

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

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

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
<i>Jairo Estacio y Pascale Metzger</i>	
Capítulo 2. Los estudios de peligros geológicos en Quito desde la década de los ochenta	41
<i>S. Daniel Andrade, Eliana Jiménez Álvaro, Pablo Samaniego, Daniel Pacheco y Alexandra Alvarado</i>	
Capítulo 3. Las amenazas hidrometeorológicas en Quito	70
<i>Othon Zevallos Moreno</i>	
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
<i>Diana Andrea Salazar Valenzuela, Carlos Santiago Robles Romero y Esthela Elizabeth Salazar Proaño</i>	
Capítulo 5. La gestión de información para la gestión de riesgos: la experiencia de Quito (1993-2023)	113
<i>Fernando Puente-Sotomayor, Marcelo Yáñez, Diego Jurado y Jorge Ordóñez</i>	
Capítulo 6. La perspectiva cultural en el estudio de los riesgos en Quito. Reflexiones desde la historia y la antropología.....	132
<i>Elisa Sevilla y Alfredo Santillán</i>	

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

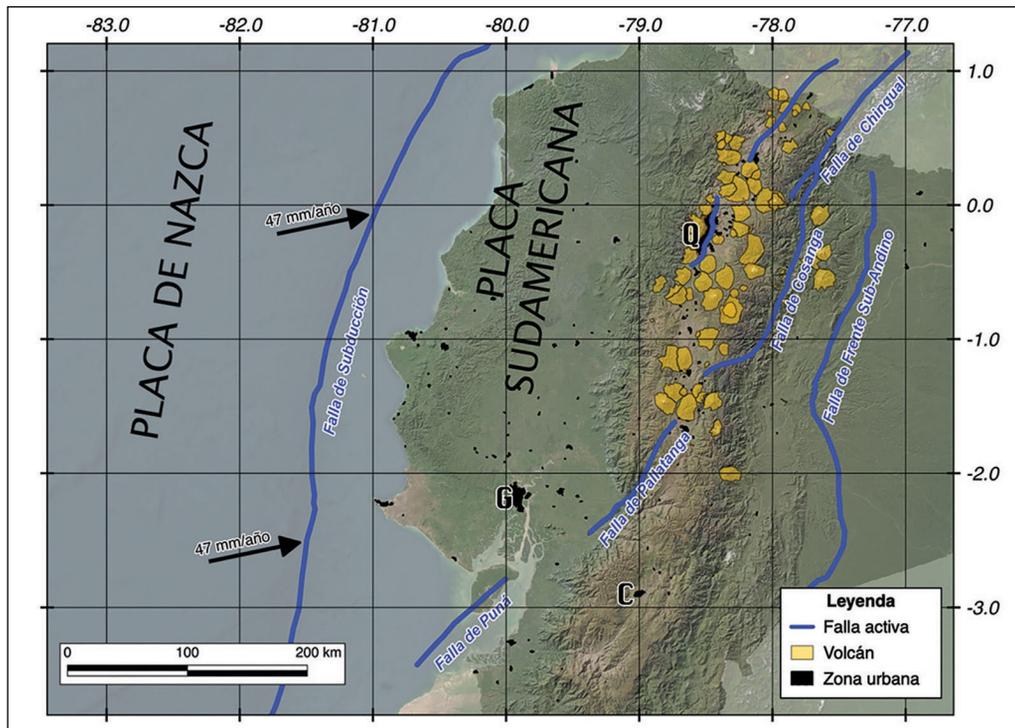
2 | Los estudios de peligros geológicos en Quito desde la década de los ochenta

S. Daniel Andrade, Eliana Jiménez Álvaro, Pablo Samaniego, Daniel Pacheco y Alexandra Alvarado

La presente revisión se centra en los avances que se han realizado en los estudios relacionados con la evaluación de los peligros geológicos en la ciudad de Quito y estará enfocada a los últimos 40 años de investigaciones. En efecto, entre las décadas de los sesenta y setenta, las ciencias geológicas adoptaron, de manera unánime, un marco teórico global conocido como Tectónica de Placas (McKenzie y Parker 1967; Morgan 1968; Le Pichon 1968; Wilson 1976), el cual serviría de base para entender y estudiar de manera coherente los procesos físicos y químicos de la Tierra en las décadas subsiguientes (Minster y Jordan 1978; Allègre, Lewin y Dupré 1988; Bercovici 1998, 2003). En especial, esta revolución científica permitió el florecimiento de nuevos enfoques cuantitativos para el estudio de procesos geológicos, como los terremotos producidos por fallas tectónicas, las erupciones producidas por volcanes y los movimientos en masa asociados a procesos de formación y erosión del relieve terrestre. En el contexto de la Tectónica de Placas, Ecuador se encuentra en una zona de subducción, donde la placa oceánica de Nazca se hunde por debajo de la placa continental de Sudamérica, mientras ambas se desplazan en sentidos opuestos (mapa 2.1) (Pennington 1981; Freymueller, Kellogg y Vega 1993; Trenkamp et al. 2002). Las medidas más recientes muestran que la placa de Nazca se mueve en dirección ENE, a una velocidad de 46-48 mm/año, con respecto a la placa Sudamericana (Jarrin et al. 2022, 2023). El proceso de subducción de estas placas está en el origen de todas las fallas tectónicas (Tibaldi y Ferrari 1992; Winter, Avouac y Lavenu 1993; Ego et al. 1996; Fiorini y Tibaldi 2012; Alvarado et al. 2016; Yepes et al. 2016; Baize et al. 2020) y todos los volcanes activos (Hall y Wood 1985; Barberi et al. 1988; Gutscher et al. 1999; M.L. Hall et al. 2008; Bablon et al. 2019, 2020) del Ecuador continental. El desarrollo geológico de las fallas tectónicas y de los volcanes da lugar a la formación de terrenos y relieves susceptibles a movimientos en masa.

El territorio de Quito es el resultado de procesos geológicos que han ocurrido en apenas los últimos dos millones de años de historia de la Tierra y que continuarán sucediendo por períodos de tiempo similares. El sustrato del segmento urbano de Quito se encuentra enteramente compuesto por depósitos originados en los volcanes de sus alrededores, como

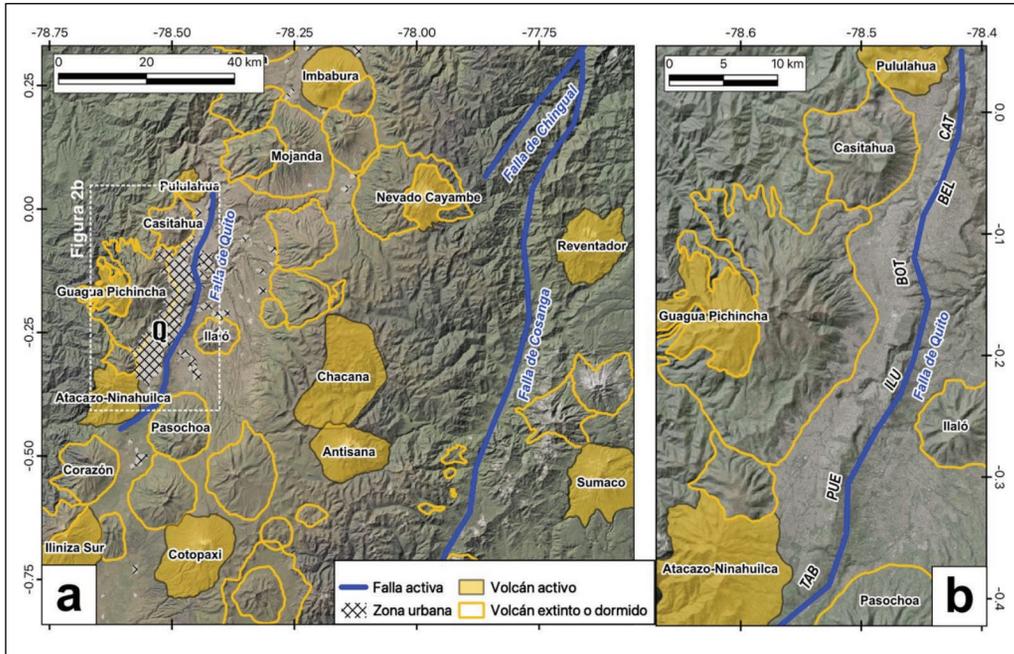
Mapa 2.1. Marco geodinámico simplificado del Ecuador



Nota: las fallas de subducción representan el límite entre las placas de Nazca y Sudamericana. Q = Quito, G = Guayaquil, C = Cuenca.

los complejos volcánicos del Pichincha (Robin et al. 2008, 2010), del Atacazo-Ninahuilca (Hidalgo et al. 2008), del Casitahua (Pacheco, Andrade y Alvarado 2014) y del Pululahua (Andrade et al. 2021) (mapa 2.2). También, gran parte de las zonas urbanas y suburbanas que corresponden a los valles de Los Chillos, Tumbaco y Guayllabamba se encuentran fuertemente influenciadas por el desarrollo de volcanes como el Cotopaxi (Barberi et al. 1995; Mothes, Hall y Janda 1998; Mothes et al. 2004; Hall y Mothes 2007), Mojanda-Fuya Fuya (Robin et al. 1997, 2009), Ilaló y Pasochoa, si bien estos tres últimos se consideran volcanes extintos.

El territorio de Quito ha sido popular y formalmente dividido en “Quito” y “Los Valles” debido al rasgo topográfico que los separa: las lomas de Bellavista-Catequilla, Ilumbisí-La Bota, Puengasí y El Tablón, alargadas en dirección N-S, las cuales han sido producidas por el movimiento de la falla tectónica de Quito (Alvarado et al. 2014) (mapa 2.2). A lo largo del tiempo, esta falla inversa ha ido levantando la meseta de Quito con respecto a la planicie de Los Valles, que se encuentra unos 300 metros por debajo. En escalas de tiempo de décadas a siglos, el movimiento de esa falla se expresa a través de múltiples terremotos que han afectado periódicamente a la ciudad (Beauval et al. 2010, 2013; Vaca et al. 2019). Para completar el panorama sobre el origen de los peligros geológicos, precisamente las laderas de los volcanes cercanos (p. ej. el Pichincha) y las laderas formadas por la falla de



Nota: (a) Mapa regional de la zona de Quito (Q), su relieve, sus fallas y sus volcanes. (b) Detalle donde se muestran las lomas de El Tablón (Tab), Puengasí (Pue), Ilumbisí (Ilu), La Bota (Bot), Bellavista (Bel) y Catequilla (Cat), delineadas por la falla de Quito.

