

Los peligros volcánicos  
asociados con el

# Atacazo-Ninahuilca y Pululahua

Daniel Andrade  
Silvana Hidalgo  
Michel Monzier  
Jean-Philippe Eissen  
Bernardo Beate



**IG**  
INSTITUTO GEOFÍSICO  
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**IRD**  
INSTITUT DE RECHERCHE

**Serie**

Los peligros  
volcánicos en Ecuador

  
CORPORACIÓN  
EDITORIA NACIONAL

**5**

Los  
**PELIGROS  
VOLCÁNICOS**

---

asociados con el

**Atacazo-  
Ninahuilca  
y Pululahua**

## **IRD**

---

L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD; Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) es un establecimiento público de carácter científico y tecnológico, auspiciado por los ministerios de Investigación y Cooperación de Francia.

El IRD realiza investigaciones conjuntamente con otras instituciones francesas, europeas e internacionales, siempre en cooperación con organismos asociados en la zona intertropical, en África, América Latina, Asia y en los océanos Índico y Pacífico.

El IRD tiene una representación en el Ecuador desde 1974, y cuenta con una tradición importante de investigación en el Ecuador, en varios campos. Actualmente, investigadores de tres departamentos científicos del IRD trabajan en Ecuador.

El departamento Medios y Entornos desarrolla investigaciones sobre la variabilidad climática tropical, las interacciones entre el océano y la atmósfera, los medios litorales y terrestres y los recursos hídricos, los riesgos naturales, los recursos minerales y el impacto de las actividades humanas en el medioambiente.

El departamento Recursos Vivos se dedica al estudio de la biodiversidad, de los ecosistemas acuáticos y de los agrosistemas tropicales, con el fin de garantizar la variabilidad de su explotación mediante un manejo apropiado.

El departamento Sociedad y Salud realiza programas de investigación sobre la salud, las cuestiones urbanas, las dimensiones económicas, sociales y culturales del desarrollo y sobre el estado de las ciencias en el África.

## **Instituto Geofísico / Departamento de Geofísica Escuela Politécnica Nacional**

---

El Instituto Geofísico/Departamento de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional constituye el primer centro de investigación sísmica y volcánica existente en el país. A partir de enero de 2003, mediante decreto presidencial, tiene a cargo en forma oficial el diagnóstico y vigilancia de los peligros sísmicos y volcánicos en todo el territorio nacional y a la vez la comunicación oportuna de estos fenómenos.

Conjuntamente con el diagnóstico de la amenaza, el Instituto Geofísico mantiene un activo programa de monitoreo instrumental en tiempo real, que asegura la vigilancia científica permanente sobre volcanes activos y fallas tectónicas en el territorio nacional. Una serie de publicaciones tanto científicas como de divulgación general a nivel nacional e internacional, dan fe de la capacidad y mística de trabajo de los científicos y técnicos que conforman el Instituto.

A lo largo de su corta vida, el Instituto Geofísico se ha hecho acreedor a importantes premios y reconocimientos, a nivel local e internacional, por su trabajo en el diagnóstico y prevención de los desastres naturales. En 1992, el Premio SASAKAWA, otorgado por las Naciones Unidas, y varios reconocimientos y condecoraciones por parte del Ilustre Municipio de Quito (1999), del Honorable Congreso Nacional (2000) y del Gobierno de la Provincia de Pichincha (2003).

**Serie:**  
Los peligros volcánicos  
en el Ecuador

# Los PELIGROS VOLCÁNICOS

5

asociados con los  
volcanes

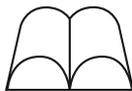
# Atacazo- Ninahuilca y Pululahua



INSTITUTO GEOFÍSICO DE LA ESCUELA  
POLITÉCNICA NACIONAL



INSTITUT DE RECHERCHE  
POUR LE DÉVELOPPEMENT



CORPORACIÓN  
EDITORIA NACIONAL

**Daniel Andrade**  
**Silvana Hidalgo**  
**Michel Monzier**  
**Jean-Philippe Eissen**  
**Bernardo Beate**

Junio 2012  
Quito, Ecuador

**Serie:**  
**Los peligros**  
**volcánicos**  
**en el Ecuador**  
**5**

## **Los peligros volcánicos asociados con el Atacazo-Ninahuilca y Pululahua**

**Daniel Andrade,<sup>1, 2</sup> Silvana Hidalgo,<sup>1</sup> Michel Monzier,<sup>3</sup> Jean-Philippe Eissen,<sup>3</sup> Bernardo Beate<sup>2</sup>**

- 1 Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional  
Ladrón de Guevara s/n, apartado postal 17-01-2759,  
Quito, Ecuador
- 2 Departamento de Geología, Escuela Politécnica Nacional  
Ladrón de Guevara s/n, apartado postal 17-01-2759,  
Quito, Ecuador
- 3 Institut de Recherche pour le Développement (IRD),  
UR 163 Laboratoire "Magmas et Volcans", 5 rue Kessler,  
63038 Clermont-Ferrand, Francia

© Corporación Editora Nacional  
ISBN: 978-9978-84-589-9  
Derechos de autor: 038866  
Depósito legal: 004800  
Junio de 2012

Supervisión editorial: Jorge Ortega  
Diagramación: Sonia Hidrobo  
Corrección de textos: Gace Sigüenza  
Cubierta: Raúl Yépez  
Impresión: Ediciones Fausto Reinoso, Av. Rumipamba E1-35 y  
10 de Agosto, of. 203, Quito.

*Foto de la portada:* Fotografía del domo Ninahuilca Chico 2, tomada desde el interior del gran cráter del volcán Atacazo (por M. Monzier, 2003).

*Foto de la contraportada:* Fotografía de los domos Rumiloma y Pondoña, tomada desde el borde Sur del cráter del Pululahua, en el sitio conocido como El Mirador (por D. Andrade, 2005).

Corporación Editora Nacional  
Roca E9-59 y Tamayo, apartado postal 17-12-886,  
Quito, Ecuador, teléfonos: (593 2) 255 4358,  
256 6340, fax: ext. 12,  
cen@cenlibrosecuador.org • www.cenlibrosecuador.org

Para más información, contáctenos:  
Instituto Geofísico de la EPN, Quito, Ecuador  
teléfono: (593 2) 222 5655, fax: (593 2) 256 7847  
geofisico@igepn.edu.ec • www.igepn.edu.ec

Este libro se publica con el apoyo financiero de la DIC (Délégation à l'Information et à la Communication) del IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*-Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo).

