pequeña intrusión no eruptiva, probablemente cerca del borde oriental de la caldera. Esto dio lugar a unos meses de disminución de la sismicidad (IG, 2024)
Ground deformation	IG reported that slow deformation at Fernandina has been recorded over the previous 18 months. InSAR data showed that inflation was occurring at a rate of about 400 mm/year in the summit caldera and on the NE flank, while deflation was occurring at a rate of about 100-400 mm/year in areas on the upper W and SW flanks. On 13 October the areas of deflation changed to inflation and the rate of deformation in the caldera increased. On 17 November IG noted that fumarolic activity in the summit crater was visible during the previous few days and may have been related to a small episode of tremor on 16 November. IG also noted that periodic fumarolic activity and small episodes of tremor are common at Fernandina without an eruption (Global Volcanism Program)
Degassing	Informe volcánico especial- Fernandina- 2021 - N°02: Durante los últimos días, en el volcán Fernandina ubicado en el archipiélago de las Galápagos, se ha reportado actividad fumarólica visualizada en el sector de su cráter. En los últimos meses, el volcán no ha presentado eventos sísmicos que sugieran un comportamiento anómalo; sin embargo, se observan pequeños episodios de tremor sísmico similares a otros observados desde hace varios años; esto se puede evidenciar en la figura 1, donde se muestran las señales de tremor de hoy, así como la de meses atrás (junio de 2021) (IG, 2021)

Ficha 22: Marchena

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Shield
Max VEI	2
Recurrence rate VEI>3	1991 Sep 25 - 1991 Nov 16 (?) ± 15 days Confirmed Eruption Max VEI: 2 (Global Volcanism Program)
Pyroclastic flows	The stratigraphy of the caldera wall and the composition of accidental fragments within the tephra demonstrate that periods of pyroclastic activity have been common throughout the history of the volcano (Vicenzi, 1999)
Lava flows	Field studies suggest that the low shield (with slopes of 2.4-3.3°), is composed entirely of basaltic lava and tephra. Stratigraphically, the island can be divided in to two sequences of lavas and pyroclastic rocks (Vicenzi, 1999) The youngest flows on the island are probably less than a thousand years old; perhaps some were erupted within the last few centuries (McBirney, 1969)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	If we are correct in supposing that most of the fragmental ejecta on the island are sideromelane and palagonite tuffs rather than basaltic scoria, the principal explosive activity must have been of phreatomagmatic type, and this in turn suggests that when the explosions took place the inferred caldera may have contained a lake or at least was surrounded and underlain by abundant ground water infiltrating from the sea (McBirney, 1969)
Collapse potential	Roughly 10 meters of pre-caldera lavas (erupted prior to summit collapse) are exposed on the southwestern caldera wall [...] A 1.3-km long fault scarp on the south-southeastern part of the rim is probably the result of multiple intra-caldera mini-collapses [...] The volume

	change in the magma chamber could have triggered a single collapse. A more likely possibility is that the caldera grew in increments by successive stages of subsidence followed by periods of inflation of the shield (Vicenzi, 1999)
Primary lahar source	[...] and this in turn suggests that when the explosions took place the inferred caldera may have contained a lake or at least was surrounded and underlain by abundant ground water infiltrating from the sea (McBirney, 1969)
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 23: Nevado Cayambe

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato volcán compuesto
Max VEI	4 (Global Volcanism Program, 2023)
Recurrence rate VEI>3	VEI 4 : 1570, 1290, 1040 (Global Volcanism Program, 2023) Chronodiagram of the Nevado Cayambe events recorded in the peat bog during the past 4000 years (Samaniego, 1998) Dado que el tiempo promedio entre las erupciones del último período eruptivo es de 200 años y que la última erupción del volcán ocurrió en 1785-1786 AD, se debe considerar que la probabilidad de que ocurra una erupción de este volcán en las próximas décadas es alta (Samaniego, 2004)
Pyroclastic flows	El Nevado Cayambe es un edificio que ha presentado actividad volcánica en los últimos 11800 años (Hall y Mothes, 1994). Los productos observados en los estudios de campo son principalmente domos o flujos de lava, flujos piroclásticos , lahares y caídas de lapilli y ceniza (Samaniego et al., 2004). (IG) Late Holocene volcanic products – Pyroclastic flows: Four pyroclastic flow sequences are found on the north–northeast flank of Nevado Cayambe. The older three (PF1–PF3) consist mainly of large block and ash flow deposits from dome collapses, whereas the youngest (PF4) consists of surge deposits comprised of ash and lapilli (Samaniego, 1998)
Lava flows	El Nevado Cayambe es un edificio que ha presentado actividad volcánica en los últimos 11800 años (Hall y Mothes, 1994). Los productos observados en los estudios de campo son principalmente domos o flujos de lava , flujos piroclásticos, lahares y caídas de lapilli y ceniza (Samaniego et al., 2004). (IG) This edifice was constructed mainly of lava flows, followed by ignimbrite eruptions that produced a large welded tuff, 60–80 m thick, in the La Chimba valley (Samaniego, 1998) Given the summit topography, products of future eruptions will probably have a similar distribution and will not generate significant hazards for the inhabited areas west of the volcano (Samaniego, 1998) During the late Holocene, the activity of the Cayambe volcanic complex has been restricted to the summit dome complex (Samaniego, 2002) Simplified geological map of the Cayambe Volcanic Complex (Samaniego, 2005) (Pavón, 2018)

Lahars	El Nevado Cayambe es un edificio que ha presentado actividad volcánica en los últimos 11800 años (Hall y Mothes, 1994). Los productos observados en los estudios de campo son principalmente domos o flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares y caídas de lapilli y ceniza (Samaniego et al., 2004). (IG) The PF2 sequence consists of 15–20 units of interbedded block and ash flow, lahar, and ash flow deposits, whose original dimensions are estimated to have been 7–8 km long, 600–900 m wide, and 80–100 m thick (estimated volume: 0.5 km³). A lahar deposit at the base of PF2 carries banded dacite blocks and is overlain by deposits of ash flows and block and ash flows, 1–10 m thick (Samaniego, 1998) En la parte occidental del complejo volcánico se han reconocido varias unidades de flujos de lodo relacionados con la actividad reciente del volcán. Estos depósitos están en el abanico formado por el río Blanco y sobre el que se construye la ciudad de Cayambe. El espesor de estos depósitos en la planicie de Cayambe varía entre 0.5 y 1.5 m. La presencia de abundante material antrópico (cerámica y obsidiana tallada) sugiere una edad inferior a 800 yBP (Samaniego, 2004) Based on detailed characterization of the deposits, including sedimentological, archaeological, and paleontological analyses, as well as radiocarbon dating. We found that two debris flow (i.e., Río Blanco I and II) destroyed Caranqui settlements in 665–775 cal AD and 774–892 cal AD, respectively, while another event impacted a Spanish colonial farm in 1590–1620 cal AD (Río Blanco III) (Vásconez, 2022)
Tsunamis	
Phreatic potential?	explosion Sobre los 4800 m el volcán está cubierto por un importante casquete glaciar que cubre un área aproximada de 22 km² y que alcanza un espesor de alrededor de 30 a 50 m en la zona de la cumbre (IG)
Collapse potential	Late Holocene volcanic products – Pyroclastic flows: Four pyroclastic flow sequences are found on the north–northeast flank of Nevado Cayambe. The older three (PF1–PF3) consist mainly of large block and ash flow deposits from dome collapses, whereas the youngest (PF4) consists of surge deposits comprised of ash and lapilli (Samaniego, 1998) The Nevado Cayambe was constructed during three eruptive phases: (1) the Angureal cone corresponds to the transition between the old edifice and the younger volcano; (2) the main summit formed by alternating phases of construction (lava flows and domes) and destruction (ignimbrites and sector collapses); and (3) a complex of domes that forms the secondary summit of the Nevado Cayambe was extruded during the Holocene on the eastern flank of the main summit (Samaniego, 2002)
Primary lahar source	Sobre los 4800 m el volcán está cubierto por un importante casquete glaciar que cubre un área aproximada de 22 km² y que alcanza un espesor de alrededor de 30 a 50 m en la zona de la cumbre (IG)
Seismic unrest	Actividad reciente – Fumarolas, sismos volcánicos For the first time in decades, a sudden increase in seismicity has been observed and monitored at Cayambe volcano in Ecuador, in 2016. This seismic unrest, which occurred a few months after the April 2016, Mw 7.8 Pedernales subduction earthquake, has raised many questions, especially as there is no record of recent eruptions at Cayambe volcano (Espín, 2022) On 28 December IG reported continued anomalous seismic activity at Cayambe characterized by volcano-tectonic and long-period earthquakes located 2–8 km below the summit. As many as 40 earthquakes had been recorded each day for the previous two weeks and starting on 24 December that number again increased, especially for volcano-tectonic events. A swarm on 27 December consisted of 100 small-magnitude events. A strong sulfur odor persisted, and cracks in the glacier near the summit that climbers has recently reported were visible during an overflight. In addition, deformation on the flanks was detected in GPS data (Global Volcanism Program, 2017)
Ground deformation	
Degassing	Actividad reciente – Fumarolas, sismos volcánicos