Quito son los lugares más susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa (Municipio de Quito 2015).

En las siguientes secciones se presentan resúmenes correspondientes a los estudios de evaluación del peligro asociado a los tres procesos geológicos que definen el paisaje de la ciudad: sismos, volcanes y movimientos en masa. En especial, se presentan dos enfoques para la evaluación del peligro: uno a largo plazo y otro a corto plazo. El primero está representado principalmente por la elaboración de mapas probabilísticos donde los escenarios de peligro tienen períodos de retorno de años a décadas (incluso siglos) y son útiles para la toma de decisiones de planificación territorial a largo plazo. Por otro lado, el enfoque a corto plazo corresponde a las evaluaciones del peligro que se realizan mediante redes de monitoreo y que consisten en “pronósticos” sobre ocurrencia de amenazas válidos para días a semanas (incluso horas a minutos, para ciertos sistemas de alerta temprana). Las evaluaciones a corto plazo son útiles para decidir sobre la ejecución de planes de respuesta a las emergencias.

Evaluación del peligro a largo plazo

Peligro sísmico

Desde el punto de vista de la Tectónica de Placas, el proceso de subducción es responsable de los grandes terremotos que pueden ocurrir tanto en la zona costera como en el sistema de fallas llamado Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP), que atraviesa el territorio ecuatoriano (mapa 2.1) (Alvarado et al. 2016). Con un gran número de sismos históricos, recopilados por Beauval et al. (2010), también se encuentran sistemas de fallas menores al este y oeste del sistema mayor CCPP. Esta compleja geodinámica hace del Ecuador un país con una alta actividad sísmica, con al menos cinco sismos de magnitud mayor a 7,5 observados en los últimos 100 años (Beauval et al. 2010).

La ciudad de Quito está expuesta a una alta amenaza sísmica debido a su proximidad con la zona de subducción del Pacífico y al sistema de fallas CCPP, ambas fuentes capaces de generar sismos importantes ($M > 7$) (mapa 2.1). Además, la urbe se ha extendido sobre el bloque cabalgante de un sistema de fallas inversas, conocido como “falla de Quito” (Alvarado et al. 2014), cuyos pliegues en compresión forman las lomas de Bellavista-Catequilla, Ilumbisí-La Bota, Puengasí y El Tablón, las cuales separan la cuenca de Quito de la zona de Los Valles, hacia el este (mapa 2.2).

Métodos de estudio y evaluación del peligro sísmico

La evaluación del peligro sísmico consiste en determinar la potencial aceleración (fuerza) del movimiento del suelo en un lugar específico como consecuencia de un sismo de características específicas (*i. e.* epicentro y magnitud). Hay dos metodologías disponibles para llevar a cabo esta evaluación: el análisis determinístico y el análisis probabilístico. El primero considera un escenario crítico, definido como el sismo de magnitud máxima y generado en la fuente más cercana al sitio que se pretende evaluar. Por lo tanto, en el análisis determinístico se toma en consideración un “escenario pesimista” (*worst case scenario*, el sismo más intenso posible) y se provee un valor de aceleración máxima esperada para el movimiento del suelo en el sitio de estudio, calculado a partir de la aplicación de un modelo físico. Para el análisis probabilístico, en cambio, se considera y cuantifica las variables importantes que describen el proceso sísmico (*i. e.* ubicación, magnitud), a partir de un catálogo sísmico histórico, que incluye diversas fuentes en un período de tiempo que puede ser de décadas a siglos. Esas variables son analizadas en conjunto para el cálculo de las probabilidades de aceleración del suelo producida por sismos futuros (Kramer 1996; Baker, Bradley y Stafford 2021). Por lo tanto, estas dos metodologías pueden proveer diferentes valores en diferentes períodos de retorno.

En la práctica, la evaluación probabilística de la amenaza sísmica es una de las bases para la elaboración de los códigos de construcción. Esta se aplica en zonas sísmicamente complejas, donde deben considerarse diversas fuentes sísmicas y el resultante movimiento de suelo que puede generarse en el sitio de estudio, junto con su probabilidad de ocurrencia (Beauval et al. 2014).

Se han realizado varios esfuerzos para identificar en el registro histórico (últimos 500 años) la fuente de sismos que causaron daños en la ciudad de Quito. Trabajos como los de Del Pino y Yepes (1990) y Egred (2009) muestran que la ciudad ha experimentado intensidades MSK¹ (Medvedev et al. 1963) en el rango VII-VIII al menos cinco veces. Estos sismos ocasionaron movimientos tan fuertes que los residentes de la época reportaron dificultades para mantenerse en pie, junto con grandes daños en casas e iglesias (Chatelain et al. 1999). El evento más destructivo, con una intensidad MSK de VIII (destrucción de edificios), se presentó en 1859, con una magnitud media de 7,2, estimada con base en el registro de intensidades, aunque hay dudas sobre su fuente (Beauval et al. 2010). Otros eventos destructivos en Quito fueron el sismo de Riobamba de 1767, con una magnitud media estimada en 7,6 y ubicado 160 km al sur de Quito, y el sismo de Ibarra de 1868, de magnitud media de 7,2, probablemente localizado 50 km al norte de Quito (Beauval et al. 2010, 2013).

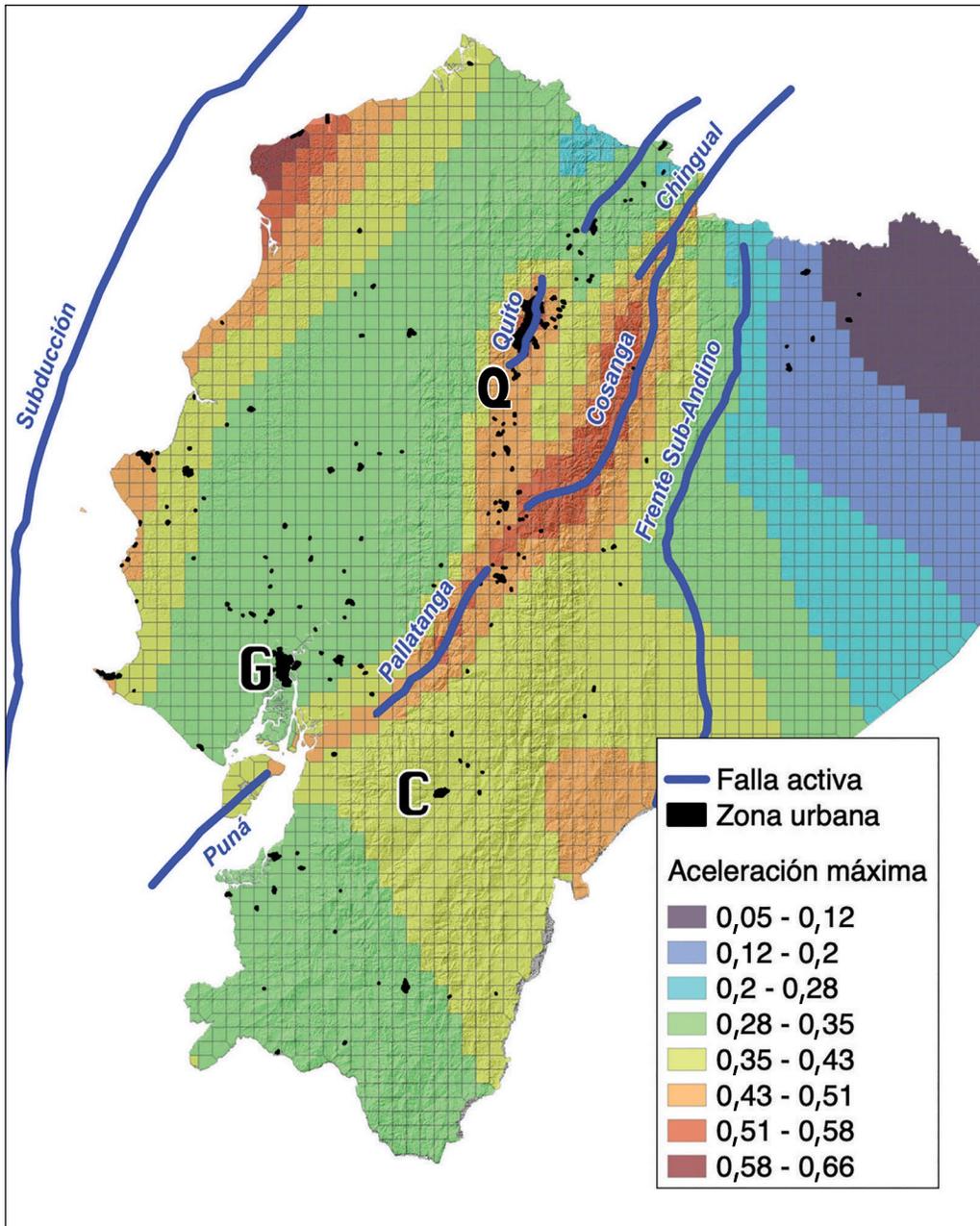
En los últimos 100 años no se han registrado grandes daños en la ciudad a causa de sismos. Sin embargo, los sismos recientes de mayor impacto han sido asociados con el sistema de fallas de Cosanga (sismo de Baeza, 1987, de magnitud 6,9), con la falla de Quito (sismo de Pomasqui, 1990, de magnitud 5,3 y sismo de Guayllabamba, 2014, de magnitud 5,1; Beauval et al. 2013) y con la zona de subducción (sismo de Pedernales, 2016, de magnitud 7,8; Nocquet et al. 2017).

Uno de los estudios de peligro sísmico más reciente fue publicado por Beauval et al. (2018), quienes compilaron información de varios siglos obtenida a partir de estudios históricos (Beauval et al. 2010, 2013) y la completaron con el análisis de los patrones de sismicidad recientes registrados por las estaciones permanentes de la Red Nacional de Sismógrafos (RENSIG) del IG-EPN (Alvarado et al. 2018). Este catálogo se comparó con la distribución de fallas activas y las medidas geodésicas realizadas por Alvarado (2012) y así se definió una zona sismotectónica (con un nivel de amenaza sísmica particular) para la ciudad de Quito, donde se calculó el peligro sísmico mediante análisis probabilístico (mapa 2.3). Los resultados presentados por los autores muestran que inclusive con la posibilidad de ocurrencia de megasismos (Magnitud > 8) en la zona de subducción, la fuente más notable de

¹ Escala Medvedev-Sponheuer-Karnik.

amenaza sísmica para la ciudad es el sistema de fallas de Quito (Beauval et al. 2014, 2018). Estos resultados concuerdan con los escenarios planteados por Chase et al. (2023), quienes estimaron que un sismo de magnitud 7 en el sistema de fallas de Quito provocaría una intensidad de sacudimiento de VIII en la escala modificada de Mercalli, que se describe como un “sismo destructivo”.

