

LINE  
BIERTA

# Gestión de riesgos en Quito

## Balance y perspectivas de treinta años de estudios

Coordinadores:

Andrea Carrión

Julien Rebotier

Pascale Metzger

Fernando Puente-Sotomayor

© 2024 FLACSO Ecuador  
Edición para PDF  
Agosto de 2024

Cuidado de la edición: Editorial FLACSO Ecuador

ISBN: 978-9978-67-690-5 (pdf)  
<https://doi.org/10.46546/2024-58lineabierta>

FLACSO Ecuador  
La Pradera E7-174 y Diego de Almagro, Quito-Ecuador  
Telf.: (593-2) 294 6800  
[www.flacso.edu.ec](http://www.flacso.edu.ec)

Instituto francés de Investigación para el Desarrollo (IRD)  
44. bd Dunkerque CS 90009  
13572 Marsella-Francia  
Telf.: (33) 4 91 99 92 00  
[www.ird.fr](http://www.ird.fr)

---

Gestión de riesgos en Quito. Balance y perspectivas de treinta años de estudios / coordinado por Andrea Carrión, Julien Rebotier, Pascale Metzger y Fernando Puente-Sotomayor.- Quito, Ecuador ; Marsella, Francia : FLACSO Ecuador : Instituto francés de Investigación para el Desarrollo (IRD), 2024

viii, 225 páginas : ilustraciones, figuras, mapas, tablas.- (Serie LINEABIERTA)

Incluye bibliografía

ISBN: 9789978676905 (pdf)  
<https://doi.org/10.46546/2024-58lineabierta>

PROBLEMAS AMBIENTALES ; GESTIÓN DE RIESGO ; GESTIÓN URBANA ; VULNERABILIDAD ; GEOLOGÍA ; PLANIFICACIÓN URBANA ; ZONA URBANA ; DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO ; ECUADOR  
I. CARRIÓN, ANDREA, COORDINADORA II. REBOTIER, JULIEN, COORDINADOR III. METZGER, PASCALE, COORDINADORA IV. PUENTE-SOTOMAYOR, FERNANDO, COORDINADOR

363.7 - CDD

---

Editorial  
 FLACSO  
Ecuador

 Institut de Recherche  
pour le Développement  
FRANCE  
Instituto francés de Investigación para el Desarrollo

Este libro ha sido publicado gracias al apoyo del  
Instituto francés de Investigación para el Desarrollo (IRD).

# Índice de contenidos

Lista de abreviaturas, siglas y acrónimos..... VII

## Introducción

Horizontes en la investigación y gestión de riesgos en Quito ..... 1  
Andrea Carrión y Julien Rebotier

## PARTE I

Capítulo 1. La vulnerabilidad en el Distrito Metropolitano de Quito:  
una retrospectiva de veinte años ..... 20  
*Jairo Estacio y Pascale Metzger*

Capítulo 2. Los estudios de peligros geológicos en Quito  
desde la década de los ochenta ..... 41  
*S. Daniel Andrade, Eliana Jiménez Álvaro, Pablo Samaniego, Daniel Pacheco  
y Alexandra Alvarado*

Capítulo 3. Las amenazas hidrometeorológicas en Quito ..... 70  
*Othon Zevallos Moreno*

## PARTE II

Capítulo 4. La planificación del desarrollo local y territorial  
del Distrito Metropolitano de Quito desde la perspectiva  
de la gestión de riesgos ..... 93  
*Diana Andrea Salazar Valenzuela, Carlos Santiago Robles Romero  
y Esthela Elizabeth Salazar Proaño*

Capítulo 5. La gestión de información para la gestión de riesgos:  
la experiencia de Quito (1993-2023) ..... 113  
*Fernando Puente-Sotomayor, Marcelo Yáñez, Diego Jurado y Jorge Ordóñez*

Capítulo 6. La perspectiva cultural en el estudio de los riesgos en Quito.  
Reflexiones desde la historia y la antropología ..... 132  
*Elisa Sevilla y Alfredo Santillán*

### PARTE III

Capítulo 7. Comuna Santa Clara de San Millán: gestión territorial y resiliencia comunitaria .....	154
<i>Fernando Barragán Ochoa, Víctor Jácome Calvache y Gualdemar Jiménez</i>	
Capítulo 8. Solanda: subsidencia del suelo en la zona de influencia del Metro de Quito .....	169
<i>Ramses Morante I., Luis Pilatasig M. y Fernando Puente-Sotomayor</i>	
Capítulo 9. Valle de Los Chillos: estudios de peligro por lahares primarios ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi .....	183
<i>S. Daniel Andrade y Francisco J. Vasconez</i>	
Capítulo 10. Infraestructura Verde-Azul: un sistema anticipatorio de resiliencia y sostenibilidad en el Distrito Metropolitano de Quito .....	193
<i>Marco Córdova, Jonathan Menoscal y Pablo Zapata</i>	
Conclusiones .....	204
Epílogo	
La investigación francesa en cooperación sobre vulnerabilidad: cómo Quito marcó una diferencia (1980-2010) .....	214
Sobre las coordinadoras y los coordinadores .....	216
Sobre las autoras y los autores .....	218