Ficha 24: Pinta

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Shield
Max VEI	
Recurrence rate VEI>3	1928 Confirmed Eruption (Global Volcanism Program)
Pyroclastic flows	
Lava flows	No attempts have been made to date the fissure-series basalts. Their pristine appearance, marked by well-preserved glassy flow tops devoid of vegetation, attests to a youthful age (Cullen, 1987)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	
Collapse potential	The main shield has steep flanks (15°) and is heavily vegetated, particularly at higher elevations. The summit, at 850 m, has a shallow collapse pit 500 m across (Cullen, 1987)
Primary lahar source	
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 25: Pululahua

Hazard	
Type of volcanic hazard	
Volcano type	Conformado por varios domos de lava y por un cráter (Hidalgo, s.f.) Irregularly shaped caldera, surrounded by a group of older lava domes (Papale, 1993) Dome complex, composed of 16 andesitic lava domes [...] caldera-like depression (Andrade, 2020)
Max VEI	Unit III (2,600 - 2,330 cal BP) consisting of at least four explosive 535 eruptive events (VEI ~4) which are thought responsible for the depression formation (Andrade, 2020) 5 (Global Volcanism Program, 2023)
Recurrence rate VEI>3	No registrado? (<u>última erupción >2200 años</u>) VEI 4: 450 BCE, VEI 5: 690 BCE

(Global Volcanism Program, 2023)		
Pyroclastic flows		Una gran parte del substrato de la planicie de San Antonio de Pichincha y de la zona de Tanlahua está conformada por los depósitos de los flujos de bloques y ceniza que ocurrieron como consecuencia de la formación de los varios domos de lava del Pululahua [...] El principal peligro asociado al crecimiento de un domo de lava es su potencial inestabilidad y la consecuente formación de flujos piroclásticos de bloques y ceniza [...] Tanto el Atacazo-Ninahuilca como el Pululahua han dado lugar a la formación de grandes flujos piroclásticos de pómez , sobre todo en el período holocénico. [...]El Pululahua, por su parte, provocó una serie de caídas de piroclastos ocurridas durante un período de tiempo estimado entre 2.500 y 2.200 años AP. El más grande de estos depósitos ocurrió hace 2.480 años, aproximadamente, cubriendo con ceniza una gran región del suroccidente del volcán hasta la provincia de Manabí. (Andrade, 2012)
Lava flows		
Lahars		Una de las consecuencias principales de la deposición de una ignimbrita es la formación de grandes lahares . En efecto, al estar conformadas por ceniza y fragmentos de pómez, las ignimbritas se erosionan fácilmente con el agua de los ríos y las lluvias, lo que da lugar a la formación de lahares (flujos de lodo). En el caso del Pululahua, en cambio, lahares primarios seguramente nunca ocurrieron en toda su historia , ya que el volcán nunca estuvo cubierto con glaciares. Es posible encontrar depósitos que muestran la ocurrencia de lahares secundarios que se produjeron como efecto de la removilización de las ignimbritas depositadas durante las grandes erupciones explosivas. (Andrade, 2012)
Tsunamis		
Phreatic explosion potential?	explosion	Existen agua termales ricas en gases en el flanco occidental del complejo volcánico (Hidalgo, s.f.)
Collapse potential		El principal peligro asociado al crecimiento de un domo de lava es su potencial inestabilidad y la consecuente formación de flujos piroclásticos de bloques y ceniza (Andrade, 2012)
Primary lahar source		En el caso del Pululahua, en cambio, lahares primarios seguramente nunca ocurrieron en toda su historia , ya que el volcán nunca estuvo cubierto con glaciares (Andrade, 2012)
Seismic unrest		Markers of its current activity include seismic signals and CO2 degassing (IG-EPN, 2016; Padrón et al., 2008). Both are present at low levels and have remained constant over the last three decades, indicating that this dome complex is currently in a state of quiescence (Andrade, 2020)
Ground deformation		
Degassing		Los gases muestreados en estas fuentes presentan una firma geoquímica típica de sistemas asociados a volcanes. (Hidalgo, ???) Markers of its current activity include seismic signals and CO2 degassing (IG-EPN, 2016; Padrón et al., 2008). Both are present at low levels and have remained constant over the last three decades, indicating that this dome complex is currently in a state of quiescence (Andrade, 2020) A total of 172 and 217 soil CO2 efflux measurements were taken at the surface environment of Pululahua and Cuicocha calderas respectively, by means of the “ accumulation chamber ” method during the summer of 2006 to constrain the total CO2 output from the studied area. Soil CO2 efflux values ranged from non-detectable up to 48.5 and 141.7 g m– 2 d– 1 for Cuicocha and Pululahua calderas respectively (Padrón, 2008) Existen agua termales ricas en gases en el flanco occidental del complejo volcánico (Hidalgo, s.f.)

Ficha 26: Pumayacu

Type of volcanic hazard	
--------------------------------	--

Volcano type	Complejo de domos (GAD Municipal de Quijos, 2015)
Max VEI	
Recurrence rate VEI>3	
Pyroclastic flows	Mediante una prueba de carbono 14 a madera carbonizada encontrada dentro de uno de los depósitos de flujos piroclásticos , se determinó una edad de 4400 años de antigüedad. (Barragán, 2012)
Lava flows	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits, ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites , lahars deposits, and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010)
Lahars	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits, ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites, lahars deposits , and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	Aliso's higher elevations (max. 4300m) were glaciated in the Pleistocene , however today a sub-tropical cloud forest prevails at its lower elevations (min. 1800m) (Hall & Mothes, 2010)
Collapse potential	Rhyolitic domes and dome-collapse deposits , ignimbrites, lava flows of Si-andesites and dacites, lahars deposits, and their reworked products are all recognized (Hall & Mothes, 2010)
Primary lahar source	
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 27: Quilotoa

Hazard	
Type of volcanic hazard	
Volcano type	Caldera Volcánica / Lago cratérico
Max VEI	6
Recurrence rate VEI>3	VEI 6 – 1280 (Global Volcanism Program, 2023) El volcán Quilotoa es un ejemplo de volcanismo dacítico en un lago cratérico. Está ubicado en el Frente Volcánico al Oeste de la ciudad de Latacunga. Ha tenido una serie de erupciones plinianas de tamaño moderado a grande (VEI = 4 – 6), a intervalos comprendidos entre 10 y 15 mil años . Al menos ocho ciclos eruptivos han sido reconocidos en el Quilotoa en los últimos 200.000 años (IG)
Pyroclastic flows	Montañas altas, compuestas de rocas terciarias al W y al E del centro volcánico, canalizaron los flujos piroclásticos pasados , y bajaron al N por el valle del mismo río. Además, flujos de ceniza de las erupciones más grandes rebosaron sobre la cresta topográfica al W de la caldera y bajaron unos kilómetros por el drenaje del río Yanayacu (Hall, 2008)
Lava flows	