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	7
<b>Introducción</b>	9
El complejo Atacazo-Ninahuilca	11
El complejo del Pululahua	12
Resumen de los siguientes capítulos	14
<b>Historia geológica de los volcanes</b>	
<b>Atacazo-Ninahuilca y Pululahua</b>	15
La historia geológica del Atacazo-Ninahuilca	21
La historia geológica del Pululahua	25
Conclusiones	33
<b>Tipos de fenómenos volcánicos</b>	
<b>asociados a las erupciones del</b>	
<b>Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua</b>	35
Sismos volcánicos	35
Deformación de la superficie	36
Gases volcánicos	37
Domos de lava y flujos piroclásticos	
de “bloques y ceniza”	39
Flujos piroclásticos de pómez (ignimbritas)	45
Caídas de ceniza y piroclastos	48
Flujos de lodo y escombros (lahares)	52
Avalanchas de escombros	59
<b>Monitoreo de los volcanes Atacazo-Ninahuilca</b>	
<b>y Pululahua</b>	61
Objetivos del monitoreo	61
Monitoreo visual	63
Monitoreo instrumental	64
El monitoreo volcánico y la comunicación	70

<b>Potenciales escenarios eruptivos futuros</b>	79
Escenario 1: Evento pequeño y poco explosivo (V.E.I. = 1-2)	80
Escenario 2: Evento moderado y explosivo (V.E.I. = 3-4)	81
Escenario 3: Evento grande y muy explosivo (V.E.I. = 5-6)	82
<b>Referencias</b>	85
<b>Glosario</b>	89
<b>Anexos</b>	97
1. Algunos problemas asociados con la caída de ceniza volcánica	97
2. Índice de Explosividad Volcánica (V.E.I., Volcanic Explosivity Index)	103
3. Monitoreo visual de los volcanes ecuatorianos	104
4. El origen del vulcanismo en los Andes del Ecuador	106

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento:

- A la *Délégation à l'Information et à la Communication* (DIC) del Institut de Recherche pour le Développement (IRD-Francia), por el apoyo que ha hecho posible la publicación de este trabajo.
- A la Escuela Politécnica Nacional, por el apoyo a las labores del Instituto Geofísico (IG) y del Departamento de Geología (DG).
- Al IRD (Francia) por el valioso trabajo de cooperación que mantiene con el IG en el campo de la vulcanología, del cual se desprenden los resultados e interpretaciones presentados en la presente obra.
- A la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (SENES-CYT), que ha financiado la instalación de las redes de monitoreo instrumental de los volcanes Ninahuilca y Pululahua, así como los estudios doctorales de Silvana Hidalgo y Daniel Andrade.
- A todos los miembros del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, por su responsable y absoluta dedicación al monitoreo y al mantenimiento de las diferentes redes de vigilancia sísmica y volcánica del Ecuador.



# 1. Introducción

---

Entre octubre de 1998 y enero de 2000, la ciudadanía de Quito estuvo sujeta a una época de crisis debido a la ocurrencia de un período eruptivo en el volcán Guagua Pichincha, vecino de la ciudad. El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), encargado oficial del monitoreo volcánico en el Ecuador, había emitido los primeros informes sobre “actividad anormal” registrada en el Guagua Pichincha desde finales de 1998, con lo cual se dio inicio a un período de cerca de un año durante el cual se hicieron evidentes muchos problemas típicamente relacionados con las crisis volcánicas en todo el mundo. Por ejemplo: la falta de conocimiento de la ciudadanía sobre los peligros potenciales asociados a los volcanes, la falta de experiencia en comunicación con el público de parte de los científicos responsables del monitoreo (IG-EPN), la falta de un plan de contingencia para el Distrito Metropolitano de Quito, el apareamiento de voces científicas alternativas que provocan grandes confusiones en la ciudadanía, la presentación sensacionalista de la crisis por parte de ciertos medios de comunicación, etc. Fue bajo estas condiciones que, a partir del 4 de octubre de 1999 hasta finales de enero de 2000, se sucedieron una serie de explosiones volcánicas de magnitud moderada en el Guagua Pichincha, que provocaron leves caídas de ceniza sobre la ciudad de Quito, las cuales, sin embargo, obligaron a suspender muchas de las actividades cotidianas de la ciudad (comercio, aeropuerto, escuelas, etc.) durante aquellos eventos.

La crisis del Guagua Pichincha nos permitió aprender una lección muy importante para tener éxito en la mitigación del peligro volcánico: **es fundamental que la ciudadanía tenga un conocimiento objetivo de los peligros volcánicos a los cuales está expuesta.** Dicho conocimiento permitiría a la ciudadanía hacer mejores planes de contingencia; comprender más fácilmente los mensajes emitidos por los científicos; y, discriminar y criticar las informaciones y opiniones emitidas por los medios de comunicación o por fuentes científicas alternativas.

La crisis del Guagua Pichincha, sumada a nuestro contacto cotidiano con la población de la capital, así como la experiencia adquirida durante nuestros trabajos de investigación científica, nos han permitido también notar algo preocupante: una parte importante de la población ignora por completo que, además del Guagua Pichincha, existen otros volcanes potencialmente activos que se encuentran en plena vecindad con la ciudad de Quito; dichos volcanes son el complejo Atacazo-Ninahuilca y el complejo del Pululahua.

Estos dos últimos párrafos representan, pues, la motivación principal de la presente obra, en la cual vamos a presentar dos complejos volcánicos jóvenes pero poco reconocidos, sus historias de desarrollo geológico, sus erupciones más importantes y los principales peligros que representan para el Ecuador y en especial para el Distrito Metropolitano de Quito y sus zonas aledañas. Esto con el objetivo fundamental de ofrecer a la ciudadanía la oportunidad de tener un mejor conocimiento de los peligros volcánicos a los cuales está potencialmente expuesta.

## ■ EL COMPLEJO ATACAZO-NINAHUILCA

El complejo del Atacazo-Ninahuilca está localizado a unos 10 km al suroeste del perímetro urbano de Quito, muy próximo a las poblaciones de Tambillo y Alóag. El punto más alto de este complejo corresponde a la cumbre del Atacazo, que tiene 4.455 msnm y está ubicada en las coordenadas 0° 21' S (latitud) y 78° 37' W (longitud) (figs. 1 y 2).