# Ilustraciones

## Figuras

Figura I. 1. Distribución temporal de publicaciones. ....	5
Figura I. 2. Distribución temporal de publicaciones sin tesis de pregrado. ....	6
Figura I. 3. Red de coautores de artículos científicos (1988-2023) ....	11
Figura 1.1. Proceso de abordaje de vulnerabilidad y riesgo ....	35
Figura 3.1. Eventos de desastre de origen hidrometeorológico en el DMQ (1970-2019) ....	73
Figura 3.2. Tipología de desastres de origen hidrometeorológico en el DMQ (1970-2019) ....	73
Figura 3.3. Distribución mensual de eventos de origen hidrometeorológico en el DMQ (1970-2019) ....	74
Figura 3.4. Distribución mensual de precipitación multianual (mm) en Estación Quito-INAMHI. ....	74
Figura 3.5. Ubicación y ejemplos de obras construidas en el programa Laderas del Pichincha. ....	76
Figura 3.6. Áreas de intervención de programas Laderas del Pichincha, PSA I y PSA II ....	77
Figura 3.7. Fotografías del aluvión de La Gasca ....	86
Figura 3.8. Fotografías en el sitio de la toma de captación del colector y embalse ....	87
Figura 4.1. Estudios relevantes para la planificación territorial en el DMQ. ....	95
Figura 5.1. Estructura relacional de la base de datos del SUIM. ....	117
Figura 5.2. Ejemplo de digitalización de hojas catastrales. Base de lotes usada en el PUOS 2008 ....	118
Figura 5.3. Sistema metodológico conceptual para el desarrollo de la información de la gestión de riesgos en el DMQ ....	122
Figura 6.1. <i>Procesión durante la sequía de 1621</i> , de Miguel de Santiago ....	136
Figura 6.2. <i>Nuestra Señora de las Mercedes, patrona de Quito</i> ....	138
Figura 6.3. <i>Vista del interior del cráter del Pichincha</i> ....	141
Figura 8.1. Crecimiento vertical de una manzana de Solanda ....	171
Figura 8.2. Daños en viviendas de Solanda. ....	172

Figura 8.3. Vista aérea del pozo y salida de emergencia del Metro en el parque del Sector 4 de Solanda . . . . .	174
Figura 8.4. Sucesión litológica de la subcuenca Sur . . . . .	178

## Mapas

Mapa 2.1. Marco geodinámico simplificado del Ecuador. . . . .	42
Mapa 2.2. Zona de Quito: relieve, fallas y volcanes . . . . .	43
Mapa 2.3. Peligro sísmico del Ecuador. . . . .	46
Mapa 2.4. Movimientos en masa ocurridos en el DMQ . . . . .	54
Mapa 8.1. Imagen parcial de Quito y drenaje en Solanda. . . . .	175
Mapa 8.2. Imagen parcial de mapa neotectónico de la región de Quito . . . . .	176
Mapa 9.1. Extractos de mapas de peligros del volcán Cotopaxi . . . . .	185
Mapa 9.2. Zonaciones de la profundidad de un lahar primario en el Valle de Los Chillos . . . . .	187
Mapa 10.1. Delimitación de la cuenca del río Monjas. . . . .	196

## Tablas

Tabla I.1. Distribución de clases según bloques de texto . . . . .	7
Tabla I.2. Distribución de clases según período de publicación. . . . .	8
Tabla I.3. Distribución de clases según filiación institucional . . . . .	9
Tabla I.4. Distribución de clases según tipo de publicación . . . . .	9
Tabla I.5. Criterios para un listado representativo de referencias sobre riesgos y territorio en Quito . . . . .	13
Tabla I.6. Listado ilustrativo de la diversidad de producciones . . . . .	14
Tabla 1.1. Estudios de vulnerabilidad. . . . .	25
Tabla 1.2. Documentos, insumos y plataformas de información. . . . .	32
Tabla 2.1. Resumen de los mapas de peligros volcánicos de interés para Quito . . . . .	49
Tabla 2.2. Metodologías, datos y políticas para la investigación de movimientos en masa en zonas urbanas . . . . .	55
Tabla 4.1. Enfoque de la planificación territorial del DMQ (1942-2021) . . . . .	98
Tabla 4.2. Comparación de los instrumentos de planificación del desarrollo y ordenamiento territorial (2004-2021). . . . .	102
Tabla 4.3. Familias incluidas en el programa de relocalización (2010-2021) . . . . .	107

## Lista de abreviaturas, siglas y acrónimos

BDU	Base de datos urbanos
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CC	Cambio climático
CCPP	Sistema Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná
COE	Centro de Operaciones de Emergencia
COE-M	Centro de Operaciones de Emergencia Metropolitano
DMGR	Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos
DMQ	Distrito Metropolitano de Quito
EMAAP-Q	Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito
EMASEO	Empresa Metropolitana de Aseo
EPMAAP	Empresa Pública Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable
EPMAPS	Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento
EPMMOP	Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas
EPN	Escuela Politécnica Nacional
ESPE	Universidad de las Fuerzas Armadas
FLACSO	Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, sede Ecuador
FONAG	Fondo Ambiental para Protección de Agua de Quito
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
GI	Gestión de la Información
GIRD	Gestión Integral de Riesgo de Desastres
GRD	Gestión de riesgos de desastres
HM	Hidrometeorológico/a
IAEN	Instituto de Altos Estudios Nacionales
IFEA	Instituto Francés de Estudios Andinos
IGM	Instituto Geográfico Militar
IG-EPN	Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional
IIGE	Instituto de Investigación Geológico y Energético
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
IPGH	Instituto Panamericano de Geografía e Historia
IRD	Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)
IRM	Informe de Regulación Metropolitana
JICA	Agencia de Cooperación Internacional del Japón