Mapa 2.3. Peligro sísmico del Ecuador



Fuente: Beauval et al. (2018).

Nota: obsérvese la ubicación de Quito donde se espera aceleraciones de 0,51 g con una probabilidad de 10 % anual para un período de 475 años. Q = Quito, G = Guayaquil, C = Cuenca. Los principales sistemas de fallas activas del Ecuador coinciden con las zonas de mayor aceleración esperada.

En sus cálculos, Beauval et al. (2018) obtuvieron que el valor de aceleración del suelo para la zona sismotectónica de Quito es de 0,4 g (equivalente al 40 % del valor de aceleración de la gravedad), con una probabilidad de excedencia del 10 % en un período de 50 años. Sin embargo, los autores advierten que este valor promedio puede tener gran variabilidad, y que fue estimado considerando un basamento de roca dura, por lo que es necesario tener en cuenta, en el futuro, los “efectos de sitio” existentes en la ciudad, que tiene un sustrato de sedimentos volcánicos jóvenes.

Los efectos de sitio son las modificaciones que sufren las ondas sísmicas una vez que atraviesan las capas más superficiales del subsuelo. Estos juegan un papel muy importante en la evaluación de las amenazas, porque las ondas sísmicas pueden ser amplificadas o atenuadas fuertemente justo antes de alcanzar la superficie, donde se encuentran las edificaciones y la infraestructura. En este contexto, entender la amplificación de las ondas sísmicas en Quito es esencial para complementar la evaluación de la amenaza sísmica. Los primeros intentos por caracterizar la variabilidad espacial por efectos de sitio ante un sismo en Quito fueron llevados a cabo por Chatelain et al. (1999) y Villacís et al. (1997), quienes zonificaron la respuesta del suelo con base en las características topográficas, además de información geotécnica de algunas perforaciones poco profundas. Sin embargo, Villacís et al. (1997) encontraron dos problemas principales al modelar la estructura del suelo, 1) los datos de las perforaciones no excedían los 10-15 m de profundidad y 2) los mapas geológicos disponibles de la región no proveían información suficiente para definir un modelo de la estructura del suelo hasta al menos los 30 metros de profundidad, que es lo óptimo para hacer estimaciones adecuadas de los efectos de sitio.

En un intento por determinar las frecuencias de amplificación de las ondas sísmicas en la ciudad de Quito, Guéguen et al. (2000) realizaron medidas de vibración sísmica ambiental en 673 puntos. Los autores observaron que las ondas se amplificaban entre 1-2 Hz en la mayoría de los sitios. Subsecuentemente, Alfonso-Naya et al. (2012) encontraron un pico de amplificación de baja frecuencia presente solo en la parte sur de la ciudad, en alrededor de 0,3 Hz. Poco después, este pico de amplificación fue confirmado por Laurendeau et al. (2017), quienes concluyeron que la respuesta sísmica varía entre la parte norte y sur de la ciudad. Esta diferencia, en el grado de amplificación de ondas sísmicas entre la parte norte y sur, fue reportada también por Courboux et al. (2022), quienes, sobre la base de simulaciones numéricas, confirmaron que un sismo generado en la zona de subducción del Pacífico de magnitud 8,4 – 8,8, similar al de 1906 (Yoshimoto et al. 2017), generaría una amplificación en las amplitudes de las ondas sísmicas en frecuencias de alrededor de 0,3 Hz en la zona sur de Quito.

Recientemente, la diferencia en la respuesta sísmica de la parte norte y sur de la ciudad fue explicada por Pacheco et al. (2022), quienes encontraron que la cobertura sedimentaria al sur es mayor que al norte, lo que ocasiona este pico de amplificación. Estos autores también presentaron perfiles de velocidad de las ondas S para el material de relleno del subsuelo, así como una geometría preliminar del basamento rocoso. Estos parámetros son fundamentales para entender la amplificación de ondas sísmicas en la cuenca de Quito.

Perspectivas futuras sobre la evaluación del peligro sísmico

El estudio detallado de los efectos de sitio en la ciudad de Quito, también conocido como microzonificación sísmica, aún no ha sido completado y debe ser una prioridad para el futuro cercano. Esta información es fundamental para una adecuada evaluación del riesgo en la ciudad, así como para la definición de mejores normas de construcción. El pico de aceleración máxima esperado de 0,4 g (Beauval et al. 2014) pone a Quito en un nivel de amenaza moderada. Sin embargo, este valor debe ser modificado en el futuro, tomando en cuenta ecuaciones de predicción de movimiento del suelo propias para la ciudad, incluyendo en el cálculo los efectos de sitio y la diferente respuesta sísmica que se observa para la zona norte y sur. Además, son necesarios estudios multidisciplinarios que caractericen el sistema de fallas de Quito y su cinemática, y que incluyan los efectos geométricos de tener una fuente sísmica en el campo cercano de la ciudad, ya que estos efectos ciertamente tendrán consecuencias directas en la distribución del daño en caso de un gran sismo destructivo.

Peligro volcánico

Durante los últimos 40 años se han realizado avances significativos en el conocimiento geológico de los volcanes que rodean a Quito, así como en la evaluación de sus amenazas, como resultado de lo cual la mayoría cuenta con mapas de peligros (tabla 2.1). Cabe señalar que estos estudios se han intensificado y profundizado a raíz de erupciones ocurridas en las últimas décadas, como las del Guagua Pichincha (1999-2001), Reventador (2002-en curso) y Cotopaxi (2015; 2022-2023), que tuvieron un impacto en la ciudad. De estos estudios se desprende que los volcanes de la cordillera Occidental (Pululahua, Guagua Pichincha y Atacazo-Ninahuilca) presentan dinanismos altamente explosivos, con erupciones que pueden alcanzar magnitudes importantes (VEI 4-5), pero con recurrencias eruptivas bajas, del orden de los siglos a milenios (Robin et al. 2008; Hidalgo et al. 2008; Volentik et al. 2010; Andrade et al. 2021). Por el contrario, los volcanes ubicados en la cordillera

Oriental (Cayambe, Antisana, Cotopaxi y Reventador) presentan erupciones con magnitudes variables (VEI 2-4), es decir desde poco hasta altamente explosivas, y frecuencias eruptivas mucho mayores, del orden de las décadas (Barberi et al. 1995; Samaniego et al. 1998; Bourdon et al. 1999; Hall y Mothes 2007; Samaniego et al. 2008; Pistolesi et al. 2011).

Tabla 2.1. Resumen de los mapas de peligros volcánicos de interés para Quito

Volcán	Fenómenos volcánicos representados	VEI de los escenarios representados	Recurrencia	Referencias
Pululahua	- Flujos piroclásticos - Caídas de ceniza - Domos de lava - Flujos de lodo y escombros	4 - 5	siglos- milenios	Hall y Von Hillebrandt (1988a)
Guagua Pichincha	- Flujos piroclásticos - Caídas de ceniza - Domos de lava - Flujos de lodo y escombros	4 - 5	siglos	Mothes et al. (2019) IG-EPN (1999) Hall y Von Hillebrandt (1988b)
Atacazo Ninahuilca	- Flujos piroclásticos - Caídas de ceniza - Domos de lava - Flujos de lodo y escombros	4 - 5	siglos- milenios	Hall y Maruri (1992)
Nevado Cayambe	- Flujos piroclásticos - Caídas de ceniza - Domos de lava - Flujos de lodo y escombros	2 - 4	siglos (+20 erupciones durante los últimos 4000 años)	Samaniego et al. (2002)
Cotopaxi	- Flujos piroclásticos - Caídas de ceniza - Flujos de lava - Flujos de lodo y escombros	2 - 4	décadas- siglos	Vásconez et al. (2017) Mothes et al. (2016a) Mothes et al. (2016b) Hall et al. (2004a, 2004b) Hall y Von Hillebrandt (1988c, 1988d) Miller, Mullineaux y Hall (1978)
Antisana	- Caídas de ceniza - Flujos de lava - Flujos de lodo y escombros	2 - (?)	siglos- milenios	Hall, Beate y Von Hillebrandt (1989)
Reventador	- Flujos piroclásticos - Caídas de ceniza - Flujos de lava - Flujos de lodo y escombros	2 - 4	décadas	Bourquin et al. (2011)
Sumaco	- Flujos piroclásticos - Caídas de ceniza - Flujos de lava - Flujos de lodo y escombros	2 - 4	siglos (?)	Salgado Loza et al. (2022)

La evaluación de los peligros volcánicos reposa en dos pilares complementarios. Por un lado, se debe identificar de forma cuantitativa y detallada los fenómenos que pueden ocurrir durante las erupciones de un volcán, en especial su frecuencia, magnitud y alcance (cartografía), desde un punto de vista geológico. Por otro lado, se debe contar con modelos físico-matemáticos que representen el fenómeno con el fin de reproducirlo digitalmente (modelos numéricos) a través de procesos computarizados. Con respecto al primer pilar, las investigaciones de campo y laboratorio de los depósitos de las erupciones pasadas sirven como base para la caracterización de los dinamos eruptivos, así como la determinación de la magnitud de las erupciones pasadas, mientras que el análisis cronoestratigráfico de la historia reciente de un volcán permite definir la frecuencia de dichas erupciones. De esta manera se pueden definir cuantitativamente diferentes escenarios eruptivos, con sus probabilidades basadas en períodos de recurrencia establecidos (*i. e.* décadas o siglos). Esta información representa datos de entrada para los modelos numéricos, los cuales producen zonificaciones del peligro, las mismas que incluyen los parámetros físicos del fenómeno y sus probabilidades de ocurrencia. Estas zonificaciones conforman la parte medular de los mapas de peligros volcánicos.

Para el DMQ se identifican principalmente dos fenómenos volcánicos que representan mayor peligro: 1) la caída de ceniza y piroclastos, y 2) los flujos de lodo y escombros (lahares). Debido a que la gran mayoría de volcanes vecinos a Quito presentan dinamos explosivos, la caída de ceniza y piroclastos puede cubrir gran parte de su territorio con capas cuyo espesor en un punto cualquiera depende de la distancia del volcán (a mayor distancia, menor espesor esperado), la magnitud de la erupción (a mayor magnitud, mayor acumulación) y la dirección de los vientos dominante en el momento de la erupción. Los escenarios de peligro por caída de ceniza para el DMQ se definen gracias al conocimiento detallado de los volcanes de interés (tabla 2.1). Así, por ejemplo, por su frecuencia eruptiva, el Reventador y el Cotopaxi son los volcanes que mayores probabilidades tienen de producir caídas de ceniza en el DMQ. Sin embargo, por la magnitud de las erupciones ocurridas en el pasado, los volcanes de la cordillera Occidental, en particular el Guagua Pichincha, son los que pueden depositar los espesores más importantes de piroclastos en Quito.