El Atacazo-Ninahuilca es un volcán poco conocido por la ciudadanía. Su edificio principal, llamado Atacazo, es bastante antiguo y puede ser visto claramente desde el sur de Quito, desde donde se destaca por el gran número de antenas de transmisión que se han instalado sobre la línea de su cumbre. La parte más joven y potencialmente activa de este complejo, llamada Ninahuilca, se ubica hacia el suroccidente del Atacazo y está conformada por un grupo de *domos de lava*<sup>1</sup> concentrados al interior de una depresión topográfica de forma rectangular, que cubre una zona de ~20 km<sup>2</sup> (2 mil hectáreas) (fig. 2). Por su ubicación, estos domos han pasado prácticamente desapercibidos por la ciudadanía durante mucho tiempo.

El Atacazo-Ninahuilca está construido sobre la cordillera Occidental de los Andes ecuatorianos, en una zona comprendida entre los 2.600 y 4.400 msnm. Hacia el noreste y este tenemos una zona de páramo, mientras que hacia el oeste y suroeste tenemos las estribaciones de la cordillera Occidental con una vegetación típica de bosque húmedo de altura. Los numerosos drenajes de la zona norte y este del Atacazo-Ninahuilca alimentan al río San Pedro, uno de los afluentes del río

---

1. Los términos que estén escritos en *itálicas* se encuentran definidos en el Glosario de esta obra.

Guayllabamba que fluye al este de Quito. Por otra parte, los drenajes de la zona suroccidental confluyen en la cuenca hidrográfica de los ríos Toachi y Saloya que se dirigen directamente hacia la región costera ecuatoriana (fig. 2).

En las últimas décadas, el sur del Distrito Metropolitano de Quito ha sido ampliamente urbanizado: existen en la actualidad viviendas construidas sobre las faldas mismas del Atacazo, hasta la cota de aproximadamente 3.200 m. Por otro lado, hacia el sur y suroccidente del complejo volcánico está construida la autopista Alóag-Santo Domingo de los Tsáchilas, una de las principales vías que conecta la Sierra centro-norte con la Costa ecuatoriana. Paralelo a esta vía pasa, además, el sistema interconectado de energía eléctrica. Todas estas infraestructuras se encuentran potencialmente amenazadas por el volcán.

## ■ EL COMPLEJO DEL PULULAHUA

El complejo del Pululahua se encuentra localizado a unos 20 km al norte del perímetro urbano de Quito, prácticamente sobre la línea ecuatorial, colindante con las poblaciones de San Antonio de Pichincha, Calacalí y Pomasqui. El punto más alto de este complejo corresponde a la cumbre de la loma Sincholahua, que tiene 3.356 msnm y está ubicada en las coordenadas 0° 2.4' N (latitud) y 78° 27.5' W (longitud) (figs. 1 y 3).

A diferencia de otros volcanes más famosos del Ecuador, el Pululahua no se presenta como una gran montaña de forma cónica, sino que está conformado por varios *domos de lava* dispersos en una superficie de ~40 km<sup>2</sup> (4 mil hectáreas) y por un gran cráter de 4-5 km de diámetro situado entre dichos domos (fig. 3). Estas características han hecho que no se reconozca fácilmente que el Pululahua es un volcán, como ya lo había notado el propio Theodor Wolf (1892) al escribir que “no llama

la atención de lejos, porque su *cráter* ancho y profundo no se halla sobre un cerro alto [...] sino embutido en la cresta de la cordillera”.

En efecto, el Pululahua se encuentra construido sobre la cordillera Occidental del Ecuador, en una región bastante baja, comprendida entre los 2.400 y los 3.300 msnm, donde se produce un contraste climático muy marcado entre la zona seca de San Antonio de Pichincha, al este, y los bosques húmedos de altura que caracterizan la zona occidental del volcán, incluido Nieblí y la reserva Geobotánica del Pululahua. La cuenca hidrográfica a la cual está ligado el Pululahua es la del río Guayllabamba: todos los drenajes del volcán van a dar directa o indirectamente en ese río (fig. 3). Así, el flanco este del Pululahua está drenado por algunas quebradas (Colorada, Portada y Tanlahua) y por el río Monjas; el flanco norte por la quebrada Charhuayacu; el flanco oeste por el río Blanco (que nace al interior del cráter); y el flanco sur por el río Ambuasí (que nace cerca del poblado de Calacalí).

Estas características, sumadas a la cercanía de la Mitad del Mundo, hacen que la zona del Pululahua sea muy turística, con una importante población flotante. A esto debe agregarse que una de las principales vías que conecta el Distrito Metropolitano de Quito con la región costera del Ecuador, la autopista Manuel Córdoba Galarza, bordea todo el flanco sur del Pululahua, entre San Antonio de Pichincha y Calacalí (fig. 3).

Las zonas de San Antonio de Pichincha y de Pomasqui, vecinas al Pululahua, han sido fuertemente urbanizadas en los últimos años, como consecuencia del crecimiento del Distrito Metropolitano de Quito. Esto es fácilmente observable en los resultados de los diferentes censos de población realizados en las últimas décadas que muestran una explosión demográfica

en esta zona durante la última década (INEC, 2011). Este intenso desarrollo urbano sugiere que las potenciales amenazas volcánicas probablemente no se tomaron en cuenta, a pesar de que desde el año 1987 existían mapas que muestran las zonas de peligro potencial en caso de ocurrir erupciones en el Pululahua (Hall y Hillebrandt, 1987) o en el Atacazo (Hall y Hillebrandt, 1988). Esta falta de conocimiento y despreocupación puede ser en parte explicada por el particular desarrollo geológico de estos volcanes, cuyas erupciones más recientes ocurrieron hace más de 2.200 años, lo que tiende a ocultar su naturaleza potencialmente destructiva.

## ■ RESUMEN DE LOS SIGUIENTES CAPÍTULOS

En el segundo capítulo se hará una breve descripción de la “Historia Geológica” de los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua, con el fin de que el lector se haga una idea de los períodos de tiempo (tanto históricos como prehistóricos) que han sido necesarios para el desarrollo de estos volcanes. En el tercer capítulo se hará una presentación detallada de los “fenómenos volcánicos” más importantes asociados a las erupciones del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, donde se incluirán datos cuantitativos así como descripciones de las zonas potencialmente amenazadas. El cuarto capítulo presentará al lector los múltiples “métodos de monitoreo” que están siendo implementados por el Instituto Geofísico para vigilar la actividad de ambos volcanes. A todo lo largo de esta obra veremos que ambos complejos volcánicos comparten muchas semejanzas, desde variados puntos de vista; de hecho, tales semejanzas son una de las razones principales para presentarlos y estudiarlos en conjunto. Por último, en el quinto capítulo se describirán los potenciales “escenarios eruptivos” que podrían presentarse una vez que cualquiera de los dos volcanes entre en erupción.