MDMQ	Municipio del Distrito Metropolitano de Quito
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	Organización no gubernamental
ORSTOM	Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación
OT	Ordenamiento territorial
PACIVUR	Programa Andino de Capacitación e Investigación sobre Vulnerabilidad y Riesgos Urbanos
PDOT	Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial
PGDT	Plan General de Desarrollo Territorial
PMDOT	Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PSA	Programa de Saneamiento Ambiental
PUCE	Pontificia Universidad Católica del Ecuador
PUGS	Plan de Uso y Gestión de Suelo
PUOS	Plan de Uso y Ocupación del Suelo
Q.	Quebrada
RRAAE	Red de Repositorios de Acceso Abierto del Ecuador
SAT	Sistemas de Alerta Temprana
SIG	Sistema de Información Geográfica
SMGR	Sistema Metropolitano de Gestión de Riesgos
SMI	Sistema Metropolitano de Información
SPI	Índice de precipitación estandarizada
SSG	Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad
SUIM	Sistema Urbano de Información Metropolitana
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
UASB	Universidad Andina Simón Bolívar
UCE	Universidad Central del Ecuador
UDLA	Universidad de las Américas
UIDE	Universidad Internacional del Ecuador
UISEK	Universidad Internacional SEK
USFQ	Universidad San Francisco de Quito
UNDRR	Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres
UPS	Universidad Politécnica Salesiana
USAID	U.S. Agency for International Development
UTE	Universidad Técnica Equinoccial
ZR	Zonas de riesgo

## 9 | Valle de Los Chillos: estudios de peligro por lahares primarios ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi

S. Daniel Andrade y Francisco J. Vasconez

El Cotopaxi es un volcán activo del Ecuador que se caracteriza por tener una capa glaciaria con un volumen de aproximadamente 500-600 millones de metros cúbicos, la cual se encuentra sujeta a un acelerado proceso de retroceso (Cáceres et al. 2016). El volcán se ubica a unos 50 km al sureste de Quito, 35 km al norte de Latacunga y su cumbre alcanza los 5897 metros sobre el nivel del mar, con un relieve que varía entre 2000 y 3000 metros desde su base. Estudios geológicos recientes muestran que el Cotopaxi inició su desarrollo hace aproximadamente 560 000 años, si bien la mayor parte del edificio volcánico actual se ha formado durante los últimos 13 000 años (Hall y Mothes 2007). Este volcán se caracteriza por producir erupciones de magnitudes pequeñas, como las ocurridas en 2015 y 2022 (Bernard et al. 2016; Troncoso et al. 2017; Hidalgo et al. 2018), así como erupciones moderadas y grandes, como las ocurridas, por ejemplo, en los siglos XVIII y XIX (Wolf 1878; Barberi et al. 1995; Mothes et al. 2004; Pistolesi et al. 2011).

Dos fenómenos asociados a las erupciones del Cotopaxi pueden producir impactos significativos en Quito: 1) las caídas de ceniza y 2) los lahares primarios (Andrade et al. 2005; Mothes et al. 2016a). Las caídas de ceniza se originan cuando las explosiones volcánicas producen nubes de ceniza que pueden transportarse bajo el efecto del viento y luego cubrir zonas muy amplias (centenas de kilómetros cuadrados). Su impacto muy raramente es letal, pero pueden producir interrupciones severas en las redes de servicios básicos (p. ej. agua, transporte y energía), la contaminación de fuentes y piscinas de tratamiento de agua, impactos en la agricultura y la ganadería, además de problemas de salud (en particular afectaciones respiratorias).

Por otro lado, los lahares primarios son flujos de lodo y escombros que se forman cuando grandes erupciones explosivas del Cotopaxi producen flujos piroclásticos que fluyen sobre el glaciar del volcán y lo derriten súbitamente. Este proceso libera en pocos minutos enormes cantidades de agua que se mezclan y arrastran el material rocoso del volcán (Mothes et al. 2004; Pistolesi et al. 2013). Estos flujos tienen la consistencia del concreto antes de fraguar, se mueven a altas velocidades (> 20 km/h) por los drenajes y, dependiendo de su volumen inicial, pueden alcanzar zonas muy distantes de