Lahars	Sobreyacente a los depósitos de bloques y ceniza de los domos Q-II en el flanco oriental y a los paleosuelos en otras partes, se encuentran capas de caída de ceniza fina, rica sobretodo en material lítico. Dichas capas freato-magmáticas están cubiertas por depósitos de flujos de escombros (lahares) ricos en matriz que incorporan grandes cantos dacíticos (Fig. 3b). Estas unidades laháricas se relacionan con tres quebradas que descienden de las monturas más bajas en elevación en el filo oriental de la caldera, así como también con el valle anómalo que tiene su cabecera en el filo SE de la caldera (Hall, 2008) Lahars resulting from the remobilization of the 800 BP pyroclastic deposits caused additional destruction and burial along 200 km of the Toachi River valley down to the Pacific Ocean (Hall and Mothes, 1992) (DiMuro, 2008)	
Tsunamis		
Phreatic potential?	explosion	Se reconocen al menos ocho ciclos eruptivos durante los últimos 200 mil años. Cada uno fue caracterizado por un inicio abrupto del estilo freato-magmático, el cual fue seguido por una caída de lapilli de pómez, y luego una serie de surges, flujos de ceniza, y últimamente surges, todos ellos ricos en pómez y cristales, y menos líticos (Hall, 2008) Durante los últimos 800 años no ocurrió otra actividad volcánica del Quilotoa, sin embargo sí hubo una actividad freática anómala probablemente disparada por el terremoto de Riobamba en 1797, que al parecer acabó con toda la vegetación adentro de la caldera. Otra interpretación es que hubo una exolución masiva del gas CO₂ que ha venido atrapado en las aguas profundas de la laguna, liberado por el sacudón del terremoto (Hall, 2008)
Collapse potential	After the collapse of the dome during the first eruptive period, a crater lake developed (Gunkel, 2008)	
Primary lahar source	El volcán Quilotoa comprende una caldera sub-circular con una laguna de 3,6 Km ² (ver figura 2), que tiene una profundidad de 256 m aproximadamente y un volumen de agua estimado de 0,35 Km³ (González, 2021)	
Seismic unrest		
Ground deformation		
Degassing	Substantial gas emissions occur from the lake surface near the southwestern shoreline. Sub-aqueous gas venting appears to be situated along a NNE-trending fault that crosses the lake bottom and the caldera walls (Aguilera et al., 2000). Catastrophic release of carbon dioxide from the lake was possibly responsible for cattle deaths reported in the past three centuries (Simkin and Siebert, 1994) (DiMuro, 2008)	

Ficha 28: Reventador

Type of volcanic hazard		
Volcano type	Estrato volcán compuesto	
Max VEI	4	
Recurrence rate VEI>3	VEI 3: 1973, 1960, 1958, 1944, 1936, 1929, 1926, 1912, 1898, 1894, 1856, 1844, 1843, 1797, 1691, 1590, 1541 VEI 4: 2002 (Global Volcanism Program, 2023)	
Pyroclastic flows	Los períodos eruptivos confirmados previo al que se inició en 2002 son: 1898-1912, 1926-1929, 1944, 1959-1960, 1972-1974 y 1976. Estas erupciones estuvieron caracterizadas por flujos piroclásticos menores , flujos de lava en bloques, flujos de lodo y caídas de ceniza (Hall et al., 2004). (IG)	
Lava flows	Los períodos eruptivos confirmados previo al que se inició en 2002 son: 1898-1912, 1926-1929, 1944, 1959-1960, 1972-1974 y 1976. Estas erupciones estuvieron caracterizadas por flujos piroclásticos menores, flujos de lava en bloques , flujos de lodo y caídas de ceniza (Hall et al., 2004). (IG)	

	The activity shifted to a more efusive style after December 2002, producing dozens of lava fows during the last 21 years (Naranjo et al. 2016; Arnold et al. 2017, 2019; Fig. 6c). These lava fows are andesitic in composition and they remain inside the volcano amphitheater without producing any impact to the population (Hidalgo, 2024)
Lahars	Los periodos eruptivos confirmados previo al que se inició en 2002 son: 1898-1912, 1926-1929, 1944, 1959-1960, 1972-1974 y 1976. Estas erupciones estuvieron caracterizadas por flujos piroclásticos menores, flujos de lava en bloques, flujos de lodo y caídas de ceniza (Hall et al., 2004). (IG) Over several years, the pyroclastic density currents deposits were remobilized by the heavy rains typical of the Amazonian basin and produced lahars afecting the road linking Quito with Lago Agrio (Hidalgo, 2024) Eruptive phases during the 2002 eruption: 11 November- 0630: Strong smell of sulfur noted in Quito. Lahars block local highway thta borders Coca River. High seismicity recorded (Moxey, 2005) “Given the large amount of pyroclastic material left by the eruption and the frequent and abundant rains that followed, a few weeks later, large debris flows (secondary lahars) began to occur, descending the Marker and El Reventador riverbeds, which drained the interior of the amphitheater and caused significant effects on oil pipelines and roads. Mudflows continue to this date (2023).” Vallejo, 2024)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	The 2002 eruption: The overall tephra volume ranks the eruption at VEI 4, making it the most explosive event during historical times at El Reventador and in Ecuador in more than a century. Phenomenological observations and geological investigations point to a strong phreatomagmatic interaction in the eruption process (Hall et al., 2004). This is evidenced by (1) a high degree of magma fragmentation leading to fine-grained ash-fall deposits, (2) the presence of angular fragments of basement rocks and older lavas commonly incorporated as xenoclasts in the bombs, and (3) large amounts of vapour seen in the eruption column (Samaniego, 2008) The highly explosive character of this eruption is explained by elevated water (and other volatile species) content of the pre-eruptive magma. A closed-system degassing regime is also consistent with the rapid increase in eruption intensity and corresponding magnitude of the initial explosive onset (VEI 4). Phreatomagmatism probably played an additional role in enhancing the explosivity, as suggested by phenomenological and geological observations (Samaniego, 2008)
Collapse potential	Este complejo volcánico está constituido por dos edificios, uno antiguo que ha sufrido dos colapsos sectoriales dejando un gran escarpe de deslizamiento; y el cono actual que ha crecido dentro del anfiteatro dejado por dichos deslizamientos (IG) “the volcano faced three destructive events: A. Destruction of the upper part of the summit leaving a north-south breached crater (3 November 2002), B. NE border crater collapse (2017), and C. NW flank collapse (2018)” (Vallejo, 2024)
Primary lahar source	Given the large amount of pyroclastic material left by the eruption and the frequent and abundant rains that followed, a few weeks later, large debris flow (secondary lahars) began to occur, descending the Marker and El Reventador riverbeds, which drained the interior of the amphitheater and caused significant effects on oil pipelines and roads. Mudflows continue to this date (2023) [...] The large amount of pyroclastic material left inside the amphitheater by the eruption of 2002 in addition to the products of the subsequent activity of the last 20 years, with the persistent and intense rains that occur in the area, can trigger lahars that could affect oil pipelines and interrupt the main road, e.g., lahars occurred along the Reventador River in May 2003 (Vallejo, 2024)
Seismic unrest	Resumen volcánico del año 2019 – Sismicidad: Agitación alta (Bernard, 2020)
Ground deformation	
Degassing	Actividad reciente: Explosiones, emisiones de gases y ceniza, flujos de lava, lahares (IG)

Ficha 29: Sangay

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato Volcán
Max VEI	3-4
Recurrence rate VEI>3	VEI 3: 1934, 1728, 1628 (Global Volcanism Program, 2023) Timeline of volcanic activity on the Continental Ecuadorian Arc (Hidalgo, 2024) VEI 3-4 1628; VEI 2-3 1903; VEI 3 1913-1941-1959; VEI 2-3 2021 (EPN & PNUD, 2022)
Pyroclastic flows	Other phenomena like lava flows, pyroclastic density currents , and lahars are also common, but they are usually restricted to the volcanic ring plain (< 10 km away from the summit) (Vasconez, 2022) Pyroclastic density currents related to lava front collapses also occurred throughout the entire study period , usually reaching a run-out distance of < 3 km towards the eastern and southeastern flanks (Fig. 5d & 5f). However, during 2019-ongoing eruption, pyroclastic density currents reached more than 4 km from the vent , with a maximum length of 7.6 km on 11 December 2019 (Vasconez, 2022)
Lava flows	Other phenomena like lava flows, pyroclastic density currents, and lahars are also common, but they are usually restricted to the volcanic ring plain (< 10 km away from the summit) (Vasconez, 2022) From 25 July to 9 August 2021 a thick lava flow was emitted through the central vent and emplaced in the southeastern ravine. The lava covered an area of 125000 m ² and its maximum runout distance was 0.8 km according to an estimation performed using the Planet Explorer image from 4 August, 2021. The flow was observed and reported on various occasions by the inhabitants of Macas, the closest city to the volcano at 45 km to the southeast (Hidalgo, 2022)
Lahars	The accumulation of debris eventually produces lahars and, on several occasions, these phenomena affected the main highway leading to Macas city, some 45 km to the south of the volcano (Hidalgo, 2024) Other phenomena like lava flows, pyroclastic density currents, and lahars are also common, but they are usually restricted to the volcanic ring plain (< 10 km away from the summit) (Vasconez, 2022) the occurrence of secondary lahars triggered by heavy rainfall that remobilizes this loose material has become a typical phenomenon during the ongoing eruption and has temporarily dammed the Upano river at its confluence with the Río Volcán, 25 km away from the summit (Vasconez, 2022) The loose new volcanic deposits and debris have been mobilized by rain, generating secondary lahars, which transport the blocks and ash downstream into the Upano River, forcing the closure of the Macas-Puyo road bridge (45 km downstream) on at least 8 occasions . (Hidalgo, 2022) Even though Sangay is a remote volcano with the closest inhabited areas as far away as 25 km, the valleys that are born high on the volcanic edifice reach main rivers where there are people living on the abandoned terraces and flood plains. Depending on the volume of the newly deposited volcanic material, communities as far as 40 –60 km downstream of Sangay Norte and Culebrillas rivers could be affected by secondary lahars. In fact, on July 3, 2022, a lahar descended through these drainages reaching the road to Pablo Sexto, 45 km from the volcano (Hidalgo, 2022)