## 2. Historia geológica de los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua

---

**E**n el planeta Tierra, el desarrollo de un volcán es un proceso que requiere períodos de tiempo que son relativamente grandes para la escala humana: la vida de un volcán puede durar desde pocas semanas hasta varios millones de años. El paisaje y las formas que observamos actualmente en cualquier volcán son la consecuencia de una larga serie de eventos, directa e indirectamente relacionados con el propio volcán. Este es el caso de los complejos del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, lo cuales, como se verá, han estado activos durante decenas de miles de años y están compuestos de varios “edificios” o “grupos” volcánicos; esta es la razón de llamarlos “complejos volcánicos”.

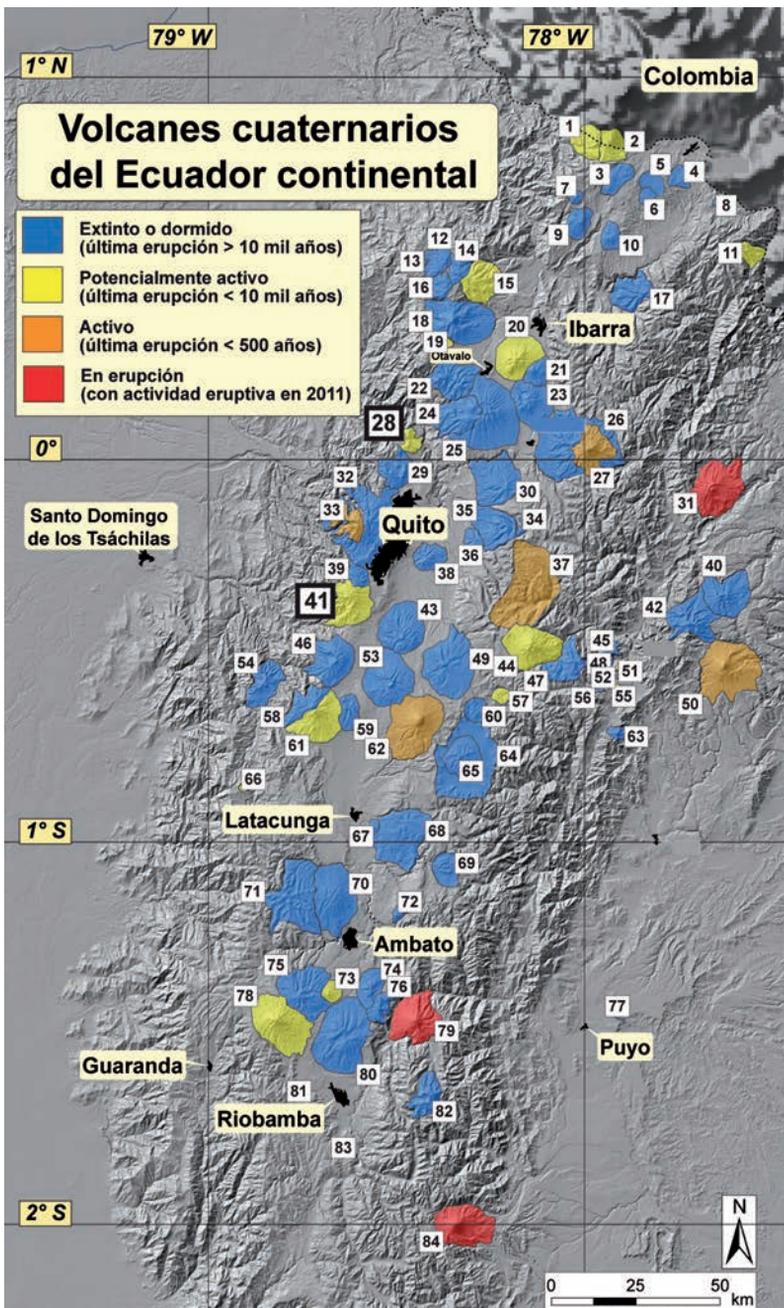
La historia geológica de un volcán puede determinarse al realizar un estudio sistemático de sus formaciones rocosas (depósitos de sus erupciones). Es importante notar que los estudios geológicos proveen informaciones muy valiosas sobre la actividad pasada de un volcán, pero están limitados a los depósitos y formaciones rocosas que no han sido borradas por la erosión. **Es decir que no se puede conocer completamente la actividad pasada de un volcán, ya que muchas evidencias de la misma han sido destruidas por la erosión.** Más aún en el caso de volcanes como el Atacazo-Ninahuilca o el Pululahua, donde ni siquiera las erupciones más recientes han sido registradas por la historia escrita, debido a su antigüedad.

Por su modesto relieve, ni el Atacazo-Ninahuilca ni el Pululahua llamaron la atención de los primeros científicos exploradores que recorrieron el Ecuador; sus respectivas descripciones

son muy sucintas en los trabajos clásicos del siglo XIX, como los de Humboldt (1810), Reiss (1873), Wolf (1892) o Stubel (1897). Incluso durante gran parte del siglo XX no se generan nuevos conocimientos sobre estos volcanes, como se nota en los trabajos de Hans Meyer (1907) o de Augusto Nicolás Martínez (1930). En 1965, Walter Sauer hace las primeras descripciones *petrográficas* de las lavas de ambos volcanes, aunque sin mejorar las breves descripciones morfológicas ya existentes.