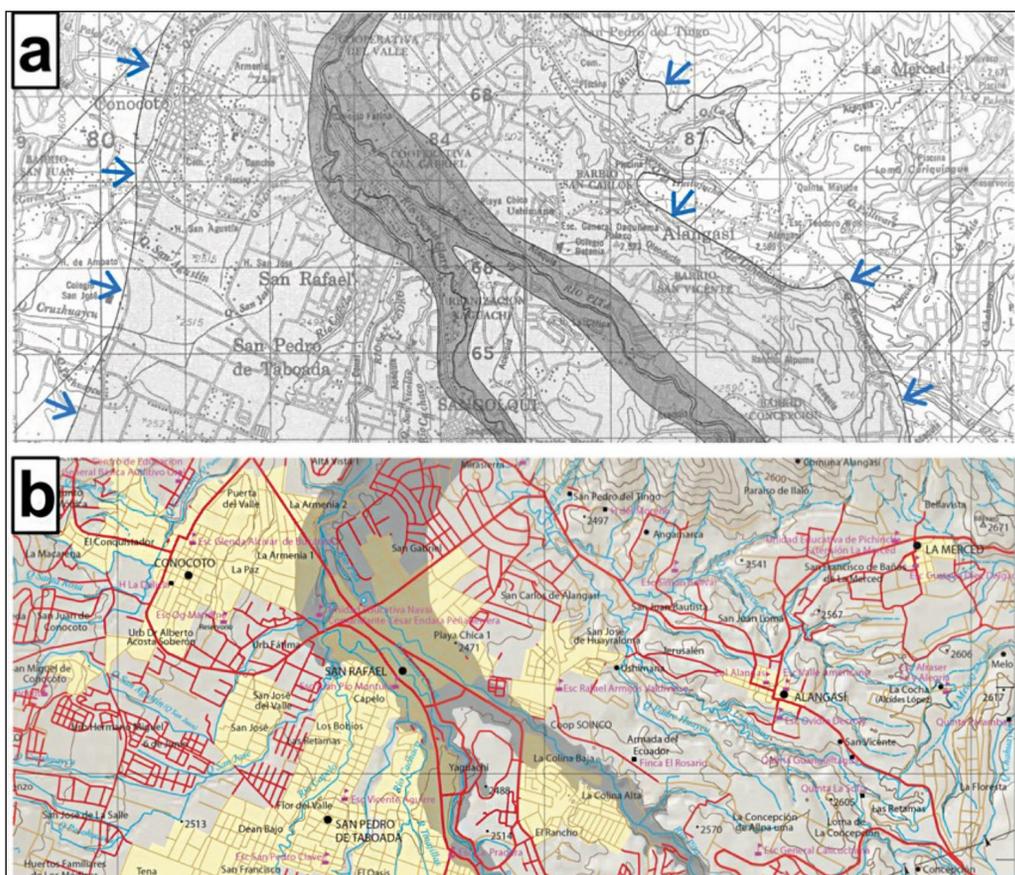
su fuente (Vallance e Iverson 2015). Estas propiedades físicas convierten a los lahares en fenómenos letales, capaces de destruir o inhabilitar cualquier infraestructura o bien que se encuentre en su paso.

Amplias zonas del Valle de Los Chillos se han desarrollado en las últimas décadas precisamente en las cercanías de los drenajes de los ríos Pita y Santa Clara, por donde han transitado los lahares primarios del Cotopaxi en las erupciones ocurridas en los años 1744, 1768 y 1877 (Aguilera et al. 2004; Mothes et al. 2004; Andrade et al. 2005; Pistolesi et al. 2013; Mothes et al. 2016a). Las zonas urbanas correspondientes al Valle de Los Chillos se encuentran bajo la administración de los municipios de Quito y Rumiñahui.

## Evaluación del peligro por lahares primarios

Los lahares primarios del Cotopaxi tienen dos características que dificultan la evaluación probabilística de su peligro. En primer lugar, son fenómenos poco frecuentes en el tiempo. Mediante estudios geológicos detallados, Pistolesi et al. (2013) han podido identificar un total de diez depósitos de lahares primarios del Cotopaxi ocurridos en el último milenio. Es decir que las probabilidades de los lahares primarios se pueden asociar solamente a escenarios a largo plazo (décadas a siglos) y no a algún proceso físico aleatorio, como, por ejemplo, la dirección y velocidad del viento en el caso de la caída de ceniza. En segundo lugar, la evidencia geológica de los lahares primarios es relativamente escasa en la superficie, debido a que cada depósito se encuentra al menos parcialmente cubierto por uno más joven, por lo que es muy difícil determinar la extensión lateral, el volumen y otras características físicas de cada evento. Solamente el último lahar primario del Cotopaxi, ocurrido el 26 de junio de 1877, ha podido ser estudiado con detalle debido a que sus depósitos son suficientemente observables en la superficie (Wolf 1878; Mothes et al. 2004; Ettinger et al. 2007; Pistolesi et al. 2013; Sierra Vaca et al. 2019; Andrade et al. 2022). Esto restringe la cantidad de información disponible para definir los escenarios de ocurrencia de estos eventos y, por lo tanto, para implementar los modelos numéricos que permitirán la zonificación del peligro.

El primer mapa de peligros del Cotopaxi, publicado en 1988, constaba de dos secciones: una de la “Zona Norte”, correspondiente al drenaje del río Pita, que concierne a Quito y al Valle de Los Chillos (Hall y Von Hillebrandt 1988a) y otra de la “Zona Sur”, correspondiente al drenaje del río Cutuchi, que concierne a Latacunga y Salcedo (Hall y von Hillebrandt 1988b). Un mapa previo fue elaborado en 1978, en colaboración con el Servicio Geológico de los Estados Unidos, aunque nunca fue publicado (Miller, Mullineaux y Hall 1978). En los mapas de 1988, las zonas de peligro por lahares primarios fueron delineadas



Fuente: Hall y Von Hillebrandt (1988a); Mothes et al. (2016a).

Nota: (a) Extracto del mapa de peligros del volcán Cotopaxi publicado en 1988, correspondiente a la zona del Valle de Los Chillos (Hall y Von Hillebrandt 1988a); la zona de peligro por lahares correspondiente al escenario de 1877 (más probable) está marcada en color gris oscuro, mientras que la zona correspondiente al escenario de 4500 años (menos probable) está en color gris claro y sus bordes están marcados con flechas azules. (b) Extracto del mapa de peligros del volcán Cotopaxi de la misma zona, publicado en 2016 (Mothes et al. 2016a). Hay una sola zona de peligro por lahares que tiene color gris oscuro y corresponde al escenario de 1877. Se puede apreciar las similitudes y diferencias entre ambos mapas, en especial la gran extensión del escenario de 4500 años.