En lo que respecta a los flujos de lodo y escombros (lahares), estos fenómenos son recurrentes ya sea durante o después de una erupción volcánica, e incluso en laderas de volcanes extintos. Debido a su enorme casquete glaciar, se conoce que, durante las grandes erupciones del Cotopaxi de 1744, 1768 y 1877, se produjeron lahares que afectaron al Valle de Los Chillos a

través del drenaje de los ríos Pita y Santa Clara (Mothes et al. 2004). Con respecto a los flujos de escombros producidos por lluvias (llamados también “lahares secundarios”), en el caso de Quito, estos fenómenos son analizados tanto desde la perspectiva vulcanológica como desde los movimientos en masa.

La metodología presentada anteriormente ha permitido la zonificación de las amenazas y la elaboración de los mapas correspondientes para la gran mayoría de volcanes que afectan a Quito (tabla 2.1). La primera generación de mapas de peligro volcánico fue elaborada en la década de los ochenta, y está basada principalmente en el conocimiento geológico de la época, ya que no se contaba con modelos numéricos para simular los escenarios eruptivos. Desde entonces, los conocimientos sobre cada volcán han ido mejorando, así como la capacidad de producir modelos numéricos de los fenómenos para realizar la zonificación. Por ejemplo, volcanes como el Guagua Pichincha y el Cotopaxi cuentan con varias versiones de sus respectivos mapas de peligro, y se han producido mapas para algunos volcanes poco estudiados en el pasado, como el Reventador. En la actualidad, los investigadores se encuentran elaborando una nueva generación de mapas de peligro que incluyen 1) la utilización de métodos de “elicitación de expertos”, que consiste en la conformación de un panel de especialistas a quienes se les pregunta de forma anónima sobre los principales parámetros usados para la definición de los escenarios eruptivos (Tadini et al. 2021); y 2) la identificación y cuantificación de las incertidumbres intrínsecas a los fenómenos estudiados y los métodos utilizados (Tadini et al. 2022).

Perspectivas futuras sobre la evaluación del peligro volcánico

Desafortunadamente, los mapas de peligro volcánico producidos durante las últimas dos décadas han sido muy poco utilizados en los procesos de planificación territorial a largo plazo o para la toma de decisiones orientadas a la reducción del riesgo. Su uso más común ha sido como instrumentos que ayudan a la preparación de planes de respuesta a crisis volcánicas en marcha, como sucedió con las erupciones del Guagua Pichincha, en 1999, y del Cotopaxi, en 2015 y 2022-23. Aparte de la falta de decisión política, las principales barreras para el uso adecuado de los mapas son la complejidad que suelen tener la zonificación del peligro y el significado de los fenómenos en el mapa, así como las dificultades de comprensión que pueden acompañar a la información probabilística.

En el futuro, el objetivo primordial sigue siendo que el conocimiento sobre los procesos y peligros volcánicos sea de uso común en la sociedad quiteña, y que así se vuelva consciente de que los riesgos se derivan del propio desarrollo de la ciudad y no de procesos de la naturaleza. Esto implica probar nuevas formas de difundir la información sobre peligros volcánicos. Sin

embargo, este proceso no está exento de dificultades, pues estos documentos son cada vez más complejos por la cantidad de información que incluyen, así como por el carácter probabilístico de los mismos. En particular, se debe lograr una mejor concordancia entre la búsqueda de una mayor exactitud/precisión (menor incertidumbre) y la complejidad de los mapas para un uso óptimo en la toma de decisiones. Así mismo, es fundamental homogenizar el proceso de elaboración de los mapas en lo referente a los períodos de retorno de los escenarios representados, pero también en cuanto a las metodologías usadas para la zonificación, el soporte utilizado (papel vs. digital), el público al que están dirigidos y las opciones de interactividad.

Peligro por movimientos en masa

Los movimientos en masa son desplazamientos ladera abajo de suelo, roca o materiales orgánicos, por efecto de la gravedad y la pendiente del terreno (Hung, Leroueil y Picarelli 2014; Highland y Bobrowsky 2008). Son parte de los procesos geológicos exógenos que intervienen en la modelación y evolución del paisaje (Egholm, Knudsen y Sandiford 2013) y ocurren especialmente en zonas montañosas de alto relieve, formadas por tectonismo y/o volcanismo activos y con fluctuación climática (Keefer 1984; Hermanns y Strecker 1999).

En el caso de Quito, las lomas de Bellavista-Catequilla, Ilumbisí-La Bota, Puengasí y El Tablón, alargadas en dirección N-S, corresponden a relieves formados por la actividad tectónica de la falla de Quito (mapa 2.2). Estas colinas presentan mayores pendientes hacia sus flancos orientales, donde, además, se observa mayor incisión fluvial, todo lo que seguramente contribuyó al disparo de grandes paleodeslizamientos en el Holoceno Medio, entre 8000 y 4000 años antes del presente (Jiménez Álvaro 2023). Por otro lado, extensas laderas de origen volcánico propensas a movimientos en masa corresponden a los volcanes Pululahua, Casitahua, Pichincha, Atacazo-Ninahuilca e Ilaló. En la actualidad, decenas de barrios formales e informales del área metropolitana de Quito se asientan sobre estas laderas de origen tectónico y volcánico, donde generalmente en épocas de lluvia se observa la ocurrencia frecuente de pequeños movimientos en masa con volúmenes de entre 5000 y 50 000 m³, por la reactivación de antiguos depósitos coluviales.

Los factores que controlan la generación de movimientos en masa se dividen en condicionantes y desencadenantes. Los primeros están dados por las propiedades físicas de las rocas y los suelos, su microestructura, la morfología (pendiente de la ladera, forma del relieve), las características estructurales, hidrológicas y la vegetación que cubre la ladera (Suárez 2009). Dentro de los factores condicionantes es importante considerar procesos agravantes, los cuales, en el transcurso del tiempo, reducen la resistencia de

las rocas y suelos, como son la meteorización, las fluctuaciones climáticas y la deformación tectónica (Gutiérrez Elorza 2008).

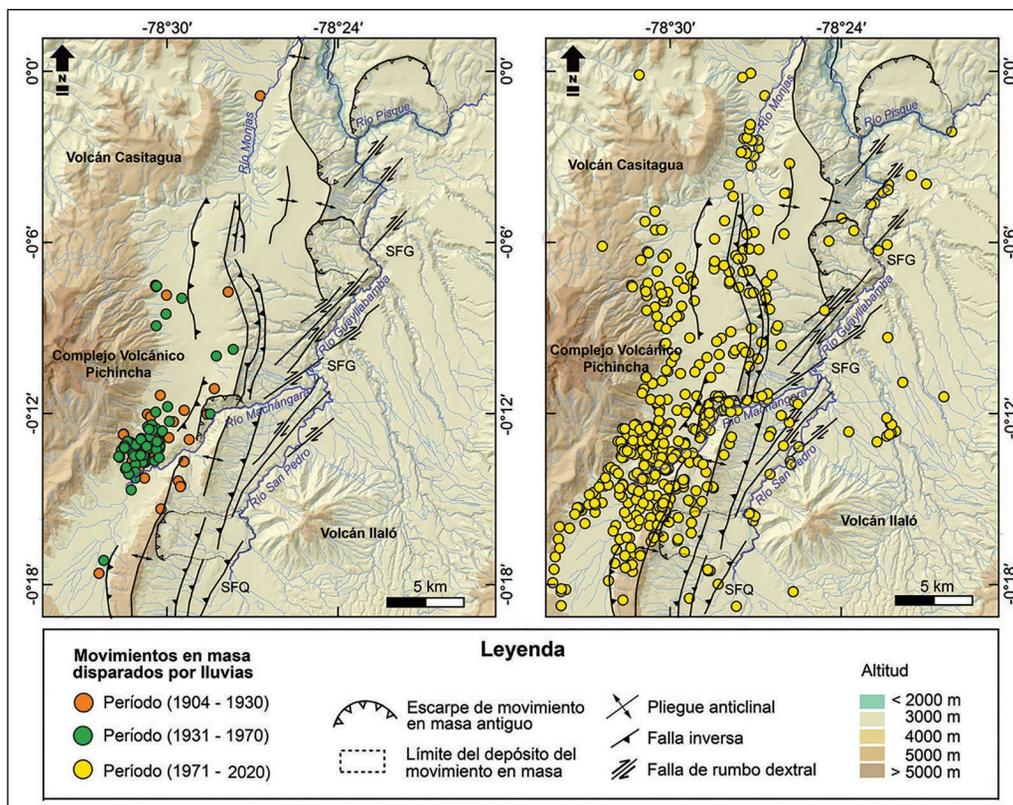
Los factores desencadenantes se relacionan con las fuerzas que pueden generar inestabilidad en una ladera, como eventos sísmicos, lluvias intensas, erosión fluvial y sobrecarga (Suárez 2009). En el estudio de los movimientos en masa en zonas urbanas, además, es fundamental integrar las interacciones antrópicas que pueden reducir la resistencia de los suelos y las rocas, cambiando el estado de los factores condicionantes e incrementando la exposición de la población. En Quito han ocurrido grandes sismos, como los de Guayllabamba de 1587 (magnitud 6,4), Quito de 1859 (magnitud 7,2) y Antisana de 1914 (magnitud 6,4), que provocaron grietas, hundimientos en las laderas y grandes deslizamientos de cerros y lomas (Beauval et al. 2010). Eventos más recientes asociados a ramales del segmento norte del sistema de fallas inversas de Quito, como el sismo de 1990 de Pomasqui (Mw 5,3), el sismo de 2011 (Mw 4,0) y el sismo de 2014 (Mw 5,1), provocaron caídas de rocas en las canteras de Pomasqui, caídas y derrumbes de suelos y rocas en taludes verticales a lo largo de varias vías del norte y este de la ciudad, así como derrumbes y deslizamientos en los taludes a lo largo del río Monjas.