		Rain-triggered lahars in the Río Volcán partially blocked the Upano-Volcán confluence, forced the evacuation of about 30 persons living on the riverbanks of the Río Upano and damaged the access road to the bridge of Macas city, the capital of Morona Santiago province (Bernard, 2022)
Tsunamis		
Phreatic potential?	explosion	A joint expedition between the IRD (former ORSTOM) and the IG-EPN between November 24 and December 12, 1995 provided further description of the activity of the volcano with the use, for the first time, of a portable seismograph (Global Volcanism Program 1996). During this expedition, the scientists observed continuous fumarolic steaming, frequent phreatic explosions (from a few hours to 26 min of interval), and rock falls from the western dome (Bernard 2024)
Collapse potential		Moreover, two large landslide scars account for the main morphology of Sangay volcano (Valverde et al. 2021). These scars and their associated debris avalanches occurred between 250-100 ka BP and 29 ka BP, respectively (Monzier et al. 1999; Valverde et al. 2021), and both affected the eastern and southeastern flanks leaving debris avalanche deposits where the city of Macas is now located with more than 24,400 inhabitants (Vasconez, 2022)
Primary lahar source		Solo lahares secundarios
Seismic unrest		
Ground deformation		“We detect deformation on or near the proximity of Galeras, Reventador, Tungurahua, Guagua Pichincha, Sangay, and Cerro Auqui huato volcanoes” (Morales, 2016)
Degassing		Actividad reciente: Explosiones estrombolianas, columnas de ceniza, generación de flujos piroclásticos, flujos de lava y actividad fumarólica (IG, s.f.)

Ficha 30: Santiago

Type of volcanic hazard		
Volcano type		Shield volcano (Gibson, 2012)
Max VEI		0
Recurrence rate VEI>3		The most recent eruption was in the east in 1906 at Sullivan Bay (Figure 2) and, prior to that, in the west at James Bay in 1754. Present eruption rates on Santiago are considerably lower than in westernmost Galápagos where outpourings of basaltic magma are significantly more voluminous and occur approximately every 5 years, e.g., Fernandina and southern Isabela (Gibson, 2012)
Pyroclastic flows		
Lava flows		Eruptions of basaltic lava have occurred since Darwin’s visit but these are confined to the eastern side of the island, such as the 1906 lava flow at Sullivan Bay (Simkin and Siebert 1994) . (Herbert, 2009)
Lahars		
Tsunamis		
Phreatic explosion potential?		At the east and west ends of the island, several youthful tuff cones up to 400 m high border Sullivan Bay, James Bay, and Buccaneer Cove. Over 20 of these cones, including several small nearby islands such as Bartholomew and the Bainbridge Rocks, were

	produced by phreatic and litoral eruptions. The cones are constructed of partially hydrated basaltic glass fragments and contain up to 10 percent blocks of older lava (Swanson, 1974)
Collapse potential	Figure 10. Promontory at the north end of Buccaneer Cove. Darwin interpreted this as the wreck of a large crater. (Image courtesy of A. Thurman.) (Herbert, 2009)
Primary lahar source	
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 31: Sierra Negra

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Shield
Max VEI	3 (Global Volcanism Program)
Recurrence rate	VEI 3: 2005, 1979, 1953 (Global Volcanism Program)
Pyroclastic flows	
Lava flows	Según el monitoreo realizado por el IGEPN, la erupción se dividió en dos fases principales: La primera fase duró menos de un día (solo el 26 de Junio), pero fue la más energética. Durante este periodo todas las fisuras (1, 2, 3, 4 y 5) estuvieron activas, emitiendo flujos de lava que alcanzaron hasta 7 km pendiente abajo sin llegar al mar. Por otro lado, la segunda fase eruptiva duró aproximadamente 57 días (del 27 de junio al 23 de Agosto) y estuvo focalizada en la fisura 4. Durante este periodo los flujos de lava emitidos alcanzaron el mar el 6 de julio, incrementando la superficie del territorio Ecuatoriano en 1.5 km2 en el sector de Bahía Elizabeth. Durante este periodo eruptivo, el volcán Sierra Negra emitió flujos de lava que cubrieron aproximadamente 30,6 km2. Gracias a la red permanente de monitoreo del IGEPN y la información satelital, en la última semana se ha registrado un descenso continuo en la actividad eruptiva, anunciando el fin de este episodio eruptivo que duró 58 días. No se descarta que a futuro pueda ocurrir un nuevo episodio, como ya ha sucedido en anteriores erupciones en los volcanes de Galápagos, por lo que se mantiene un monitoreo constante. (IG, 2018) Adicionalmente a la zona de alto riesgo en la ladera norte, en el flanco sur existe una zona de riesgo moderado fundamentada en la concentración de humanos en proximidad al joven centro eruptivo prehistórico conocido como Cerro Pelado (Reynolds, 1997)
Lahars	As at many other high-temperature volcanic fumarole fields, molten sulfur forms droplets, pools, and small flows around the periphery of individual fumaroles. Conditions favoring formation of molten sulfur are discussed by Colony and Nordlie (1973). Changes in near-surface thermal regime probably contribute to remelting and redeposition of sulfur. These authors also described "sulfur flows" 225 m long and 30 m wide that originate from the fumarole fields and implied that they flowed as liquid sulfur. However, examination of specimens from these long flows shows that they have fragmental textures of approximately 50% altered rock and 50% sulfur. The samples do not have a holocrystalline appearance. Instead, the

	flows resemble debris-flow or mud-flow deposits, rather than molten flow deposits. We suggest that there are rare periods when so much rain falls on the fumarole mounds that the altered sands and sulfur flow as a slurry off the deposit into the caldera moat (Goff, 2000)
Tsunamis	Ningún depósito de tsunamis ha sido descubierto a lo largo de la costa de Sierra Negra (Reynolds, 1997)
Phreatic explosion potential?	Sierra Negra muestra evidencia de explosiones freáticas prehistóricas. El ejemplo más dramático está ubicado a lo largo de la costa este de Cerro Ballena donde está ubicado un grupo de grandes conos de tefra . Los conos son producto de una fuerte actividad eruptiva submarina. Otros ejemplos de mar adentro incluyen las Islas Tortuga y Los Cuatro Hermanos . Cerca de Villamil las lavas han fluido en una laguna o en un sistema de aguas subterráneas poco profundas provocando explosiones freatomagmáticas extensas que han resultado en la formación de un discreto cono de tefra [...] Sierra Negra también conserva evidencia en la cumbre de explosiones freáticas históricas . La parte más alta de la pared occidental de la caldera está cubierta por un cristalino horizontal de ceniza freatomagmática (Reynolds, 1997)
Collapse potential	The Sierra Negra shield volcano on the western island, Isabela, is volcanically young and one of the most active volcanoes in the Galápagos. This volcano is 40–60 km wide and has, with its 9– 10 km diameter caldera, has the largest but simultaneously the shallowest elliptical caldera of all volcanoes of the Galápagos. The caldera itself has undergone several episodes of collapse, upheaval and deformation (Jordá-Bordevore, 2016) While the Sierra Negra caldera collapse is not of the trapdoor type, but rather the “piston-Type” (Lipman, 1997), the trapdoor term is suitable to describe the intra-caldera faulting on Sierra Negra (Jonsson, 2009)
Primary lahar source	
Seismic unrest	Al momento de la emisión del presente reporte, la actividad del Volcán Sierra Negra es catalogada como: superficial baja tendencia sin cambio e interna moderada tendencia sin cambio (IG, 2022) Actualmente, el volcán ha retornado a sus niveles de base en cuanto a sismicidad , sin embargo, se registra un nuevo proceso de inflación, lo cual sugiere el ingreso de nuevo magma (roca fundida a altas temperaturas) a su reservorio (IG, 2019)
Ground deformation	Sin embargo, el sistema magnético asociado mantiene una tendencia inflacionaria, que, a pesar de ser leve, sugiere el ingreso de magma a su reservorio [...] Al momento de la emisión del presente reporte, la actividad del Volcán Sierra Negra es catalogada como: superficial baja tendencia sin cambio e interna moderada tendencia sin cambio (IG, 2022) Durante 2020 el volcán Sierra Negra ha tenido una actividad interna y superficial baja. Sin embargo, una deformación lenta del volcán indica el movimiento de magma en su interior (Bernard, 2020)
Degassing	Adicionalmente de forma general se realizó una verificación de los cambios morfológicos y superficiales que ha sufrido la zona de los campos fumarólicos, el más llamativo es la falta de emisiones en la fumarola más baja en comparación con la última visita técnica en Nov. 2019, donde esta fumarola fue reportada como activa [...] Al momento de la emisión del presente reporte, la actividad del Volcán Sierra Negra es catalogada como: superficial baja tendencia sin cambio e interna moderada tendencia sin cambio (IG, 2022)