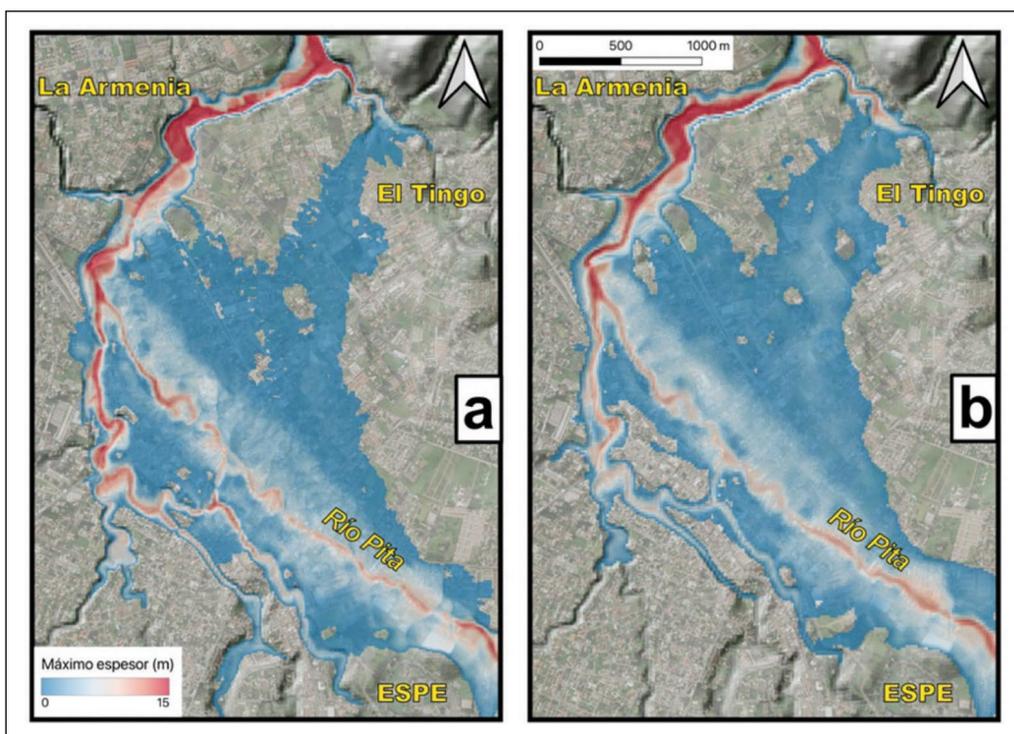
a partir de dos escenarios diferentes: el primero relacionado con el evento de 1877, considerado más probable, y el segundo, con un evento bastante más grande, ocurrido hace 4500 años, pero considerado mucho menos probable (Mothes, Hall y Janda 1998) (mapa 9.1a). En aquella época no existían medios teóricos ni tecnológicos para realizar un modelaje numérico de los flujos, por lo que la zonificación de las zonas de peligro se basó exclusivamente en la información geológica disponible para cada escenario.

Entre 2000 y 2001, el Cotopaxi tuvo un período de agitación de su actividad interna, pero sin llegar a una erupción (Molina et al. 2008). Esta coyuntura fue motivo para que se actualizaran y publicaran nuevas versiones de los mapas de peligros de las zonas norte y sur del Cotopaxi (Hall et al. 2004a, 2004b). En estos mapas, las zonas de peligro por lahares primarios se representaron mediante un solo escenario, correspondiente al evento de 1877. Para esta época ya se habían empezado a probar modelos

numéricos para simular lahares primarios en el Cotopaxi, por ejemplo, basados en enfoques hidrológicos de una dimensión (Barberi et al. 1992; Aguilera et al. 2004) o en enfoques estadísticos empíricos, como el modelo Lahar-Z (Iverson, Schilling y Vallance 1998; Schilling 1998). Sin embargo, debido a la resolución, alcance y disponibilidad de estos modelos numéricos, la delimitación de las zonas de peligro estuvo basada principalmente en la información geológica correspondiente al evento de 1877. En los mapas, dichas zonificaciones contienen solamente información probabilística cualitativa, relacionada con el escenario modelado, pero no sobre las características físicas del flujo.

Desde inicios de 2015, el Cotopaxi entró nuevamente en una etapa de agitación de su actividad interna, lo cual desembocó en un período eruptivo que duró entre agosto de 2015 y enero de 2016 (Bernard et al. 2016; Troncoso et al. 2017; Hidalgo et al. 2018). En los años previos se habían desarrollado nuevas pruebas con modelos numéricos para lahares primarios, entre los que destacan las nuevas versiones de Lahar-Z (Ordóñez et al. 2013; Pistolesi et al. 2014), así como otros modelos hidrológicos en dos dimensiones (HEC-RAS, IBER, FLOW2D), que se plasmarían en publicaciones posteriores (Méndez Padilla 2017; Toapaxi et al. 2019; Vera et al. 2019). Todos estos resultados fueron parcialmente aplicados en las ediciones de los mapas de peligros de las zonas norte y sur del Cotopaxi, publicados en 2016 (Mothes et al. 2016a, 2016b). El detalle y la escala de las zonificaciones fueron mejorados significativamente con respecto a los mapas de 1988 y 2004, mediante el uso de una base topográfica digital actualizada con resolución de diez metros (mapa 9.1b). El escenario presentado sigue siendo el de 1877 y, a pesar de los avances en el modelaje numérico, las zonificaciones aún no contienen información sobre las características físicas del flujo.