En cuanto a los movimientos en masa disparados por lluvias, se ha levantado una base de datos que contiene 752 eventos de entre 1904 y 2020 (Peltre 1989; Proyecto Tomorrow's Cities²). Del total de sucesos, 592 corresponden a deslizamientos, derrumbes y caídas, 86 a aluviones o flujos de escombros y 74 a hundimientos o subsidencias del terreno. En el mapa 2.4 se muestra su ubicación y relación con los períodos de crecimiento urbano de Quito, se puede ver que el 60 % de los eventos se produjo en el período de 1971 a 2020. Estos eventos pueden ser catalogados como pequeños a muy pequeños (volumen entre 500 y 5000 m³), pero también han ocurrido eventos desastrosos como los recientes aluviones del barrio El Pinar, en 2019, y de La Gasca, en 2022.

Las condiciones morfológicas y climáticas de Quito también han determinado la costumbre de rellenar las quebradas y drenajes desde el siglo XVIII, con el objetivo de ampliar el espacio urbano, lo que no se ha podido controlar socialmente (Metzger y Peltre 1996). Según el estudio de Taipe Singo (2022), en la microcuenca del río Machángara se determinó que el 77,4 % de los 522 movimientos en masa ocurridos entre 1904 y 2020 se localizaron en drenajes que fueron rellenados (mapa 2.4). Por otro lado, en la microcuenca del río Monjas, donde el crecimiento urbano se aceleró apenas desde 1970, solamente se dispararon 86 movimientos en masa en el período 1904-2020, de los cuales el 53 % se localiza en drenajes rellenados (Espinosa 2022). Estos datos dan cuenta de la influencia de las actividades antrópicas en la ocurrencia de movimientos en masa en Quito.

² <https://tomorrowscities.org/tomorrows-quito>

Mapa 2.4. Movimientos en masa ocurridos en el DMQ



Fuente: Jiménez Álvaro (2023).

Nota: ocurridos entre 1904 y 2020 y su relación con los períodos de crecimiento urbano.

Métodos de estudio y evaluación del peligro por movimientos en masa

Dentro de la investigación de los movimientos en masa se han desarrollado varias metodologías que integran los factores condicionantes y desencadenantes en función de los objetivos del estudio. El análisis de los factores condicionantes permite elaborar mapas de susceptibilidad, mapas de inventario y análisis de estabilidad estático de laderas con el cálculo de un factor de seguridad. La generación de mapas de amenaza y análisis de estabilidad dinámico de laderas requiere la integración de los factores desencadenantes, que en el caso de los eventos sísmicos y de lluvia incorporan una probabilidad de ocurrencia. En la tabla 2.2 se muestra una síntesis de los métodos, en función de la escala territorial, que pueden ser implementados dentro de la investigación de los movimientos en masa en zonas urbanas.

Tabla 2.2. Metodologías, datos y políticas para la investigación de movimientos en masa en zonas urbanas

Escala	Métodos	Datos	Políticas
Global - Nacional	Mapas de susceptibilidad y de inventario basados en SIG, o mapas de peligro simples	Imágenes satelitales, sensores remotos, información nacional	Formulación de políticas, planes y proyectos con financiamiento estatal
Regional	Mapas de peligro con umbrales de disparo (empírico-estadísticos) por lluvias y/o sismos	Combinaciones de capas de información en SIG (geología, geomorfología, etc.), modelos digitales de elevación	Zonificación del riesgo y planificación territorial. Sistemas de alerta temprana
Ciudad	Cartografía y clasificación de amenazas y riesgo por expertos	Inventario de MM asociados y discriminados por tipología y causa de disparo	Normas y políticas para la construcción. Infraestructura resiliente a movimientos en masa
Laderas y taludes	Análisis de estabilidad y diseño de taludes	Estudios estratigráficos y perfiles topográficos de laderas	Acciones comunitarias, estudios y obras de ingeniería para la mitigación de la amenaza y reducción del riesgo
Escala de vivienda, construcción o sitio específico	Modelos geológicos y geotécnicos detallados	Datos geotécnicos de laboratorio	

Fuente: Tomorrow's Cities Decision Support Environment Work Package 3.

Los estudios actuales de la susceptibilidad por movimientos en masa en Quito se han realizado a través del análisis estadístico basado en sistemas de información geográfica. En este tipo de análisis, la susceptibilidad se obtiene a través de operaciones sencillas entre los factores condicionantes. Algunos ejemplos recientes de estas zonificaciones de susceptibilidad, utilizando el método estadístico bivariado, son los trabajos de Robalino y Pullas (2018). La cartografía de susceptibilidad a deslizamientos utilizando técnicas de evaluación lógica difusa y criterios múltiples aplicada a Quito fue realizada por Salcedo et al. (2018), mientras que la cartografía de susceptibilidad obtenida a través de regresión logística y análisis de sensibilidad fue obtenida por Puente-Sotomayor, Mustafa y Teller (2021). En cuanto a los mapas de inventario de movimientos en masa, se han realizado varios trabajos, unos basados en técnicas de fotointerpretación, como el de Jaya (2013), y otros a través de la recopilación de eventos pasados de varias fuentes de información, como la base de datos de eventos morfoclimáticos de Quito entre 1900 y 2020 (Proyecto Tomorrow's Cities).

En relación con los estudios de amenaza realizados en la ciudad de Quito, se han desarrollado investigaciones de la amenaza de deslizamientos inducidos por sismos, en las cuales se integra la aceleración crítica que se requiere para que se exceda el equilibrio estático de una ladera. Estas han sido aplicadas en el análisis de estabilidad de las laderas suroccidentales y surorientales de la ciudad de Quito (Zapata 2018). Por otra parte, el mode-

lo de simulación numérica de deslizamientos, flujos de lodo y escombros CHASM (*Combined Hydrological and Stability Model*), desarrollado por la Universidad de Bristol (Reino Unido),³ permite realizar el modelamiento de la ruptura de una ladera por métodos estocásticos, integrando la lluvia como factor desencadenante (Anderson y Howes 1985; Holcombe et al. 2016). Este modelo calcula la infiltración del agua de lluvia para estimar un factor de seguridad dinámico, e incorpora otras variables como la evapotranspiración, la conductividad hidráulica, la influencia de la vegetación y la carga superficial. Además, estas simulaciones se han aplicado en estudios de caso en la ciudad de Quito, como el del barrio San Luis de Miravalle (Zapata et al. 2023).

Perspectivas futuras sobre la evaluación del peligro por los movimientos en masa

Es de esperar que el cambio climático produzca nuevas inestabilidades dentro del equilibrio dinámico de los procesos geológicos superficiales, entre los cuales se cuentan los movimientos en masa y que pueden definirse para períodos de tiempo de las décadas a los siglos (Gutiérrez Elorza 2008). En la actualidad, las inestabilidades se producen en tiempos cortos relacionados con cambios bruscos, no solo en relación con el clima, sino debido a transformaciones en el medio físico por una inadecuada ocupación del territorio asociada con el crecimiento urbano (Estacio y Rodríguez 2012). Ejemplos muy actuales son los procesos de subsidencia ocurridos en el barrio de Solanda a partir de 2015 y los procesos de erosión regresiva en la cuenca del río Monjas.

El crecimiento urbano de Quito ha acelerado la frecuencia de ocurrencia de los movimientos en masa, y esta realidad debería promover la creación de políticas públicas para la construcción de una ciudad resiliente. Las políticas deben centrarse en planes de manejo del territorio, especialmente en las zonas de laderas con alta pendiente que rodean la ciudad y los sistemas de quebradas; se debería implementar sistemas de monitoreo y alerta con la participación de instituciones públicas, privadas, la academia y la acción comunitaria. Es interesante citar como ejemplo el programa Guardianas de las Laderas, que se ha desarrollado en la ciudad de Manizales, Colombia, desde el año 2003. Esta iniciativa tiene como objetivo generar conciencia en la comunidad sobre la importancia del adecuado manejo de las laderas a través de acciones de mantenimiento y monitoreo, para la reducción de impactos por movimientos en masa (Mejía Prieto, Giraldo Valencia y Trujillo Gálvez 2006).

³ <https://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/chasm/>

La ocurrencia de amenazas naturales puede ser vigilada (o “monitoreada”) mediante instrumentos de medida, los cuales pueden mostrar sus signos precursoros o el propio proceso físico de la amenaza en marcha. En el caso de los sismos y terremotos, la ciencia aún no ha conseguido determinar algún parámetro que pueda ser medido e identificado unívoca y sistemáticamente como precursor (modelo determinístico), si bien algunas propuestas existen desde hace décadas (Helman 2020; Bulusu et al. 2023). Por desgracia, son más notables los casos en los cuales los intentos de predicción de terremotos han resultado un fracaso (Yepes et al. 2020). Los sismos solamente pueden ser identificados y medidos con precisión en el momento en que ocurren y a posteriori.

Por otro lado, las erupciones volcánicas y los movimientos en masa suelen presentar signos precursoros que pueden ser medidos de manera exitosa antes de la ocurrencia de la amenaza. La sismicidad, la deformación de la superficie y los cambios geoquímicos en las emanaciones gaseosas de un volcán son los parámetros precursoros que ayudan a anticipar la cercanía de una erupción.⁴ En cuanto a los movimientos en masa, el único precursor y disparador cuantificable es la ocurrencia de lluvias, por lo que las medidas incluyen la precipitación en tiempo real y con alta resolución temporal (horas o minutos) y el nivel de saturación de agua de los suelos.

Sin embargo, la interpretación de las medidas de los parámetros precursoros con el fin de realizar una evaluación del peligro (pronóstico) a corto plazo es una tarea compleja, que requiere del trabajo conjunto de equipos multidisciplinarios especializados, soportados por sistemas tecnológicos de alto nivel. El objetivo de la evaluación del peligro a corto plazo es apoyar la toma de decisiones para una adecuada ejecución de planes de respuesta a la emergencia o dar inicio a sistemas de alerta temprana con el fin de reducir el riesgo.

El IG-EPN tiene el mandato oficial de producir evaluaciones de la amenaza a corto plazo relacionada con sismos y erupciones volcánicas (Ramon et al. 2021; Hidalgo et al. 2023). Para el caso de Quito, estas evaluaciones incluyen cualquier fuente que genere sismos que sean sentidos en la ciudad, así como los volcanes activos vecinos a Quito cuya actividad pueda generar algún impacto, es decir el Guagua Pichincha, Atacazo-Ninahuilca, Pululahua, Cotopaxi, Reventador y Cayambe.⁵ Con respecto a los movimientos en masa,

⁴ Para ver ejemplos, revisar los sitios web de Smithsonian Institution, World Organization of Volcano Observatories (WOVO).