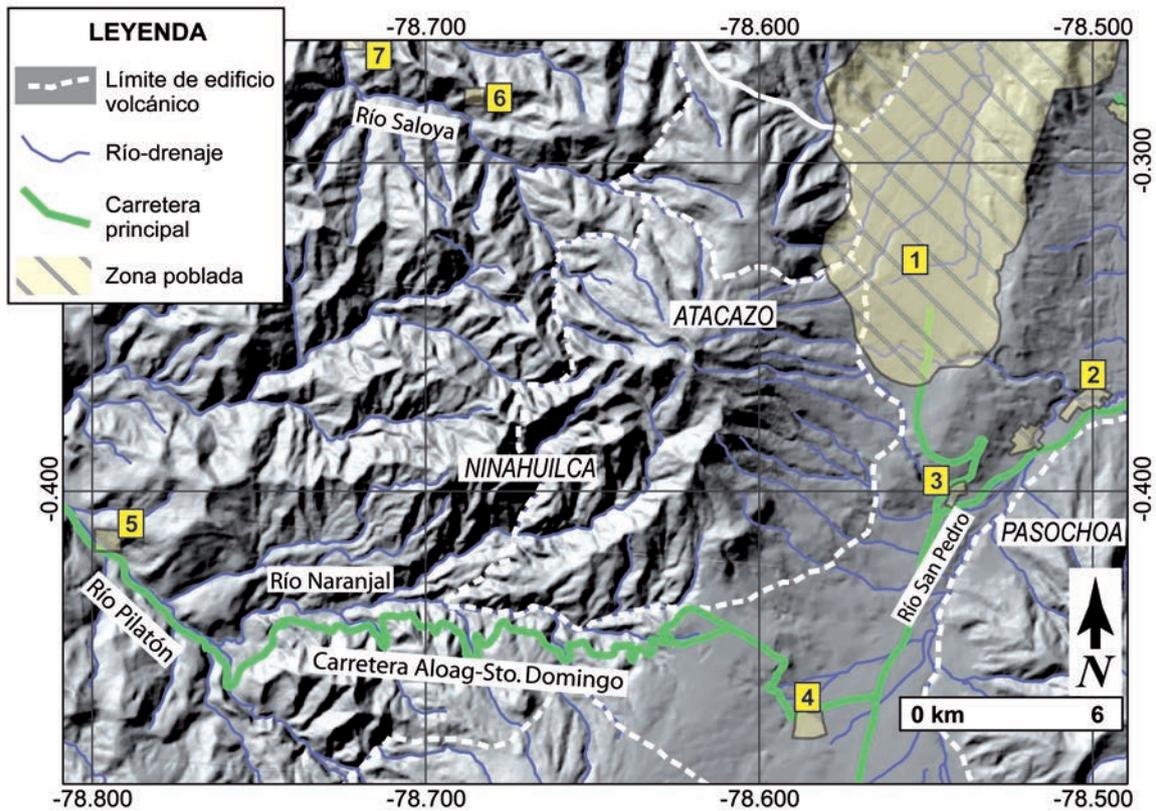
Recién a partir de los años de 1970 se identifica al Atacazo-Ninahuilca y al Pululahua como volcanes potencialmente activos (Hall, 1977), y a partir de los años de 1980 se realizan estudios geológicos formales, basados en conceptos modernos de vulcanología. Los estudios más destacables sobre el Atacazo-Ninahuilca son los de Hall y Hillebrandt (1988), Maruri (1994), Almeida (1996), Hidalgo (2006) e Hidalgo *et al.* (2008), y del Pululahua los de Aguila (1986), Hall y Hillebrandt (1987), Papale y Rosi (1993), Andrade (2002) y Volentik *et al.* (2010).

A continuación presentamos sendos resúmenes de los desarrollos geológicos del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, basados respectivamente en los trabajos de Hidalgo (2006) y Andrade (2002). Presentaremos el desarrollo de cada volcán dividido en dos períodos de tiempo característicos: el período **pre-Holoceno** y el período **Holoceno**. El *Holoceno* es la época más reciente de la división geológica del tiempo y corresponde a los últimos 11.800 años de historia de la Tierra. **Todos los volcanes terrestres que han tenido erupciones durante el Holoceno son considerados como potencialmente activos.**

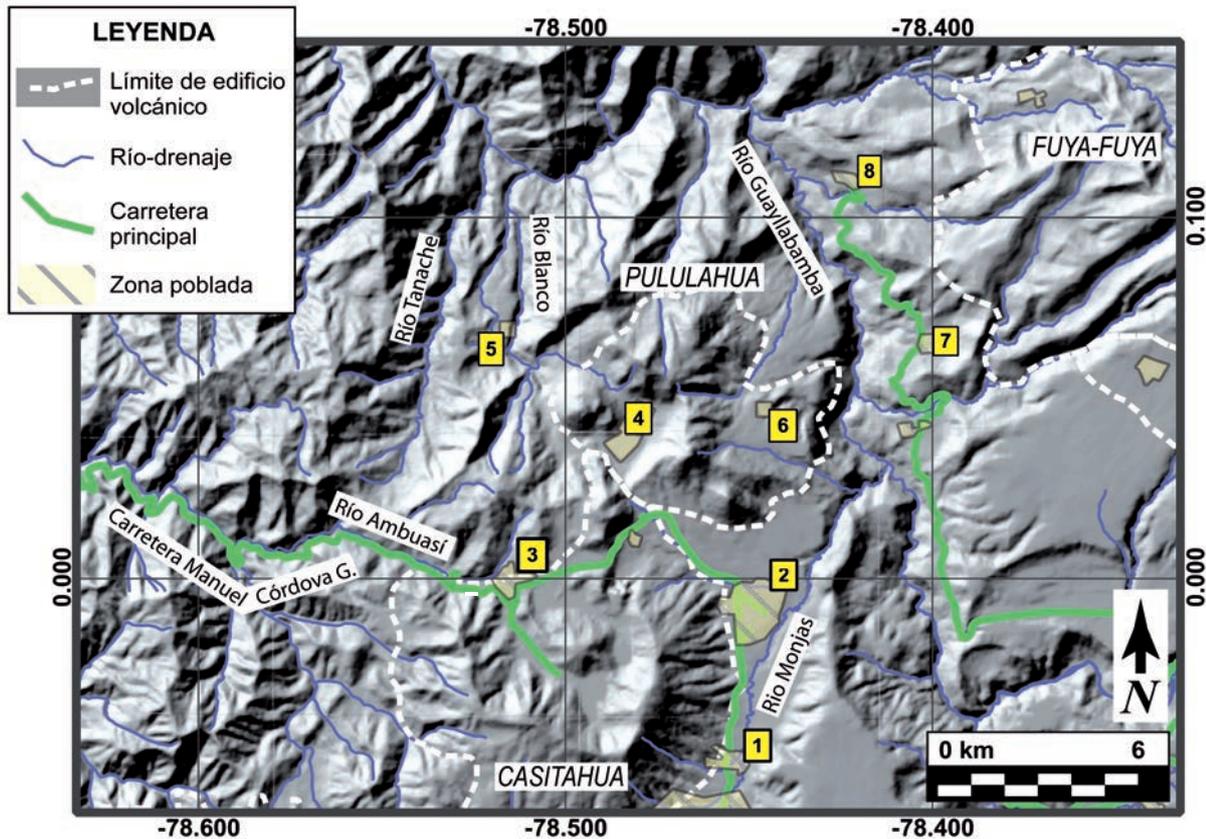


**Figura 1.** Arco volcánico del Ecuador (modificado de Bernard y Andrade, 2011). En los Andes del Ecuador se ha podido identificar más de 80 complejos volcánicos, de los cuales 12 son considerados como volcanes potencialmente activos (con erupciones ocurridas en los últimos 12 mil años), entre los que destacan el Atacazo-Ninahuilca y el Pululahua.