En los últimos años, los marcos teóricos y las capacidades tecnológicas para modelar los lahares primarios han registrado grandes avances. Por el lado teórico, se han obtenido nuevas formulaciones matemáticas, por ejemplo basadas en autómatas celulares interactivos (Lupiano et al. 2021) o en los principios de la mecánica de fluidos (Frimberger et al. 2021; Vásconez et al. 2024), que permiten descripciones físicas cuantitativas de los flujos más ajustadas a la realidad. Por el lado tecnológico, la disponibilidad de computadores de gran capacidad ha hecho posible estas simulaciones que requieren cálculos intensivos. Una muestra de esto es el modelaje realizado por Frimberger et al. (2021) mediante el programa RAMMS, con el cual produjeron simulaciones en cuatro dimensiones (3D+t) para varios escenarios en los drenajes norte y sur del Cotopaxi. Las zonificaciones obtenidas contienen información sobre las características físicas de los flujos, por ejemplo, su velocidad, profundidad, caudal, presión dinámica, etc (mapa 9.2a). Un enfoque similar, pero con el modelo



Fuente: Frimberger et al. (2021); Vásconez et al. (2024).

Nota: se considera el escenario de 1877, según las simulaciones numéricas realizadas por: (a) Frimberger et al. (2021) y (b) Vásconez et al. (2024). Se puede apreciar las similitudes y diferencias entre ambas investigaciones. Las zonaciones tienen resoluciones espaciales de 10 y 15 metros, respectivamente.

numérico KESTREL<sup>1</sup> está siendo desarrollado por Vásconez et al. (2024) con resultados muy alentadores (mapa 9.2b). Sin embargo, la publicación de mapas de peligros por lahares primarios del Cotopaxi que estén basados en los resultados de estas simulaciones aún está pendiente.

### El impacto limitado de los mapas de peligro volcánico en la planificación territorial

A pesar de los avances que ha experimentado la evaluación del peligro por lahares primarios en las últimas cuatro décadas de investigaciones, los mapas aún son poco utilizados para su propósito primario, que es la planificación territorial a largo plazo (Robert et al. 2009). El mayor impacto de los mapas ha ocurrido durante las épocas de crisis volcánica, cuando autoridades y ciudadanía buscan información para preparar una eventual respuesta a la emergencia (p. ej. para planificar evacuaciones). Esto ha tenido como

<sup>1</sup> <https://kestrel-unibristol.readthedocs.io/en/latest/index.html>

efecto una percepción del riesgo muy significativa entre los habitantes del Valle de Los Chillos (Salazar y D'Ercole 2009; López Revelo 2018).

El hecho de que las zonificaciones no sean representadas de forma probabilística en los mapas ha provocado una interpretación errónea de su significado, ya que a menudo son consideradas representaciones de certezas o garantías sobre el futuro. Igualmente, el hecho de que las zonificaciones no contengan información sobre las propiedades físicas de los flujos ha limitado su uso para la estimación de potenciales pérdidas (cálculos de riesgo), las cuales han tenido que basarse en funciones de fragilidad binarias (p. ej. "sin daño" o "daño total"). Esto último produce estimaciones de pérdidas que contienen grandes incertidumbres (Rodríguez et al. 2017), si además se considera que las evaluaciones de las vulnerabilidades físicas o socioeconómicas, en general, son limitadas (D'Ercole 1996).

En cualquier caso, se espera que las limitaciones que tienen los mapas de peligros se reduzcan con las nuevas generaciones de modelos numéricos. El Valle de Los Chillos todavía es una zona en pleno desarrollo urbano y demográfico, y se estima que siga creciendo en las próximas décadas. Por estas razones, los municipios involucrados deberían considerar la producción de mapas y conocimientos sobre los procesos volcánicos como una oportunidad para el futuro, que permita una planificación de su territorio en la que se tome en cuenta el peligro que representan los lahares primarios del Cotopaxi.

## Referencias

- Aguilera, E., M. T. Pareschi, M. Rosi y G. Zanchetta. 2004. "Risk from Lahars in the Northern Valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador)". *Natural Hazards* 33 (2): 161-89. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000037037.03155.23>
- Andrade, D., M. L. Hall, P. Mothes, L. Troncoso, J. P. Eissen, Pablo Samaniego, J. Egred, et al. 2005. *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*. Vol. 3 de *Los peligros volcánicos en Ecuador*. Primera edición. Corporación Editora Nacional.
- Andrade, S. D., Emilia Saltos, Valeria Nogales, Sebastián Cruz, Gareth Lee y Jenni Barclay. 2022. "Detailed Cartography of Cotopaxi's 1877 Primary Lahar Deposits Obtained by Drone-Imagery and Field Surveys in the Proximal Northern Drainage". *Remote Sensing* 14 (3). <https://doi.org/10.3390/rs14030631>
- Barberi, F., M. Coltelli, A. Frullani, M. Rosi y E. Almeida. 1995. "Chronology and Dispersal Characteristics of Recently (Last 5000 Years) Erupted Tephra of Cotopaxi (Ecuador): Implications for Long-Term Eruptive Forecasting". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 69 (3-4): 217-39. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00017-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00017-8)