Ficha 32: Soche

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Strato volcano, caldera, lava domes Complejo de domos (Santamaría, 2017)
Max VEI	5, aproximadamente 6650 BCE (Global Volcanism Program, 2023) Última erupción 8600 AP (Beate, 1994)
Recurrence rate VEI>3	1 solo evento registrado de VEI 5, a partir de C14 (Global Volcanism Program, 2023)

Pyroclastic flows	A Plinian eruption occurred about 9600 cal BP, based on radiocarbon ages of the thick pumice-rich pyroclastic flows deposited in the Ecuadorian and Colombian Interandean Valley (Bablon, 2022)
Lava flows	A lava flow of the Soche Volcano dated 9.7 ka BP by Hall and Beate (1991) was displaced. (Tibaldi, 2007)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	
Collapse potential	La única erupción reconocida de Soche fue acompañada por la generación de flujos piroclásticos y por la extrusión y colapso de domos dacíticos (Santamaria, 2017)
Primary lahar source	
Seismic unrest	
Ground deformation	
Degassing	

Ficha 33: Sumaco

Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato Volcán
Max VEI	4 (Salgado, 2021) The >20 cm thickness of the tephra layers and the lithics' size suggest that the eruptions had a VEI between 3 and 4 [...] Therefore, we believe it is reasonable to consider that Sumaco volcano produced a large eruption in the VEI 3–4 category, approximately every 900–1000 years , an assertion not yet confirmed by radiocarbon dating of the intermediate layers, since dateable material is scarce (Salgado, 2021)
Recurrence rate VEI>3	Es muy probable que el volcán Sumaco haya tenido un período de actividad entre 1650-1895, habiendo reportes de al menos tres eventos explosivos históricos, el más reciente en 1933 (Barragán, 2004) On the basis of summit morphology, it has been reported that there were possible eruptions between 1650 and 1895 AD (Colony and Sinclair 1928), and again in 1933 AD (Simkin and Siebert 1994); however, there are no photos or historic reports to support these claims, and the ages of lava flows from Sumaco have not been determined (Garrison, 2017) En busca de evidencias de las erupciones volcánicas más recientes, se realizó una perforación manual en la laguna Guagua Sumaco ubicada en el flanco sureste del volcán (3.500 msnm). Lo cual permitió conocer que el volcán experimentó al menos seis (6) eventos explosivos de pequeña magnitud durante los últimos 360 años (Salgado, 2020) The first, belonging to activity in the last ~400 years, has produced low-level eruptions (VEI 1–2) that were perhaps barely noticed by inhabitants in the few communities that then existed in the surrounding region. Moreover, the eruptive activity was not strong enough to be recorded by clerics or priests in nearby Baeza or Archidona townships, both founded to the early 1600's. Ashfalls were not extensive, and apparently, neither associated lavas nor pyroclastic flows arrived at the base of the cone during recent historical activity (Salgado, 2019). Alternatively, more vigorous eruptive activity (VEI

	3–4), where ashfall deposits of >50 cm thickness are found out to 14 km from the crater at Wild Sumaco Lodge and Pacto Sumaco signifies more powerful and significant eruptions whose consequences would have been notable and created impacts upon early cultures then living in the area (Salgado, 2021) The >20 cm thickness of the tephra layers and the lithics' size suggest that the eruptions had a VEI between 3 and 4 [...] Therefore, we believe it is reasonable to consider that Sumaco volcano produced a large eruption in the VEI 3–4 category, approximately every 900–1000 years, an assertion not yet confirmed by radiocarbon dating of the intermediate layers, since dateable material is scarce (Salgado, 2021)
Pyroclastic flows	Se ha identificado dos depósitos de flujos piroclásticos ubicados al margen izquierdo del río Suno, al Suroriente del volcán Sumaco . Ambos depósitos aparentemente son similares y se encuentran a una distancia entre 33 a 40 km del ventos actual (Salgado, 2019)
Lava flows	The summit cone build inside the avalanche scar, is mainly constituted by scorias intercalated by massive lava flows (Eissen, 2002) Descripción geológica de los productos volcánicos pertenecientes al Sumaco-Flujos de Lava del volcán Sumaco: Se han identificado al menos 3 flujos de lava ubicados al Sur del edificio (ver Figura 3.54). Los flujos de lava tienen una longitud promedio de 21 km. En general, son flujos de lava poco viscosos que han alcanzado grandes distancias. (Salgado, 2019) • Flujo de lava Río Hollín: Este flujo de lava aflora en la parte media y distal en el flanco Sur-occidental del Sumaco. El flujo de lava fue poco viscoso y avanzó pendiente abajo unos 24 kilómetros aproximadamente. • Flujo de lava Río Guamaní: Este flujo de lava se encuentra al Sur del edificio, alcanzando una longitud de 21 km. El afloramiento tipo se encuentra en las coordenadas (UTM) 18S 205907/9920215, localizado al margen derecho del Río Guamaní. • Flujo de lava efluente del río Huataracu: Este flujo de lava aflora en la parte Sur del volcán Sumaco. También se caracterizan por ser poco viscosos al recorrer una distancia media de 17 kilómetros medidos desde el ventos actual. El flujo de lava se encuentra en las coordenadas (UTM) 18S 212862 / 9926900 y descendió por un drenaje pre-existente efluente natural del río Huataracu. (Salgado, 2019) Lava flows from the volcano extend at least 20 km south of the volcano and overlay Cretaceous sedimentary rocks of the Napo Formation (Salgado, 2021)
Lahars	Descripción geológica de los productos volcánicos pertenecientes al Sumaco- Depósitos de flujo de lodo y escombros (Lahares) (Salgado, 2019) • Karutambo: El depósito se encuentra en las coordenadas (UTM) 18S 234090 / 9931615, 563 msnm [...] El afloramiento, se encuentra a 100 metros siguiendo la carretera de la Hostería Karutambo, en la margen izquierda del río Suno, al Sur-Este del volcán. • Puente de la ciudad de Loreto, provincia de Orellana: El afloramiento se ubica en la carretera principal antes de cruzar el puente sobre el río Suno. Esta sección se encuentra en las coordenadas: (UTM) 18S 242753/9922926, 411 msnm.
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	
Collapse potential	Los flancos del volcán, cubiertos por selva, tienen pendientes entre 12-14° en su parte baja y valores entre 28-30° en las partes altas. El volcán posee dos cicatrices de colapso de su edificio volcánico (Salgado, 2019) Based on the geomorphological analysis from aerial photographs and satellite imagery, we identified two scars associated with large slides on the flanks of Sumaco. The first prominent scarp is located on the south and wraps around to the northwestern part of the volcano. It has a semicircular shape open to the north (Scarp 1) (Fig. 3a). It is related to an early collapse of the volcanic structure (Fig. 3a), and its drainage is predominantly into the Suno river (north and east) and Hollín river [...] The second scar is found in the upper part of the volcano, located 160 m below the summit; it has a flat appearance where a break-in-slope occurred, and to the north, it is covered by younger, thick lava flows (Fig. 3b). This latest stage is termed Current Sumaco. The