- 1 Cerro Negro
- 2 Chiles
- 3 Potrerillos
- 4 Chulamuez
- 5 Chalpatán
- 6 Horqueta
- 7 Chiltazón
- 8 Virgen Negra
- 9 Iguán
- 10 Chaquilulo
- 11 Soche
- 12 Pilavo
- 13 Parulo
- 14 Yanaurcu de Piñán
- 15 Chachimbiro
- 16 Pulumbura
- 17 Mangus
- 18 Cotacachi
- 19 Cuicocha
- 20 Imbabura
- 21 Cubilche
- 22 Cushnirumi
- 23 Cusín
- 24 Fuya-Fuya
- 25 Mojanda
- 26 Viejo Cayambe
- 27 Nevado Cayambe
- ★ **28 PULULAHUA**
- 29 Casitagua
- 30 Pambamarca
- 31 Reventador
- 32 Rucu Pichincha
- 33 Guagua Pichincha
- 34 Izambi
- 35 Cerro Puntas
- 36 Coturco
- 37 Chacana
- 38 Ilaló
- 39 Carcacha
- 40 Yanaurcu
- ★ **41 ATACAZO-NINAHUILCA**
- 42 Pan de Azúcar
- 43 Pasochoa
- 44 Antisana
- 45 Machángara
- 46 Corazón
- 47 Aliso
- 48 Bermejo
- 49 Sincholagua
- 50 Sumaco
- 51 El Dorado
- 52 Huevos de Chivo
- 53 Rumiñahui
- 54 Almas Santas
- 55 Pumayacu
- 56 Cosanga
- 57 Huañuña
- 58 Iliniza Norte
- 59 Santa Cruz
- 60 Chaupiloma
- 61 Iliniza Sur
- 62 Cotopaxi
- 63 Volcán Azul
- 64 Chalupas
- 65 Quilindaña
- 66 Quilotoa
- 67 Chinibano
- 68 Putzalagua
- 69 Angahuana
- 70 Sagoatoa
- 71 Pilisurco
- 72 Huicutambo
- 73 Puñalica
- 74 Huisla
- 75 Carihuairazo
- 76 Mulmul
- 77 Conos de Puyo
- 78 Chimborazo
- 79 Tungurahua
- 80 Igualata
- 81 Conos de Calpi
- 82 Altar
- 83 Conos de Licto
- 84 Sangay



**Figura 2.** Mapa de la región sur del Distrito Metropolitano de Quito, con la ubicación del volcán Atacazo-Ninahuilca y de los siguientes centros poblados: 1. Quito; 2. Amaguaña; 3. Tambillo; 4. Alóag; 5. Tandapi; 6. El Corazón; 7. Guarumal (Datum del mapa: WGS84).



**Figura 3.** Mapa de la región norte del Distrito Metropolitano de Quito, con la ubicación del volcán Pululahuá y los siguientes centros poblados: 1. Pomasqui; 2. San Antonio de Pichincha; 3. Calacalí; 4. Pululahuá; 5. San José de Nieblí; 6. Tanlahua; 7. Puéllaro; 8. Perucho (Datum del mapa: WGS84).

## ■ LA HISTORIA GEOLÓGICA DEL ATACAZO-NINAHUILCA

### Período pre-Holoceno

El Atacazo-Ninahuilca está conformado por dos edificios de edades pre-holocénicas: La Carcacha y el Atacazo propiamente dicho (fig. 2).

**La Carcacha** es el edificio más antiguo del complejo y está ubicado al NNE (fig. 4). Tiene una forma semicircular, con un diámetro de 4,5 km, y su cumbre alcanza los 3.880 msnm. El edificio presenta un avanzado estado de erosión con formas redondeadas y además está cubierto por una potente capa de *Cangahua*, lo que es concordante con su antigüedad. Las lavas que conforman el núcleo de este edificio son de tipo *andesita*, con dos piroxenos y olivino. Dataciones radiométricas por isótopos de Argón realizadas en dichas lavas han dado una edad media de 1,3 millones de años para la última actividad de este edificio (Hidalgo, 2006).

**El Atacazo** propiamente dicho tiene una forma elíptica, con su eje mayor de 18 km de largo orientado en dirección NE-SO, y su eje menor de 12 km en dirección NO-SE (figs. 4 y 5a). La cumbre de este edificio alcanza los 4.455 msnm y delimita un cráter de 1 km de diámetro, seguramente formado por una fuerte erupción explosiva. El Atacazo es más joven que La Carcacha, y está compuesto por dos tipos principales de formaciones rocosas: 1. sucesiones de coladas de lava *andesítica*, y 2. *domos* de lava *dacítica* aislados (fig. 4). Las sucesiones de lavas más antiguas del Atacazo se encuentran en el flanco sur de edificio y tienen edades de 195 mil a 220 mil años, mientras que las sucesiones de lavas más recientes se encuentran por sobre la cota de 3.200-3.600 msnm y tienen eda-

des de hasta 82 mil años (Hidalgo, 2006). Los domos: La Viudita, Omoturcu, Cusungo, Gallo Cantana y Arenal-I están compuestos de lava *dacítica*, tienen 1-2 km de diámetro y se encuentran distribuidos sobre los flancos y al borde del cráter del Atacazo (fig. 4). La edad del domo La Viudita ha sido estimada en 71 mil años, por Hidalgo (2006) mediante *dataciones radiométricas*. Esta es la edad más joven conocida para el Atacazo.

Estos dos tipos de formaciones rocosas sugieren que la actividad volcánica del Atacazo fue en general poco explosiva. Sin embargo, Almeida (1996) sugirió que, al final de su desarrollo, el Atacazo tuvo al menos una gran erupción explosiva que produjo un depósito de caída de *pómez* que fue denominado “caída N1”; su edad no es conocida pero seguramente sea similar a la edad del domo La Viudita. Luego del evento N1, al parecer la actividad del Atacazo declinó, y no se puede encontrar vestigios de erupciones hasta el inicio del *Holoceno*, cuando empieza a formarse el edificio del Ninahuilca.