- Barberi, F., P. Carusso, G. Macedonio, M. T. Pareschi y M. Rosi. 1992. "Reconstruction and Numerical Simulation of the Lahar of the 1877 Eruption of Cotopaxi Volcano (Ecuador)". *Acta Vulcanológica* 2: 35-44.
- Bernard, Benjamin, Jean Battaglia, Antonio Proaño, Silvana Hidalgo, Francisco Vásquez, Stephen Hernandez y Mario Ruiz. 2016. "Relationship between volcanic ash fallouts and seismic tremor: quantitative assessment of the 2015 eruptive period at Cotopaxi volcano, Ecuador". *Bulletin of Volcanology* 78 (11): 80. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1077-5>
- Cáceres, Bolívar, Joice Gómez, Patricio Ramón, Patricia Mothes, Luis Maisincho, Benjamin Bernard, Edwin Telenchana y Marco Almeida. 2016. "Dramatical reduction over two Ecuadorian Glaciers related with volcanic activity 1999-2016". En *Abstract volume of the 9th Cities on Volcanoes Conference*. Chile: Puerto Varas.
- D'Ercole, Robert. 1996. "Représentations cartographiques des facteurs de vulnérabilité des populations exposées à une menace volcanique. Application à la région du volcan Cotopaxi (Equateur)". *Bulletin de l'Institut français d'études andines* 25 (3): 479-507.  
[https://www.persee.fr/doc/bifea\\_0303-7495\\_1996\\_num\\_25\\_3\\_1245](https://www.persee.fr/doc/bifea_0303-7495_1996_num_25_3_1245)
- Ettinger, Susanne, Patricia Mothes, Raphaël Paris y Steve Schilling. 2007. "The 1877 Lahar Deposits on the Eastern Flank of Cotopaxi Volcano". *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement* 13 (3): 271-80.  
<https://doi.org/10.4000/geomorphologie.4022>
- Frimberger, Theresa, S. Daniel Andrade, Samuel Weber y Michael Krautblatter. 2021. "Modelling Future Lahars Controlled by Different Volcanic Eruption Scenarios at Cotopaxi (Ecuador) Calibrated with the Massively Destructive 1877 Lahar". *Earth Surface Processes and Landforms* 46 (3): 680-700.  
<https://doi.org/10.1002/esp.5056>
- Hall, Minard L., y Christa von Hillebrandt. 1988a. "Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Cotopaxi, zona norte". *Volcanic Hazard Map*. Quito: IG-EPN.
- 1988b. "Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Cotopaxi, zona sur". *Volcanic Hazard Map*. Quito: IG-EPN.
- Hall, M., y P. Mothes. 2007. "The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador". *Bulletin of Volcanology*.
- Hall, Minard L., Patricia A. Mothes, Pablo Samaniego, Hugo A Yepes, y S. Daniel Andrade. 2004a. "Mapa regional de los peligros volcánicos potenciales del volcán Cotopaxi – Zona Sur". Quito: IG-EPN.
- 2004b. "Mapa regional de los peligros volcánicos potenciales del volcán Cotopaxi – Zona Norte". *Volcanic Hazard Map*. Quito: IG-EPN.

- Hidalgo, Silvana, Jean Battaglia, Santiago Arellano, Daniel Sierra, Benjamin Bernard, René Parra, Peter Kelly, Florian Dinger, Charlotte Barrington y Pablo Samaniego. 2018. "Evolution of the 2015 Cotopaxi Eruption Revealed by Combined Geochemical and Seismic Observations". *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19 (7): 2087-108.  
<https://doi.org/10.1029/2018GC007514>
- Iverson, Richard M., Steven P. Schilling y James W. Vallance. 1998. "Objective delineation of lahar-inundation hazard zones". *GSA Bulletin* 110 (8): 972-84.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1998\)110<0972:ODOLIH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0972:ODOLIH>2.3.CO;2)
- López Revelo, Sandy Ximena. 2018. "Percepción del riesgo sobre la amenaza de lahares del volcán Cotopaxi del cantón Rumiñahui, Pichincha-Ecuador". PUCE.
- Lupiano, Valeria, Paolo Catelan, Claudia R. Calidonna, Francesco Chidichimo, Gino M. Crisci, Valeria Rago, Salvatore Straface y Salvatore Di Gregorio. 2021. "LLUNPIY Simulations of the 1877 Northward Catastrophic Lahars of Cotopaxi Volcano (Ecuador) for a Contribution to Forecasting the Hazards". *Geosciences* 11 (2): 81.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences11020081>
- Méndez Padilla, Javier Alexander. 2017. "Simulación numérica bidimensional con el programa Iber del flujo de lahares primarios del río Santa Clara en la población de Sangolquí correspondiente al drenaje norte del volcán Cotopaxi". Tesis de licenciatura.  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17248>
- Miller, C., D. Mullineaux y Minard Hall. 1978. "Reconnaissance Map of Potential Volcanic Hazards from Cotopaxi Volcano, Ecuador". *USGS Misc. Invest. Series Map I-1702*.
- Molina, Indira, Hiroyuki Kumagai, Alexander García-Aristizábal, Masaru Nakano y Patricia Mothes. 2008. "Source Process of Very-Long-Period Events Accompanying Long-Period Signals at Cotopaxi Volcano, Ecuador". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176 (1): 119-33.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.07.019>
- Mothes, Patricia A., Minard L. Hall y Richard J. Janda. 1998. "The Enormous Chillos Valley Lahar: An Ash-Flow-Generated Debris Flow from Cotopaxi Volcano, Ecuador". *Bulletin of Volcanology* 59 (4): 233-44.  
<https://doi.org/10.1007/s004450050188>
- Mothes, Patricia A., Minard L. Hall, Daniel Andrade, Hugo Yepes, Thomas C. Pierson, A. Gorki Ruiz y Pablo Samaniego. 2004. "Character, stratigraphy and magnitude of historical lahars of Cotopaxi volcano (Ecuador)". *Acta vulcanológica* 16 (1/2): 1000-23.
- Mothes, Patricia A., Pedro A. Espín, Minard L. Hall, Francisco Vasconez, Daniel Sierra y S. Daniel Andrade. 2016a. "Mapa regional de amenazas volcánicas potenciales del volcán Cotopaxi - Zona Norte". *Volcanic Hazard Map*. Quito: IG-EPN. <https://www.igepn.edu.ec/cotopaxi-mapa-de-peligros>