	two landslide scars provided us with an idea of the complex construction and destruction processes that give rise to the cone's current morphology (Salgado, 2021)
Primary lahar source	
Seismic unrest	Actividad reciente - Desconocida (IG, s.f.)
Ground deformation	Actividad reciente - Desconocida (IG, s.f.)
Degassing	Actividad reciente - Desconocida (IG, s.f.)
Ficha 34: Tungurahua	
Type of volcanic hazard	
Volcano type	Estrato volcán compuesto
Max VEI	5
Recurrence rate VEI>3	VEI 3: 2012, 2011, 2010, 1999,1773, 1640, 1350, 600, 350, 100, 50 BCE, 100 BCE, 500 BCE VEI 4: 1916, 1886, 730, 7750 BCE VEI 5: 1010 BCE (Global Volcanism Program, 2023) Timeline of volcanic activity on the Continental Ecuadorian Arc (Hidalgo, 2023)
Pyroclastic flows	La actividad del Tungurahua III habría comenzado con la emisión del gran flujo de lava de las Juntas hace aproximadamente 2300 años (Hall et al., 1999). Desde el año 1300 AD el Tungurahua ha producido erupciones con flujos piroclásticos , caídas de ceniza, flujos de lava y lahares, al menos una vez por siglo (LePennec et al., 2008) (IG) On July 14, 2006, the first PDC-forming eruption occurred , affecting inhabited areas around the volcano [...] Since 2008, several Vulcanian pyroclastic density currents (PDC) forming eruptions took place (Hall et al. 2013, 2015; Hidalgo et al. 2015; Gaunt et al. 2020), but they were smaller than those of 2006 (Hidalgo, 2024)
Lava flows	La actividad del Tungurahua III habría comenzado con la emisión del gran flujo de lava de las Juntas hace aproximadamente 2300 años (Hall et al., 1999). Desde el año 1300 AD el Tungurahua ha producido erupciones con flujos piroclásticos, caídas de ceniza, flujos de lava y lahares, al menos una vez por siglo (LePennec et al., 2008) (IG) 1773-82 eruptive period: From the above documentation, among other uncited reports, we infer three essential points. First, the lava that went “deep inside the valley” and dammed the Pastaza River (A2) is clearly the one painted as a dark blocky bench in Juive on the northeastern side of the volcano (Fig. 3a). On the lower gently inclined Juive area, the andesitic lava must have flowed quite slowly before reaching the Pastaza River, and Secondly, the report of people escaping from the “spate of lava” (A2) in Banos obviously ~ relates to a hurried evacuation during PDC emplacement in the Vazcún valley, and not to the advance of a lava flow. Thirdly, the records of the 1773 event strongly suggest that the activity started in February 1773 and lasted with several eruptive phases till around 1781-82 (Le Pennec, 2015)
Lahars	La actividad del Tungurahua III habría comenzado con la emisión del gran flujo de lava de las Juntas hace aproximadamente 2300 años (Hall et al., 1999). Desde el año 1300 AD el Tungurahua ha producido erupciones con flujos piroclásticos, caídas de ceniza, flujos de lava y lahares, al menos una vez por siglo (LePennec et al., 2008) (IG)

	1999- This activity produced the deposit of large amounts of volcanic material on the upper flanks of the volcano, which were remobilized by the frequent and intense rains in the area, leading to the generation of lahars that descended through all the drainages of the volcano, threatening the population and some infrastructure (Hidalgo, 2024) In addition, many substantial lahars took place in the course of the 1999- ongoing period, with fatalities in 2008 in the Vazcún valley. (Le Pennec, 2015) Table 2. Synthetic PDC activity in the Vazcún valley and Banos area, as reconstructed in this note from our study and previous works. (Le Pennec, 2015)
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	Variable magma water ratios, as suggested by the phreatomagmatic character of the Tungurahua III-1 pyroclastic deposits , would best explain this variation in eruptive style. For example, until the pyroclastic episode of Tungurahua III-1, the volcano probably had a lower elevation and a limited icecap, resulting in a less phreatomagmatic and a more effusive behavior. As the volcano attained a greater height during Tungurahua III-2 and supported a larger icecap, phreatomagmatic activity became progressively more important (Hall, 1999)
Collapse potential	Hall et al. (1999) dividen a este volcán en tres edificios sucesivos, Tungurahua I, II y III, siendo el tercero el edificio actual. Los dos edificios anteriores sufrieron colapsos sectoriales hace 30 y 3 ka , cuyos depósitos de avalancha afloran en los valles de los ríos Chambo y Patate (IG) the older edifice activity only began around 293 ± 10 ka, and ended at 79 ± 3 ka. After ~50 ka of quiescence, the second edifice started growing at 29 ± 2 ka after a major sector collapse, and itself collapsed at ~3 ka. Since then, the third edifice filled the amphitheatre and is still active (Le Pennec, 2015)
Primary lahar source	Four of Ecuador's active volcanoes have glacierized peaks: Antisana, Cotopaxi, Sangay, and Tungurahua (USGS, 1999) Volumen estimado 0.17 km cúbicos , utilizando los datos de Caceres (2010)
Seismic unrest	En 2018, tras dos años de inactividad dejó de ser catalogado como "en erupción" y ahora se considera un volcán "activo". Actualmente la actividad sísmica es baja y no hay emisiones de gas, por lo que se cree que el volcán ha retornado a la calma (IG)
Ground deformation	The last eruptive phase took place in February–March 2016 with Vulcanian and Strombolian activity. Short runout PDCs were also produced but they did not reach inhabited areas. Since then, no surface activity has been observed at Tungurahua and the geophysical monitored signals returned to the background (pre-1999) level (Hidalgo, 2024)
Degassing	Explosiones strombolianas, vulcanianas, emisiones subcontinuas de gas y ceniza, flujos piroclásticos, fumarolas, actividad hidrotermal [...] En 2018, tras dos años de inactividad dejó de ser catalogado como "en erupción" y ahora se considera un volcán "activo". Actualmente la actividad sísmica es baja y no hay emisiones de gas, por lo que se cree que el volcán ha retornado a la calma. (IG) The last eruptive phase took place in February–March 2016 with Vulcanian and Strombolian activity. Short runout PDCs were also produced but they did not reach inhabited areas. Since then, no surface activity has been observed at Tungurahua and the geophysical monitored signals returned to the background (pre-1999) level (Hidalgo, 2024)

Ficha 35: Wolf

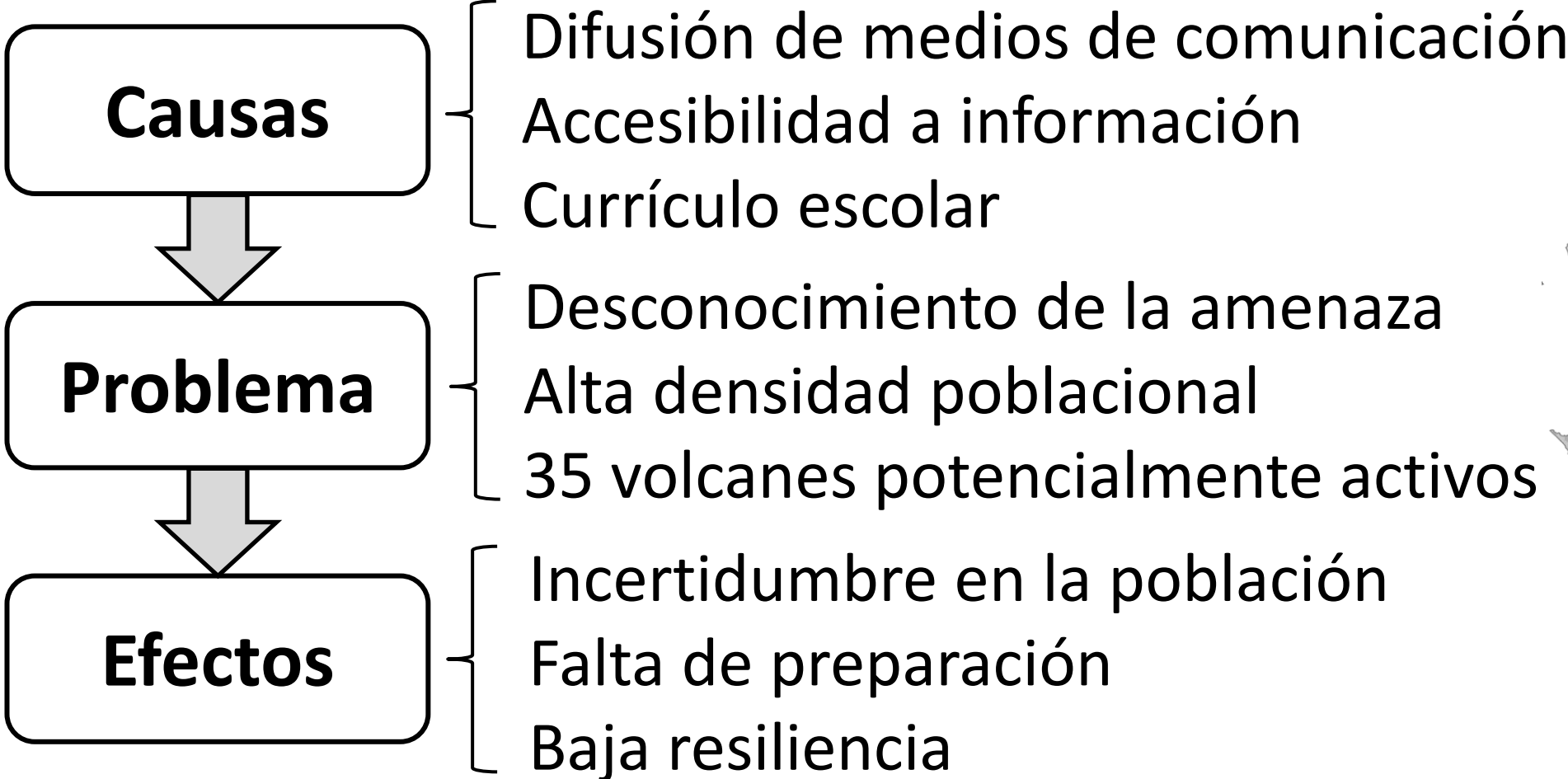
Type of volcanic hazard	
Volcano type	Escudo
Max VEI	4