## **Período Holoceno**

Este período está representado por la formación de un grupo de cuatro grandes *domos de lava*: La Cocha, Arenal-II, Ninahuilca Chico-I y Ninahuilca Chico-II; este grupo es denominado simplemente “Ninahuilca” y se encuentra dentro de una depresión de forma rectangular, en el flanco occidental del Atacazo (figs. 4 y 5a). A lo largo del Holoceno, la formación de estos domos de lava estuvo acompañada de cinco grandes erupciones explosivas denominadas, desde la más antigua a la más reciente: N2, N3, N4, N5 y N6. En todos los casos, el *magma* erupcionado fue de tipo *dacítico*. Estos eventos depositaron voluminosas capas de caída de *piroclastos* y de flujos

piroclásticos que están bien conservadas en el registro geológico y, por lo tanto, han sido estudiadas con detalle (Almeida, 1996; Hidalgo, 2006). Algunas de las principales características de los depósitos de N2, N3 y N4 se presentan en la tabla 1.

<b>Tabla 1.</b>				
Características principales de los depósitos de caídas de piroclastos asociados a las erupciones Holocénicas N2, N3 y N4 del Ninahuilca.				
<b>Episodio</b>	<b>Edad Años BP</b>	<b>Afloramiento tipo</b>	<b>Espesor</b>	<b>Descripción</b>
<b>N2</b>	>10000	Cerca de las antenas del Atacazo.	36 cm	Pómez color amarillo y naranja oxidadas (2-3 cm) y líticos andesíticos hidrotermalizados. La matriz es ceniza fina compuesta plagioclasa, óxidos de Fe, pómez finas, líticos y vidrio.
<b>N3</b>	7995 ± 245	Cerca de las antenas del Atacazo.	12 cm	Pómez blancas y amarillas (1 cm) y líticos andesíticos hidrotermalizados. La matriz es ceniza fina compuesta por plagioclasas oxidadas, anfíboles y vidrio.
<b>N4</b>	4245 ± 255	Cerca de las antenas del Atacazo.	43 cm	Depósito de ceniza gruesa color gris-verdoso, compuesto por plagioclasa, líticos y pómez muy finas de 1-2 mm

**La erupción N5** es posiblemente la más grande de todas las reconocidas en la historia del Ninahuilca y ocurrió hace aproximadamente 4.400 años. Este evento provocó una gran caída de piroclastos y ceniza que dejó un depósito que cubre una extensa zona de los alrededores del volcán. El depósito de la caída tiene unos 25 cm de espesor en zonas ubicadas a 4 km al NE del complejo y 103 cm de espesor a 12 km al occidente sur occidente, lo que indica que al momento de la erupción el viento soplabla hacia el SO. El depósito de esta caída de piroclastos está compuesto principalmente de fragmentos de piedra pómez que pueden alcanzar los 7 cm de diámetro. Los cálculos realizados indican que el volumen total de este depósito caída sería de al menos 1,41 km<sup>3</sup> (Hidalgo *et al.*, 2008).

Durante la erupción N5 también ocurrieron enormes flujos piroclásticos que fluyeron hacia el SO, a lo largo de los valles de los ríos Quitasol, Naranjal y Pilatón, a lo largo de la actual vía Alóag-Tandapi, donde alcanzan espesores de hasta 120 m sobre el fondo del valle actual (fig. 5b). En contraste, en las quebradas del flanco oriental del Atacazo, los depósitos de flujo *piroclástico* alcanzan apenas entre 1 y 10 m de espesor. Este depósito está compuesto principalmente por *ceniza volcánica* (similar a arena gruesa) y fragmentos de piedra pómez de hasta 25 cm de diámetro. Probablemente al final de la erupción N5 se produjo la extrusión en superficie del domo Ninahuilca Chico-I, que tiene forma circular con un diámetro de 1,5 km y un relieve de 400 m.

**La erupción N6** es la más reciente manifestación eruptiva conocida del Ninahuilca y ocurrió hace aproximadamente 2.270 años. Al igual que la erupción N5, este evento provocó una gran lluvia de piroclastos y ceniza que dejó un depósito que tiene unos 45 cm de espesor en zonas ubicadas a 4 km al NE del complejo y 140 cm de espesor en zonas a 8 km al SO,

lo que indica que también en este caso el viento soplaba hacia el suroccidente al momento de la erupción. Los fragmentos de piedra pómez de este depósito pueden alcanzar los 4 cm de diámetro. Los cálculos realizados indican que el volumen total de este depósito caída sería de al menos 1,0 km<sup>3</sup> (Hidalgo *et al.*, 2008).

La erupción N6 también dio lugar a la formación de flujos piroclásticos que fluyeron principalmente hacia el occidente y suroccidente, pero también en algunas quebradas del flanco oriente del Atacazo (fig. 5b). Los depósitos de los flujos piroclásticos están compuestos de ceniza volcánica (arena gruesa) y abundantes fragmentos de piedra pómez que tienen hasta 20 cm de radio. Estos depósitos pueden ser observados en varios cortes a lo largo de la carretera Alóag-Santo Domingo formando taludes de color blanquecino; de hecho, la figura del “Diablo de Tandapi” ha sido esculpida en este depósito de flujo piroclástico. Probablemente al final de la erupción N6 se produjo la extrusión en superficie del *domo de lava* Ninahuilca Chico-II (fig. 5a) que representaría entonces la más reciente manifestación volcánica del complejo Atacazo-Ninahuilca (Hidalgo *et al.*, 2008).

## ■ LA HISTORIA GEOLÓGICA DEL PULULAHUA

### Período pre-Holoceno

El Pululahua se caracteriza por ser un extenso complejo compuesto exclusivamente por domos de lava *dacítica*. Los domos son topografías en forma de loma que se forman cuando erupciona una lava muy *viscosa*, como las de tipo *dacítico*. Debido a su gran *viscosidad*, estas lavas *dacíticas* no pueden fluir

fácilmente sobre la superficie del terreno y se acumulan cerca del punto de emisión, dando lugar al crecimiento de domos de lava (figs. 6 y 7a).

Durante el período pre-holocénico fueron erupcionados dos grupos característicos de domos de lava en el Pululahua (Andrade, 2002). En primer lugar se formó el grupo ubicado al noreste y compuesto por los domos: 1. Cashiurcu, 2. El Hospital, 3. Maucaquito, 4. El Placer, y 5. Fraililoma. Luego se formó el grupo ubicado al sureste, y compuesto por los domos: 1. Trigoladera; 2. Sincholahua; 3. Shaygua y 4. La Marca (fig. 6). Estos dos grupos de domos fueron erupcionados en un período de tiempo que va entre los 150 mil y los 12 mil años antes del presente, pero no se conoce la cronología detallada de su emplazamiento (Andrade, 2002).

Además, alrededor del Pululahua existen muchas evidencias que sugieren que existió también un grupo de domos que estaban ubicados sobre el sitio donde actualmente se encuentra la depresión del cráter del Pululahua (Andrade, 2002). Estos domos “perdidos” también debieron formarse durante el período pre-holocénico, pero más tarde fueron destruidos durante las grandes explosiones que formaron el cráter del Pululahua.