- Mothes, Patricia A., Pedro A. Espín, Minard L. Hall, Francisco Vasconez, Daniel Sierra y S. Daniel Andrade. 2016b. "Mapa regional de amenazas volcánicas potenciales del volcán Cotopaxi - Zona Sur". *Volcanic Hazard Map*. Quito: IG-EPN. <https://www.igepn.edu.ec/cotopaxi-mapa-de-peligros>
- Ordóñez, Jorge, Pablo Samaniego, Patricia Mothes y Steve Schilling. 2013. "Las potenciales zonas de inundación por lahares en el volcán Cotopaxi". Public report 1. IG-EPN. <https://bit.ly/3yUlsRe>
- Pistolesi, Marco, Mauro Rosi, Raffaello Cioni, Katharine V. Cashman, Andrea Rossotti y Eduardo Aguilera. 2011. "Physical volcanology of the post-twelfth-century activity at Cotopaxi volcano, Ecuador: Behavior of an andesitic central volcano". *GSA Bulletin* 123 (5-6): 1193-215. <https://doi.org/10.1130/B30301.1>
- Pistolesi, Marco, Raffaello Cioni, Mauro Rosi y Eduardo Aguilera. 2014. "Lahar Hazard Assessment in the Southern Drainage System of Cotopaxi Volcano, Ecuador: Results from Multiscale Lahar Simulations". *Geomorphology* 207 (febrero): 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.026>
- Pistolesi, Marco, Raffaello Cioni, Mauro Rosi, Katharine V. Cashman, Andrea Rossotti y Eduardo Aguilera. 2013. "Evidence for Lahar-Trigging Mechanisms in Complex Stratigraphic Sequences: The Post-Twelfth Century Eruptive Activity of Cotopaxi Volcano, Ecuador". *Bulletin of Volcanology* 75 (3): 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0698-1>
- Robert, Jérémy, Robert D'Ercole, Patrick Pigeon y Tania Serrano. 2009. "Complejidad, incertidumbre y vulnerabilidad: el riesgo asociado al volcán Cotopaxi en el Valle de los Chillos (Quito-Ecuador)". *Bulletin de l'Institut français d'études andines* 38 (3): 709-33. <https://journals.openedition.org/bifea/2408>
- Rodriguez, Fabian, Theofilos Toulkeridis, Washington Sandoval, Oswaldo Padilla y Fernando Mato. 2017. "Economic risk assessment of Cotopaxi volcano, Ecuador, in case of a future lahar emplacement". *Natural Hazards* 85 (1): 605-18. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2589-1>
- Salazar, Diana, y Robert D'Ercole. 2009. "Percepción del riesgo asociado al volcán Cotopaxi y vulnerabilidad en el Valle de Los Chillos (Ecuador)". *Bulletin de l'Institut français d'études andines* 38 (3): 849-71. <https://journals.openedition.org/bifea/2522>
- Schilling, S. P. 1998. "LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones". Open-File Report 98-638. <https://doi.org/10.3133/ofr98638>
- Sierra Vaca, Daniel, Francisco Vasconez Paredes, S. Daniel Andrade, Marco Almeida Vaca y Patricia Mothes. 2019. "Historical distal lahar deposits on the remote eastern-drainage of Cotopaxi volcano, Ecuador". *Journal of South American Earth Sciences* 95 (noviembre): 102251. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102251>

- Toapaxi, Jorge Augusto, Patricio Ortega, Edwin Casa, Jorge Santamaría y Ximena Hidalgo. 2019. "Análisis de la Modelación Numérica del Flujo Producto de una Erupción del Volcán Cotopaxi-Flanco Norte". *Revista Politécnica* 44 (1): 7-14. <https://doi.org/10.33333/rp.vol44n1.01>
- Troncoso, Liliana, Jorge Bustillos, Jorge E. Romero, Alicia Guevara, Janina Carrillo, Estefano Montalvo y Tatiana Izquierdo. 2017. "Hydrovolcanic ash emission between August 14 and 24, 2015 at Cotopaxi volcano (Ecuador): Characterization and eruption mechanisms". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 341 (julio): 228-41. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.032>
- Vallance, James W., y Richard M. Iverson. 2015. "Chapter 37 - Lahars and Their Deposits". En *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*, editado por Haraldur Sigurdsson, 649-64. Amsterdam: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>
- Vasconez, Francisco J., Jeremy Phillips, Mark J. Woodhouse, y S. Daniel Andrade. 2024. "Numerical Simulation of Long-Distance Debris Flows (Lahars) on Glacier-Clad Volcanoes: The Case of Cotopaxi, Ecuador". *Frontiers in Earth Science* 12 (julio). <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1426088>
- Vera, Pablo, Patricio Ortega, Edwin Casa, Jorge Santamaría y Ximena Hidalgo. 2019. "Modelación numérica y mapas de afectación por flujo de lahares primarios en el drenaje sur del volcán Cotopaxi". *Revista Politécnica* 43 (1): 61-72. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n1.971>
- Wolf, Theodore. 1878. *Memoria sobre el Cotopaxi y su última erupción acaecida el 26 de junio de 1877*. Guayaquil: Imprenta de El Comercio.