⁵ Los informes periódicos correspondientes a la evaluación (monitoreo) de las amenazas sísmicas y volcánicas a corto plazo pueden ser revisados en el sitio web del IG-EPN: www.igeprn.edu.ec, así como a través de las redes sociales de mayor uso.

el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), en conjunto con el MDMQ, se encuentran implementando un proyecto para la investigación de estos fenómenos y la generación de un sistema de alerta temprana para la ciudad.

Conclusiones

La evaluación de los peligros geológicos en Quito se ha desarrollado de manera consistente durante las últimas cuatro décadas, bajo el marco conceptual de la Tectónica de Placas. Estos estudios han incluido los sismos, las erupciones volcánicas y los movimientos en masa, y han seguido las principales tendencias internacionales en esos sujetos de investigación. En la actualidad, la evaluación de los peligros geológicos se realiza desde dos perspectivas temporales: a largo plazo, con el objetivo de apoyar la planificación y el desarrollo territorial, y a corto plazo, con el objetivo de apoyar la respuesta a emergencias.

La evaluación de los peligros geológicos a largo plazo ha producido diferentes tipos de información, en particular los mapas donde se muestra la zonificación de las amenazas que pueden impactar a Quito. Para su elaboración se han utilizado enfoques determinísticos y probabilísticos. Los mapas más antiguos corresponden a los peligros volcánicos, publicados desde los años ochenta, que tienen zonificaciones determinísticas, mientras que los más recientes incluyen al menos un análisis probabilístico parcial, si bien existen mapas formalmente probabilísticos que contienen cuantificaciones de la incertidumbre. En el futuro se espera afinar la resolución de los mapas, así como su formato de presentación.

La evaluación del peligro sísmico y volcánico a corto plazo (vigilancia y monitoreo de las amenazas) se ha venido realizando desde hace varias décadas y se encuentra oficialmente establecido como una de las actividades del IG-EPN. La evaluación del peligro por movimientos en masa a corto plazo se encuentra en un estado inicial, con la identificación de las zonas prioritarias y el establecimiento de una red de monitoreo instrumental.

En general, la evaluación de los peligros geológicos debería realizarse dentro de un marco de gestión y reducción del riesgo de desastres. Para ello, es necesario que los cálculos de peligro se orienten a ser conjugados de manera adecuada con las medidas de vulnerabilidades físicas y socioeconómicas, con el fin de producir estimaciones de impacto útiles para la toma de decisiones. Es de esperarse que ese proceso sea coordinado por el Municipio de Quito, con el apoyo de la Secretaría de Gestión de Riesgos, bajo un enfoque de desarrollo sustentable, inclusivo y justo.

- Alfonso-Naya, V., Françoise Courboulex, Fabián Bonilla, Mario C. Ruiz y Martin Vallée. 2012. "A Large Earthquake in Quito (Ecuador): Ground Motion Simulations and Site Effects". *5th World Conf. on Earthquake Engineering* 4475: 10. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_4475.pdf
- Allègre, C. J., E. Lewin y B. Dupré. 1988. "A coherent crust-mantle model for the uranium-thorium-lead isotopic system". *Chemical Geology* 70: 211-34. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90094-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90094-0)
- Alvarado, A., L. Audin, J. M. Nocquet, E. Jaillard, P. Mothes, P. Jarrín, M. Segovia, F. Rolandone y D. Cisneros. 2016. "Partitioning of Oblique Convergence in the Northern Andes Subduction Zone: Migration History and the Present-Day Boundary of the North Andean Sliver in Ecuador". *Tectonics* 35 (5): 1048-65. <https://doi.org/10.1002/2016TC004117>
- Alvarado, A., L. Audin, J. M. Nocquet, S. Lagreulet, M. Segovia, Y. Font, G. Lamarque, et al. 2014. "Active Tectonics in Quito, Ecuador, Assessed by Geomorphological Studies, GPS Data, and Crustal Seismicity". *Tectonics* 33 (2): 67-83. <https://doi.org/10.1002/2012TC003224>
- Alvarado, Alexandra, Mario Ruiz, Patricia Mothes, Hugo Yepes, Mónica Segovia, Mayra Vaca, Cristina Ramos, et al. 2018. "Seismic, Volcanic, and Geodetic Networks in Ecuador: Building Capacity for Monitoring and Research". *Seismological Research Letters* 89 (2A): 432-39. <https://doi.org/10.1785/0220170229>
- Alvarado, Alexandra. 2012. "Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur". Phdthesis, Université de Grenoble. <https://theses.hal.science/tel-00870332>
- Anderson, M. G., y S. Howes. 1985. "Development and application of a combined soil water-slope stability model". *Quarterly Journal of Engineering Geology* 18 (3): 225-36. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1985.018.03.04>
- Andrade, S. Daniel, Anais Vásquez Müller, Francisco J. Vasquez, Bernardo Beate, Jorge Aguilar y Santiago Santamaría. 2021. "Pululahua dome complex, Ecuador: eruptive history, total magma output and potential hazards". *Journal of South American Earth Sciences* 106 (marzo): 103046. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103046>
- Bablon, Mathilde, Xavier Quidelleur, Pablo Samaniego, Jean-Luc Le Pennec, Laurence Audin, Hervé Jomard, Stéphane Baize, Céline Liorzou, Silvana Hidalgo y Alexandra Alvarado. 2019. "Interactions between volcanism and geodynamics in the southern termination of the Ecuadorian arc". *Tectonophysics* 751 (enero): 54-72. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.12.010>

- Bablon, Mathilde, Xavier Quidelleur, Pablo Samaniego, Jean-Luc Le Pennec, Santiago Santamaría, Céline Liorzou, Silvana Hidalgo y Bastien Eschbach. 2020. "Volcanic History Reconstruction in Northern Ecuador: Insights for Eruptive and Erosion Rates on the Whole Ecuadorian Arc". *Bulletin of Volcanology* 82 (1): 11. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1346-1>
- Baize, Stéphane, Laurence Audin, Alexandra Alvarado, Hervé Jomard, Mathilde Bablon, Johann Champenois, Pedro Espin, Pablo Samaniego, Xavier Quidelleur y Jean-Luc Le Pennec. 2020. "Active Tectonics and Earthquake Geology Along the Pallatanga Fault, Central Andes of Ecuador". *Frontiers in Earth Science* 8 (junio): 193. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00193>
- Baker, Jack, Brendon Bradley y Peter Stafford. 2021. *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108425056>
- Barberi, F., M. Coltelli, G. Ferrara, F. Innocenti, J. M. Navarro y R. Santacroce. 1988. "Plio-Quaternary volcanism in Ecuador". *Geological Magazine* 125: 1-14. doi:10.1017/S0016756800009328
- 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)
- Beauval, C., J. Marinière, H. Yepes, L. Audin, J. M. Nocquet, A. Alvarado, S. Baize, J. Aguilar, J. C. Singaicho y H. Jomard. 2018. "A New Seismic Hazard Model for Ecuador". *Bulletin of the Seismological Society of America* 108 (3A): 1443-64. <https://doi.org/10.1785/0120170259>
- Beauval, Céline, Hugo Yepes, Laurence Audin, Alexandra Alvarado, Jean-Mathieu Nocquet, Damiano Monelli y Laurentiu Danciu. 2014. "Probabilistic Seismic-Hazard Assessment in Quito, Estimates and Uncertainties". *Seismological Research Letters* 85 (6): 1316-27. <https://doi.org/10.1785/0220140036>
- Beauval, Céline, Hugo Yepes, Pablo Palacios, Monica Segovia, Alexandra Alvarado, Yvonne Font, Jorge Aguilar, Liliana Troncoso y Sandro Vaca. 2013. "An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador". *Bulletin of the Seismological Society of America* 103 (2A): 773-86. <https://doi.org/10.1785/0120120270>
- Beauval, Céline, Hugo Yepes, William H. Bakun, José Egred, Alexandra Alvarado y Juan Carlos Singaicho. 2010. "Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996)". *Geophysical Journal International* 181 (3): 1613-33. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04569.x>

- Bercovici, David. 1998. "Generation of plate tectonics from lithosphere-mantle flow and void-volatile self-lubrication". *Earth and Planetary Science Letters* 154: 139-51.
- 2003. "The generation of plate tectonics from mantle convection". *Earth and Planetary Science Letters* 205 (3): 107-21. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01009-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01009-9)
- Bourdon, Erwan, Jean-Philippe Eissen, Joseph Cotten, Michel Monzier, Claude Robin y Minard L. Hall. 1999. "Les laves calco-alkalines et à caractère adakitique du volcan Antisana (Equateur) Hypothèse pétrogénétique". *Académie des Sciences* 328: 443-49. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(99\)80144-X](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(99)80144-X)
- Bourquin, Julie, Pablo Samaniego, Patricio Ramon, C. Bonadonna, Karim Kelfoun, S. Vallejo Vargas, Minard L. Hall, Patricia A. Mothes, Jean-Luc Le Pennec y Hugo Yepes. 2011. "Mapas de los Peligros Potenciales del Volcán Reventador". Quito.
- Bulusu, Jayashree, Kusumita Arora, Shubham Singh y Anusha Edara. 2023. "Simultaneous Electric, Magnetic and ULF Anomalies Associated with Moderate Earthquakes in Kumaun Himalaya". *Natural Hazards* 116 (3): 3925-55. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05844-y>
- Chase, Robert E., Kishor S. Jaiswal, Alejandro Calderon, Hugo Yepes, Loren Goddard y Catalina Yepes-Estrada. 2023. "Earthquake Scenarios for Quito, Ecuador; Cali, Colombia; and Santiago De Los Caballeros, Dominican Republic". *Seismological Research Letters* 94 (5): 2360-72. <https://doi.org/10.1785/0220220249>
- Chatelain, J. L., B. Tucker, B. Guillier, F. Kaneko, H. Yepes, J. Fernandez, J. Valverde, et al. 1999. "Earthquake Risk Management Pilot Project in Quito, Ecuador". *Geological Journal* 49 (2): 185-96. <https://doi.org/10.1023/A:1007079403225>
- Courboux, Françoise, David Alejandro Castro-Cruz, Aurore Laurendeau, Luis Fabian Bonilla, Alexandra Alvarado y Etienne Bertrand. 2022. "Ground Motion Simulations in Quito (Ecuador) Due to Major Earthquakes from the Subduction Zone". *Geophysical Journal International* 229 (3): 2192-2208. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac044>
- Del Pino, Inés, y Hugo Yepes. 1990. "Apuntes para una historia sísmica de Quito. Centro Histórico de Quito. Problemática y perspectivas". Quito: Dirección de Planificación, Ilustre Municipio de Quito.
- Egholm, David L., Mads F. Knudsen y Mike Sandiford. 2013. "Lifespan of Mountain Ranges Scaled by Feedbacks between Landsliding and Erosion by Rivers". *Nature* 498 (7455): 475-78. <https://doi.org/10.1038/nature12218>
- Ego, Frédéric, Michel Sébrier, Alain Lavenu, Hugo Yepes y Arturo Egues. 1996. "Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes". *Tectonophysics, Geodynamics of The Andes* 259 (1): 101-16. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00075-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00075-5)