Recurrence rate VEI>3	VEI 4: 2015 (Global Volcanism Program, 2023) Recurrencia de intervalo de erupciones explosivas con VEI 4 es de 3160 años (Loughlin, 2015)
Pyroclastic flows	
Lava flows	El volcán Wolf (altura: 1710 m snm) ubicado en la parte norte de la Isla Isabela en el Archipiélago de Galápagos, inició una nueva fase eruptiva a las 23h20 del 6 de enero de 2022, hora de Galápagos (00h20 del 7 de enero de 2022, hora de Ecuador continental). La evolución de esta erupción se ha vigilado mediante estaciones sísmicas y diferentes sistemas satelitales, mediante los que se ha constatado la emisión y avance de flujos de lava y columnas de gas. Los datos de deformación analizados hasta el 5 de enero (fecha de la última imagen de la constelación Sentinel-1-ESA), evidenciaron una importante deformación previa a la erupción del 06 de enero en la Isla Isabela del Archipiélago de Galápagos. Los flujos de lava han sido emitidos por al menos 3 fisuras ubicadas en el flanco suroriental del volcán , y han alcanzado una distancia máxima de aprox. 16.5 km, sin llegar a la margen costera (Fig. 1. actualizada el 11/01/2022), y han cubierto una superficie aproximada de 7.4 km ² (IG, 2022) Aparente final de periodo eruptivo: Los flujos de lava fueron emitidos por una fisura radial de ~8 km con al menos 5 ventos ubicados en el flanco suroriental del volcán . Las lavas fluyeron alcanzado una distancia máxima aproximada de 18.5 km, sin que hayan alcanzado al margen costero (Figura 1) y han cubierto una superficie aproximada de más de 30 km ² (IG, 2022)
Lahars	
Tsunamis	
Phreatic explosion potential?	2015 Lava fields: Furthermore, footage from the lava entering the ocean (https://www.youtube.com/watch?v=TibkSAH3i8I) shows a relatively low output rate from narrow lava fronts and no hydromagmatic explosion (Bernard, 2019)
Collapse potential	Wolf volcano, an active shield volcano on northern Isabela Island in the Galapagos Archipelago, has undergone two major stages of caldera collapse , with a phase of partial caldera refilling between (Geist, 2005) The southern floor of Wolf caldera is covered by voluminous avalanche deposits from several major failures of the caldera wall (Fig. 4). All of these deposits are unconformably overlain by 1982 lava. Satellite radar interferometry (InSAR) shows that the largest avalanche deposits subsided 11 cm between 1992 and 1998 (Amelung et al., 2000), a rate of 17 mm/year. A similarly large avalanche was associated with the 1989 eruption of Fernandina (Chadwick et al., 1991), suggesting that large-scale mass wasting well after caldera collapse is a common erosional process related to the evolution of calderas in Galápagos volcanoes (Geist, 2005) The caldera-filling stage involved the accumulation of >35 km ³ of lava. Then, the caldera collapsed by at least 450 m (the height of the stranded bench), although it is unclear whether this occurred incrementally or in a single event (Geist, 2005) This implies that asymmetrical caldera collapse continues to be most likely on the southeastern side of Wolf volcano in the future (Xu, 2023)
Primary lahar source	
Seismic unrest	El conteo sísmico de eventos diarios (VT y LP) muestra un abrupto incremento a inicio de enero acorde al inicio de la erupción en Wolf. De igual manera se ve un decrecimiento progresivo a medida que transcurre el tiempo (Figura 3). Los parámetros de vigilancia que nos permiten evaluar la evolución de la erupción son: actividad sísmica, desgasificación, deformación, alertas termales, emisiones de ceniza. Estos parámetros alcanzaron su pico máximo a inicios de enero 2022 tras lo cual han ido decayendo hasta volver a valores de base (no eruptivos) . En la actualidad, a través de imágenes satelitales no se observa avance de los frentes de lava, los cuales parecen haberse detenido a 150-200 metros de la línea de costa y se han ido enfriado progresivamente. (IG, 2022)

Ground deformation	Al momento, el volcán Wolf presenta una deformación notable al noroeste y sureste de la caldera (deflación en color azul), la cual está relacionada a la pérdida de volumen dentro de la caldera debido a la emisión de magma hacia la superficie durante la erupción. En las últimas semanas en noroeste de la caldera se observa un descenso en la tasa de deflación, lo que podría significar que se ha reducido la emisión de material lávico. Además, no hay evidencia de una nueva intrusión de magma (inflación) que indique aumento de actividad eruptiva a corto plazo. En la Figura 8, se observa la serie temporal de la deformación del suelo cuantificada en el punto marcado con la estrella amarilla en la Figura 7, situado al interior de la caldera. La deformación en línea de vista del satélite marca una suave tendencia positiva (inflación) de hasta 50 mm durante el periodo comprendido entre el 03/02/2020 y 03/12/2021 (antes de la erupción). Por lo contrario, desde el 03/12/2022 se observa una pendiente negativa abrupta que llega hasta el 03/04/2022 y marca ~300 mm de deflación (asociado a la emisión de magma durante la erupción) [...] Los parámetros de vigilancia que nos permiten evaluar la evolución de la erupción son: actividad sísmica, desgasificación, deformación, alertas termales, emisiones de ceniza. Estos parámetros alcanzaron su pico máximo a inicios de enero 2022 tras lo cual han ido decayendo hasta volver a valores de base (no eruptivos). En la actualidad, a través de imágenes satelitales no se observa avance de los frentes de lava, los cuales parecen haberse detenido a 150-200 metros de la línea de costa y se han ido enfriado progresivamente. (IG, 2022)
Degassing	APARENTE FINAL DEL PERIODO ERUPTIVO : De igual forma, la desgasificación de dióxido de azufre (SO₂) muestra una tendencia descendente, de manera que para la fecha del presente informe ya ha pasado un mes sin reportes de emisiones de SO₂ [...] A partir del inicio de la erupción, se registraron emisiones superiores a las 60,000 toneladas. Posteriormente se observó un claro descenso en los valores de desgasificación. Hasta el corte del presente informe, hay 30 días consecutivos en que las emisiones registradas por los sensores satelitales son de cero toneladas. Esto se debe a que las emisiones de gas son de concentraciones muy bajas (por debajo del límite de detección) o incluso pudieran ser nulas [...] Los parámetros de vigilancia que nos permiten evaluar la evolución de la erupción son: actividad sísmica, desgasificación, deformación, alertas termales, emisiones de ceniza. Estos parámetros alcanzaron su pico máximo a inicios de enero 2022 tras lo cual han ido decayendo hasta volver a valores de base (no eruptivos). En la actualidad, a través de imágenes satelitales no se observa avance de los frentes de lava, los cuales parecen haberse detenido a 150-200 metros de la línea de costa y se han ido enfriado progresivamente. (IG, 2022)

Elaboración de base de datos de amenaza de los volcanes potencialmente activos del Ecuador

PROBLEMA



OBJETIVO GENERAL

Elaborar una base de datos de los **parámetros de amenaza volcánica actual** mediante la recopilación de información científica para el análisis preliminar del **Índice de peligrosidad de los volcanes potencialmente activos del Ecuador**.