- Egred, José. 2009. "Terremotos del Ecuador". Vol. 2. Escuela Politécnica Nacional, Instituto Geofísico. Reporte interno.
- Espinosa, T. 2022. "Estudio de los movimientos en masa como eventos morfoclimáticos en el periodo 1900 a 2020 sector norte del Distrito Metropolitano de Quito". Tesis de licenciatura.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22841>
- Estacio, Jairo, y Gabriela Rodríguez. 2012. "Los eventos morfoclimáticos en el DMQ: Una construcción social y recurrente". *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales* 11: 73-99.
<https://doi.org/10.17141/letrasverdes.11.2012.917>
- Fiorini, Emilia, y Alessandro Tibaldi. 2012. "Quaternary Tectonics in the Central Interandean Valley, Ecuador: Fault-Propagation Folds, Transfer Faults and the Cotopaxi Volcano". *Global and Planetary Change* 90-91 (junio): 87-103. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.002>
- Freymueller, Jeffrey T., James N. Kellogg y Victor Vega. 1993. "Plate motions in the north Andean region". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 98 (B12): 21853-63. <https://doi.org/10.1029/93JB00520>
- Guéguen, P., J. L. Chatelain, B. Guillier y H. Yepes. 2000. "An indication of the soil topmost layer response in Quito (Ecuador) using noise H/V spectral ratio". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19 (2): 127-33.
[https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(99\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(99)00035-4)
- Gutiérrez Elorza, Mateo. 2008. *Geomorfología*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Gutscher, M. A., J. Malavieille, S. Lallemand y J. Y. Collot. 1999. "Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision". *Earth and Planetary Science Letters* 168 (3): 255-70.
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00060-6)
- Hall, M. L., y C. A. Wood. 1985. "Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes". *Geology* 13 (3): 203-7.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13<203:VSOTNA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<203:VSOTNA>2.0.CO;2)
- Hall, Minard L., y Christa von Hillebrandt. 1988a. "Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Pululahua, Provincia de Pichincha". Quito: IG-EPN.
- 1988b. "Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Guagua Pichincha, Provincia de Pichincha". Quito: IG-EPN, Proyecto UNDRO-USAID-EPN.
- 1988c. "Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Cotopaxi, zona norte". Quito: IG-EPN, Proyecto UNDRO-USAID-EPN.
- Hall, Minard L., y Christa von Hillebrandt. 1988d. "Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Cotopaxi, zona sur". Quito: IG-EPN, Proyecto UNDRO-USAID-EPN.

- Hall, Minard, y Patricia Mothes. 2007. "The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador". *Bulletin of Volcanology*. 70, 675–702. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0161-2>
- Hall, Minard L., y R. Maruri. 1992. "Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Ninahuilca". Quito: IG-EPN, Proyecto UNDRO-USAID-EPN.
- Hall, Minard L., Bernardo Beate y Christa von Hillebrandt. 1989. "Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Antisana". Quito: IG-EPN.
- 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 Norte". Quito: IG-EPN.
- 2004b. "Mapa Regional de los Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Cotopaxi – Zona Sur". Quito: IG-EPN.
- Hall, M. L., P. Samaniego, J. L. Le Pennec y J. B. Johnson. 2008. "Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176 (1): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- Helman, Daniel S. 2020. "Seismic electric signals (SES) and earthquakes: A review of an updated VAN method and competing hypotheses for SES generation and earthquake triggering". *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 302 (mayo): 106484. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106484>
- Hermanns, Reginald L., y Manfred R. Strecker. 1999. "Structural and lithological controls on large Quaternary rock avalanches (sturzstroms) in arid northwestern Argentina". *GSA Bulletin* 111 (6): 934-48. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<0934:SALCOL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<0934:SALCOL>2.3.CO;2)
- Hidalgo, Silvana, Benjamin Bernard, Patricia Mothes, Cristina Ramos, Jorge Aguilar, Daniel Andrade, Pablo Samaniego, et al. 2023. "Hazard Assessment and Monitoring of Ecuadorian Volcanoes: Challenges and Progresses during Four Decades since IG-EPN Foundation". *Bulletin of Volcanology* 86 (1): 4. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01685-6>
- Hidalgo, Silvana, Michel Monzier, Eduardo Almeida, Gilles Chazot, Jean-Philippe Eissen, Johannes van der Plicht y Minard L. Hall. 2008. "Late Pleistocene and Holocene activity of the Atacazo-Ninahuilca Volcanic Complex (Ecuador)". *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Recent and active volcanism in the Ecuadorian Andes* 176 (1): 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.05.017>
- Highland, L., y P. Bobrowsky. 2008. "The landslide handbook: A guide to understanding landslides". *U. S. Geological Survey* 1325: 129.
- Holcombe, Elizabeth A., Mair E. W. Beesley, Paul J. Vardanega y Rachel Sorbie. 2016. "Urbanisation and Landslides: Hazard Drivers and Better Practices". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 169 (3): 137-44. <https://doi.org/10.1680/jcien.15.00044>

- Hungr, Oldrich, Serge Leroueil y Luciano Picarelli. 2014. "The Varnes Classification of Landslide Types, an Update". *Landslides* 11 (2): 167-94.
<https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- IG-EPN. 1999. "Mapa de peligros volcánicos del volcán Guagua Pichincha, Ecuador". Quito: IG-EPN / DGP-SUIM.
- Jarrin, P., J. M. Nocquet, F. Rolandone, H. Mora-Páez, P. Mothes y D. Cisneros. 2022. "Current Motion and Deformation of the Nazca Plate: New Constraints from GPS Measurements". *Geophysical Journal International* 232 (2): 842-63.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggac353>
- Jarrin, P., J. M. Nocquet, F. Rolandone, L. Audin, H. Mora-Páez, A. Alvarado, P. Mothes, F. Audemard, J. C. Villegas-Lanza y D. Cisneros. 2023. "Continental Block Motion in the Northern Andes from GPS Measurements". *Geophysical Journal International* 235 (2): 1434-64. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad294>
- Jaya, D., y SSG-MDMQ. 2013. "Fotointerpretación para la identificación de fenómenos de inestabilidad de terreno y movimientos en masa relevantes en el Distrito Metropolitano de Quito". Informe técnico. Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- Jiménez Álvaro, E. (2023). Análisis neotectónico y lito-tefroestratigráfico de los grandes movimientos en masa asociados al fallamiento activo de la cuenca intermontana Quito-Guayllabamba, Ecuador (Doctoral dissertation, Universität Potsdam). <https://doi.org/10.25932/publishup-62220>
- Keefer, David K. 1984. "Landslides caused by earthquakes". *GSA Bulletin* 95 (4): 406-21. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<406:LC-BE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<406:LC-BE>2.0.CO;2)
- Kramer, Steven Lawrence. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Laurendeau, Aurore, Françoise Courboux, Luis Fabian Bonilla, Alexandra Alvarado, Victor Alfonso Naya, Philippe Guéguen, E. Diego Mercerat, et al. 2017. "Low-Frequency Seismic Amplification in the Quito Basin (Ecuador) Revealed by Accelerometric Recordings of the RENAC Network". *Bulletin of the Seismological Society of America* 107 (6): 2917-26.
<https://doi.org/10.1785/0120170134>
- Le Pichon, Xavier. 1968. "Sea-Floor Spreading and Continental Drift". *Journal of Geophysical Research* 73 (12): 3661-97.
<https://doi.org/10.1029/JB073i012p03661>
- McKenzie, D. P., y R. L. Parker. 1967. "The North Pacific: An Example of Tectonics on a Sphere". *Nature* 216 (5122): 1276-80.
<https://doi.org/10.1038/2161276a0>
- Medvedev, S. V., W. Sponheuer y V. Karnik. 1963. "Seismische Scala". *Inst für Bodendynamik und Erdbebenforschung* (Jena): 6.

- Mejía Prieto, Bernardo, Gloria Inés Giraldo Valencia y Lina María Trujillo Gálvez. 2006. "Guardianas de la ladera: un programa de cultura ciudadana en la prevención del riesgo". Taller internacional sobre gestión del riesgo a nivel local: el caso de Manizales, Colombia, Corporación para el desarrollo de Caldas, Manizales.
- Metzger, Pascale, y Pierre Peltre. 1996. "Gestion de l'environnement urbain et risques 'naturels': la problématique des Quebradas à Quito (Equateur)". *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 25(3): 531-552.
https://www.persee.fr/doc/bifea_0303-7495_1996_num_25_3_1248
- Miller, C., Donal R. Mullineaux y Minard L. Hall. 1978. "Mapa de reconocimientos de Riesgos Volcánicos Potenciales del Volcán Cotopaxi, Ecuador". Department of the Interior, United States Geological Survey.
- Minster, J. Bernard, y Thomas H. Jordan. 1978. "Present-Day Plate Motions". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 83 (B11): 5331-54.
<https://doi.org/10.1029/JB083iB11p05331>
- Morgan, W. Jason. 1968. "Rises, Trenches, Great Faults, and Crustal Blocks". *Journal of Geophysical Research* 73 (6): 1959-82.
<https://doi.org/10.1029/JB073i006p01959>
- Mothes, Patricia, Edwin Telenchana, Marco D. Córdova, Pedro Espín Bedón, Benjamin Bernard, Silvia Vallejo Vargas, Antonio Proaño, et al. 2019. "Mapa de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Guagua Pichincha". Quito: IG-EPN / IGM / IRD.
- Mothes, Patricia, Minard L. Hall y Richard J. Janda. 1998. "The Enormous Chilllos 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, Minard L. Hall, Daniel Andrade, Pablo Samaniego, Thomas C. Pierson, A. Gorki Ruiz y Hugo Yepes. 2004. "Character, Stratigraphy and Magnitude of Historical Lahars of Cotopaxi Volcano (Ecuador)". *Acta Vulcanológica* 16 (1-2): 85-108.
- Mothes, Patricia, Pedro Espín Bedón, Minard L. Hall, Francisco Vásquez, Daniel Sierra, Marco D. Córdova y Santiago Santamaría. 2016a. "Mapa Regional de Amenazas Volcánicas Potenciales del Volcán Cotopaxi - Zona Sur". Quito: IG-EPN.
- Mothes, Patricia, Pedro Espín Bedón, Minard L. Hall, Francisco Vásquez, Daniel Sierra y Daniel Andrade. 2016b. "Mapa Regional de Amenazas Volcánicas Potenciales del Volcán Cotopaxi - Zona Norte". Quito: IG-EPN.
- Municipio de Quito. 2015. "Actualización de la zonificación por amenaza de deslizamientos en el Distrito Metropolitano de Quito". Informe técnico de consultoría.