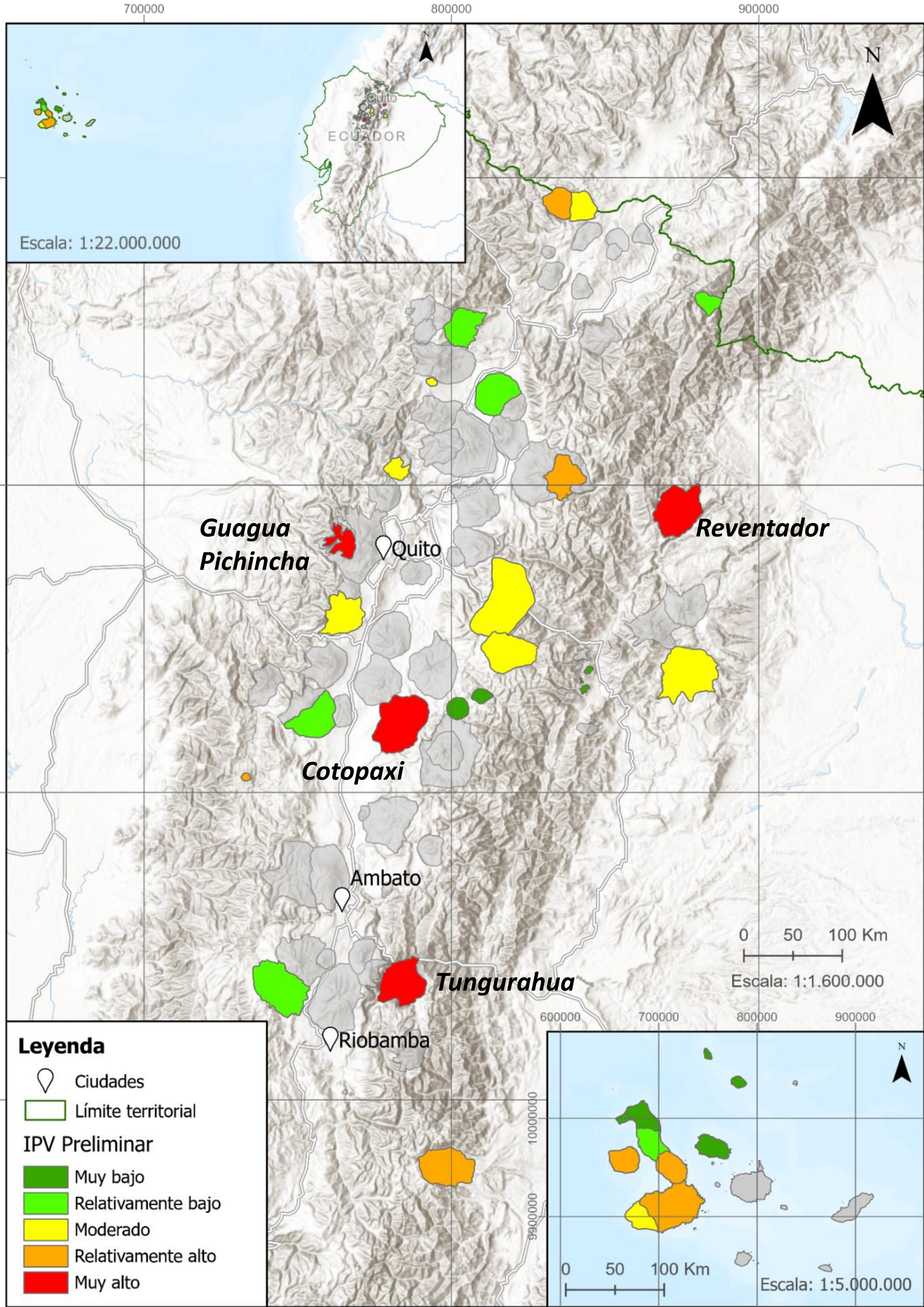
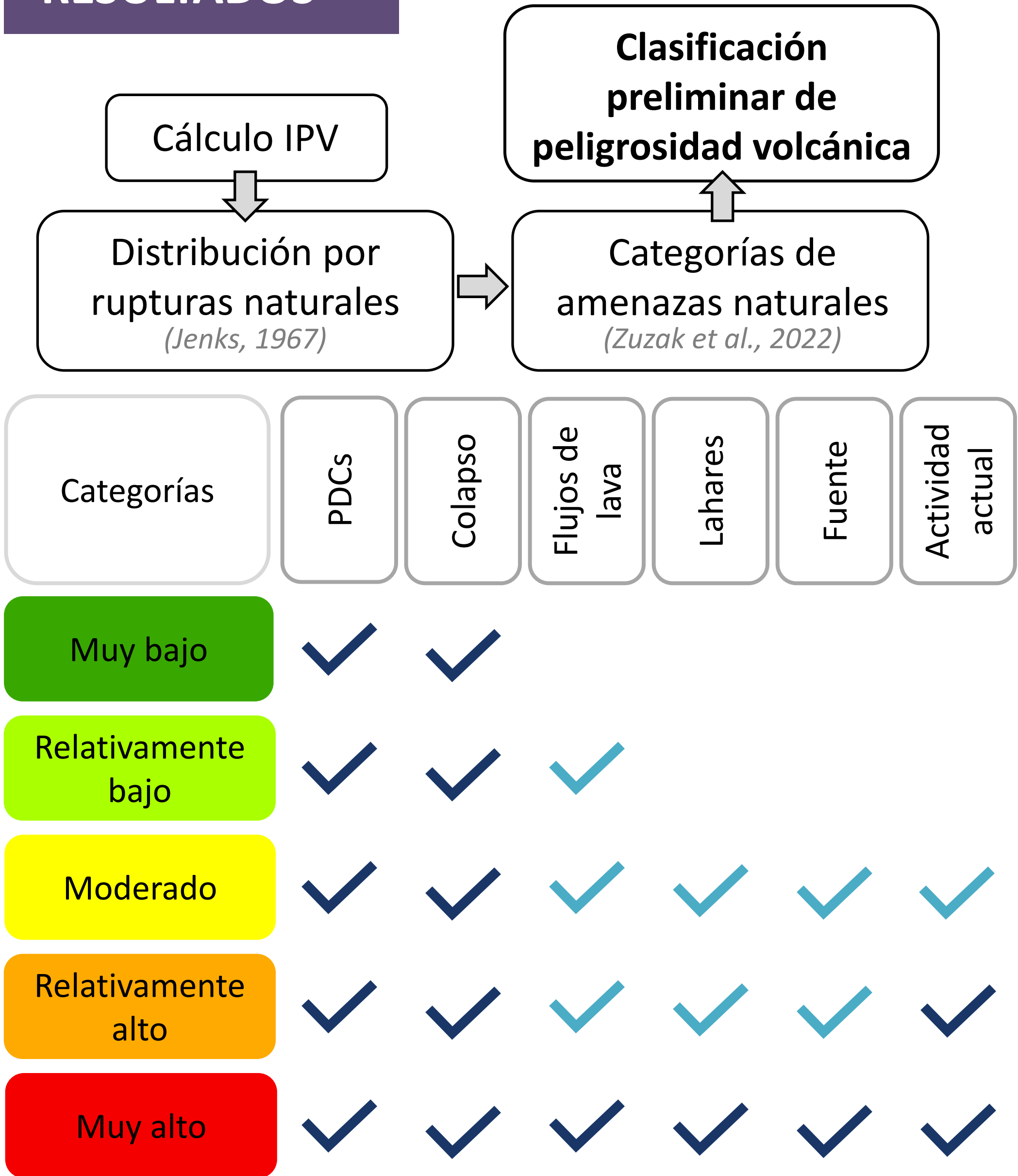
PROPUESTA

La información disponible y el conocimiento actual de la población sobre actividad volcánica es escaso. Considerando que, los estudios básicos de vulcanología son el fundamento de la mitigación del riesgo volcánico se propuso un **análisis de la amenaza volcánica**, mediante: (1) comparación de metodologías, (2) caracterización de los volcanes, y (3) planificación de futuras actividades. Se calculó un **Índice de Peligrosidad Volcánica (IPV)** preliminar que permitió categorizar los volcanes.

Parámetros	Calificación máxima
Tipo de volcán	1
VEI máximo	4
Intervalo de recurrencia	4
Eventos volcánicos	5
Potencial para colapso	1
Desencadenante de lahares	1
Actividad sísmica	1
Deformación del suelo	1
Actividad fumarólica	1
Puntaje máximo total	19

Parámetros de amenaza volcánica. (Nieto-Torres et al., 2021)

RESULTADOS



CONCLUSIONES



Volcán Cotopaxi

- Los volcanes se clasificaron en **cinco categorías**. En la categoría muy alto se encuentran los volcanes **Cotopaxi, Tungurahua, Reventador y Guagua Pichincha**.
- Los volcanes **no se concentran geográficamente** según IPV. Las categorías tienen distintas tipologías de volcanes y ambientes de formación.
- Se propuso actividades como **estudios de tefro-estratigrafía**.
- La información generada sirve para la **toma de decisiones y asignación de recursos** en la gestión de riesgo volcánico.