- Nocquet, J. M., P. Jarrin, M. Vallée, P. A. Mothes, R. Grandin, F. Rolandone, B. Delouis, et al. 2017. "Supercycle at the Ecuadorian Subduction Zone Revealed after the 2016 Pedernales Earthquake". *Nature Geoscience* 10 (2): 145-49. <https://doi.org/10.1038/ngeo2864>
- Pacheco, D., E. D. Mercerat, F. Courboulex, L. F. Bonilla, A. Laurendeau y A. Alvarado. 2022. "Profiling the Quito basin (Ecuador) using seismic ambient noise". *Geophysical Journal International* 228 (2): 1419-37. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab408>
- Pacheco, Daniel, S. Daniel Andrade y Alexandra Alvarado. 2014. "Estratigrafía Cuaternaria de la Cuenca San Antonio de Pichincha". *Revista Politécnica* 33 (3): 1-9.
- Peltre, Pierre. 1989. "Quebradas y riesgos naturales en Quito, período 1900-1988". En *Riesgos Naturales en Quito. Lahares, aluviones y derrumbes del Pichincha y del Cotopaxi*. Vol. 2 de *Estudios de Geografía*, 45-90. Quito: Corporación Editora Nacional.
- Pennington, Wayne D. 1981. "Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonics of Northwestern South America". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 86 (B11): 10753-70. <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10753>
- 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): 1193-1215. <https://doi.org/10.1130/B30301.1>
- Puente-Sotomayor, Fernando, Ahmed Mustafa y Jacques Teller. 2021. "Landslide Susceptibility Mapping of Urban Areas: Logistic Regression and Sensitivity Analysis applied to Quito, Ecuador". *Geoenvironmental Disasters* 8 (1): 19. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00184-0>
- Ramon, Patricio, Silvia Vallejo, Patricia Mothes, Daniel Andrade, Francisco Vásquez, Hugo Yepes, Silvana Hidalgo y Santiago Santamaría. 2021. "Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, the Ecuadorian Seismology and Volcanology Service". *Volcanica* 4 (S1): 93-112. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.93112>
- Robalino, M., y M. Pullas. 2018. "Zonificación de la Susceptibilidad por Fenómenos de Remoción en Masa en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)". Tesis de licenciatura. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19790>
- Robin, C., M. Hall, M. Jimenez, M. Monzier y P. Escobar. 1997. "Mojanda volcanic complex (Ecuador): development of two adjacent contemporaneous volcanoes with contrasting eruptive styles and magmatic suites". *Journal of South American Earth Sciences* 10 (5): 345-59. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(97\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(97)00030-8)

- Robin, Claude, Jean-Philippe Eissen, Pablo Samaniego, Hervé Martin, Minard Hall y Joseph Cotten. 2009. "Evolution of the late Pleistocene Mojanda-Fuya Fuya volcanic complex (Ecuador), by progressive adakitic involvement in mantle magma sources". *Bulletin of Volcanology* 71 (3): 233-58.
<https://doi.org/10.1007/s00445-008-0219-9>
- Robin, Claude, Pablo Samaniego, Jean-Luc Le Pennec, Michel Fornari, Patricia Mothes y Johannes van der Plicht. 2010. "New Radiometric and Petrological Constraints on the Evolution of the Pichincha Volcanic Complex (Ecuador)". *Bulletin of Volcanology* 72 (9): 1109-29.
<https://doi.org/10.1007/s00445-010-0389-0>
- Robin, Claude, Pablo Samaniego, Jean-Luc Le Pennec, Patricia Mothes y Johannes van der Plicht. 2008. "Late Holocene phases of dome growth and Plinian activity at Guagua Pichincha volcano (Ecuador)". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176 (1): 7-15.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.10.008>
- Salcedo, Daniela, Oswaldo Padilla Almeida, Byron Morales y Theofilos Toulkeridis. 2018. "Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy Logic and Multi-Criteria Evaluation Techniques in the City of Quito, Ecuador". *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* (julio): 1-33.
<https://doi.org/10.5194/nhess-2018-86>
- Salgado Loza, Josué A., Marco D. Córdova, P. A. Mothes, P. Espín Bedón, S. Vallejo Vargas, Jorge Aguilar, H. E. Gaunt, et al. 2022. "Mapa de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Sumaco". Quito: IG-EPN.
- Samaniego, P., M. Monzier, C. Robin y M. L. Hall. 1998. "Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador". *Bulletin of Volcanology* 59: 451-59.
- Samaniego, Pablo, Jean-Philippe Eissen, Jean-Luc Le Pennec, Claude Robin, Minard L. Hall, Patricia Mothes, Deborah Chavrit y Joseph Cotten. 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): 82-93.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.004>
- Samaniego, Pablo, Michel Monzier, Claude Robin, Jean-Philippe Eissen, Minard L. Hall, Patricia A. Mothes y Hugo A. Yepes. 2002. "Mapa de los peligros potenciales del volcán Cayambe." Quito: IG-EPN / IRD.
- Suárez, J. 2009. *Análisis Geotécnico*. Vol. 1 de *Deslizamientos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Tadini, A., N. Azzaoui, O. Roche, P. Samaniego, B. Bernard, A. Bevilacqua, S. Hidalgo, A. Guillin y M. Gouhier. 2022. "Tephra Fallout Probabilistic Hazard Maps for Cotopaxi and Guagua Pichincha Volcanoes (Ecuador) With Uncertainty Quantification". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 127 (2): e2021JB022780. <https://doi.org/10.1029/2021JB022780>

- Tadini, Alessandro, Olivier Roche, Pablo Samaniego, Nourddine Azzaoui, Andrea Bevilacqua, Arnaud Guillin, Mathieu Gouhier, et al. 2021. "Eruption Type Probability and Eruption Source Parameters at Cotopaxi and Guagua Pichincha Volcanoes (Ecuador) with Uncertainty Quantification". *Bulletin of Volcanology* 83 (5): 35. <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01458-z>
- Taipe Singo, Raquel Priscila. 2022. "Estudio de los movimientos en masa como eventos morfoclimáticos en periodo 1900 a 2020. Zona Sur del Distrito Metropolitano de Quito". Tesis de ingeniería, EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22840>
- Tibaldi, Alessandro, y Luca Ferrari. 1992. "Latest Pleistocene-Holocene tectonics of the Ecuadorian Andes". *Tectonophysics* 205 (1): 109-25. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90421-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90421-2)
- Trenkamp, Robert, James N. Kellogg, Jeffrey T. Freymueller y Hector P. Mora. 2002. "Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations". *Journal of South American Earth Sciences* 15 (2): 157-71. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00018-4)
- Vaca, Sandro, Martin Vallée, Jean-Mathieu Nocquet y Alexandra Alvarado. 2019. "Active deformation in Ecuador enlightened by a new waveform-based catalog of earthquake focal mechanisms". *Journal of South American Earth Sciences* 93 (agosto): 449-61. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.05.017>
- Vásconez, Francisco, Daniel Sierra, Marco Almeida, Daniel Andrade, José M. Marrero, Patricia A. Mothes, Benjamin Bernard y Marjorie Encalada. 2017. "Mapa preliminar de amenazas potenciales del volcán Cotopaxi - zona oriental". Quito: IG-EPN / SGR.
- Villacís, Carlos, Brian Tucker, Hugo Yepes, Fumio Kaneko y J. L. Chatelain. 1997. "Use of seismic microzoning for risk management in Quito, Ecuador". *Engineering Geology* 46 (1): 63-70. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00086-5)
- Volentik, A. C. M., C. Bonadonna, C. B. Connor, L. J. Connor y M. Rosi. 2010. "Modeling tephra dispersal in absence of wind: Insights from the climactic phase of the 2450 BP Plinian eruption of Pululagua volcano (Ecuador)". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 193 (1-2): 117-36. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.03.01>
- Wilson, John Tuzo. 1976. *Continents adrift and continents aground*. Scientific American (W.H. Freeman)
- Winter, Thierry, Jean-Philippe Avouac y Alain Lavenu. 1993. "Late Quaternary Kinematics of the Pallatanga Strike-Slip Fault (Central Ecuador) from Topographic Measurements of Displaced Morphological Features". *Geophysical Journal International* 115 (3): 905-20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb01500.x>

- Yepes, Hugo, Jean-Mathieu Nocquet, Benjamin Bernard, Pablo B. Palacios, Sandro Vaca y Santiago Aguaiza. 2020. "Comments on the Paper 'Two Independent Real-Time Precursors of the 7.8 M Earthquake in Ecuador Based on Radioactive and Geodetic Processes. Powerful Tools for an Early Warning System' by Toulkeridis et al. (2019)". *Journal of Geodynamics* 133 (January): 101648. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.101648>
- Yepes, Hugo, Laurence Audin, Alexandra Alvarado, Céline Beauval, Jorge Aguilar, Yvonne Font y Fabrice Cotton. 2016. "A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment". *Tectonics* 35 (5): 1249-79. <https://doi.org/10.1002/2015TC003941>
- Yoshimoto, Masahiro, Hiroyuki Kumagai, Wilson Acero, Gabriela Ponce, Freddy Vásquez, Santiago Arrais, Mario Ruiz, et al. 2017. "Depth-Dependent Rupture Mode along the Ecuador-Colombia Subduction Zone". *Geophysical Research Letters* 44 (5): 2203-10. <https://doi.org/10.1002/2016GL071929>
- Zapata, C., E. A. Holcombe, P. J. Vardanega y E. Jiménez. 2023. "Modelling the Effect of Hydraulic Conductivity Variability on Slope Stability Calculations for a Site in South-East Quito, Ecuador". En *Proceedings of the 17th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering*, 773-80. Politehnium Publishing House. <https://bit.ly/4c00lLn>
- Zapata, M. C. 2018. *Assessment of earthquake-induced landslides hazard in Quito, Ecuador*. Universidad EAFIT.