Los domos del período pre-holocénico del Pululahua tienen relieves relativamente grandes, por ejemplo los domos El Placer con 650 m, La Marca con 600 m, o Sincholahua con 750 m, por lo que resultan bastante visibles en el paisaje, sobre todo desde San Antonio de Pichincha y la Ciudad Mitad del Mundo. El domo Sincholahua alcanza la máxima altura del Pululahua, con 3.356 msnm.

Algo muy particular en el caso de los domos pre-holocénicos del Pululahua es que las erupciones ocurrieron sin explosiones asociadas. Es decir que los domos erupcionaron de forma *efusiva*,

bastante pasiva, sin que ocurran grandes explosiones, algo poco común en el caso de los magmas *dacíticos*.

## **Período Holoceno**

Durante el período Holoceno, es decir desde hace 11.800 años, la actividad eruptiva del Pululahua ha presentado dos fases principales. La primera fase corresponde a una sucesión de grandes erupciones explosivas que dieron lugar a la formación del gran *cráter* del volcán; y la segunda fase corresponde a la formación de otro grupo de domos de lava al interior del gran cráter (Andrade, 2002).

La **fase de erupciones explosivas** del Pululahua comienza con un evento de pequeña magnitud, llamado **erupción E0**, que ocurrió alrededor de 6 mil años antes del presente (Andrade, 2002). Este evento ha sido identificado por un depósito de flujo *piroclástico*, compuesto de fragmentos de piedra pómez, que puede ser observado en las cercanías de Calacalí al sur, y de Tanlahua al este (fig. 3). Este depósito tiene espesores inferiores a los 2 m. Después de este evento, el Pululahua permaneció en aparente reposo durante cerca de 3.500 años (Andrade, 2002).

Luego, hace aproximadamente 2.500 años antes del presente (AP), el Pululahua entró en una etapa durante la cual sucedieron al menos cuatro erupciones explosivas de gran magnitud en un período de aproximadamente 100 años de duración (Andrade, 2002). El primer evento, llamado **erupción E1**, depositó principalmente una gruesa capa de caída de piroclastos, compuesta por fragmentos de pómez, ampliamente dispersa en la zona del volcán. El espesor de esta capa varía desde un metro cerca al volcán, hasta unos pocos centímetros en zonas como Carcelén o Guayllabamba; el tamaño de los fragmentos de pómez varía entre varios centímetros a pocos milí-

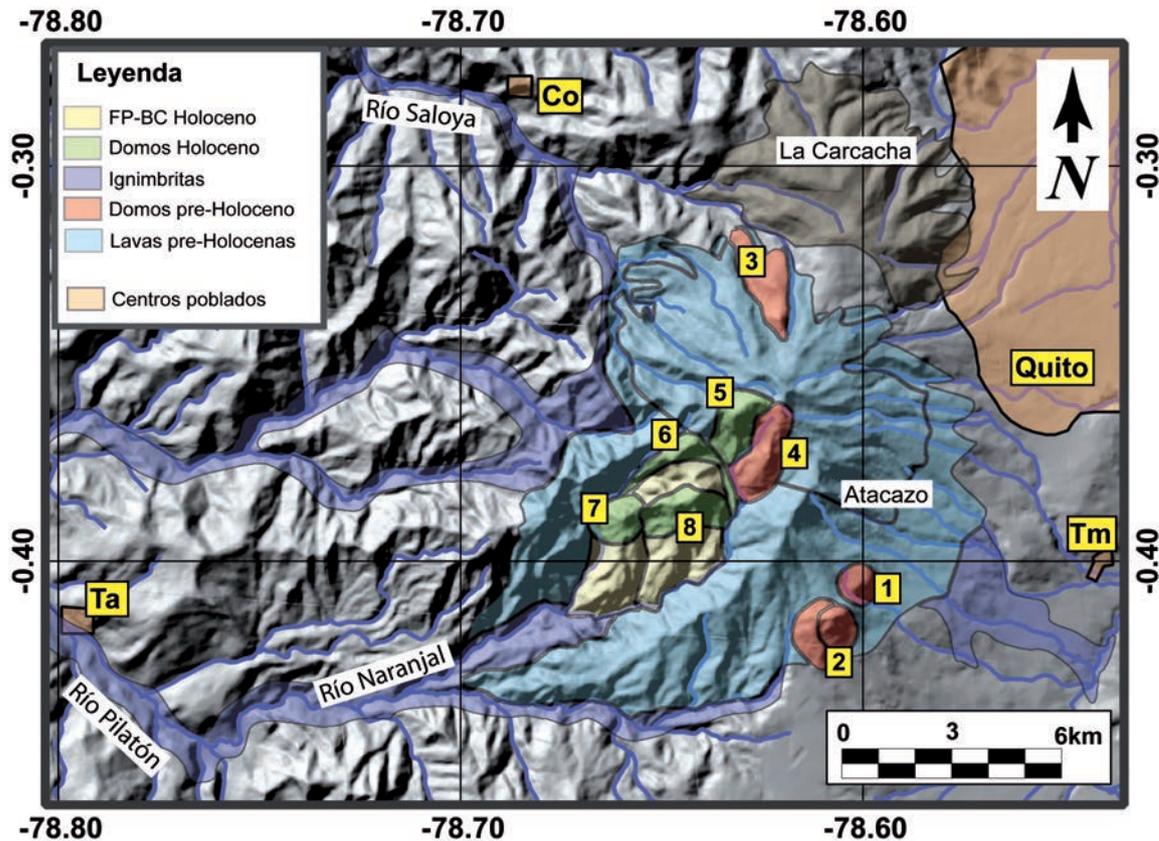
metros (ceniza gruesa) (fig. 7b). Flujos piroclásticos menores también ocurrieron durante la erupción, en dirección de la zona de Tanlahua y hacia el norte del volcán.

Los eventos segundo y tercero, llamados erupciones **E2** y **E3** respectivamente, ocurrieron luego de un período de reposo de varios años, o talvez décadas. Los depósitos de estas erupciones están compuestos de pómez y ceniza, y representan la ocurrencia de flujos piroclásticos y caídas menores de piroclastos. Muchas evidencias sugieren que estas erupciones tuvieron lugar bajo condiciones climáticas de abundante lluvia, sobre todo por la presencia de depósitos de lahares. En general, los depósitos dejados por estas erupciones son modestos, con espesores de entre 2 y 4 m en las zonas de Tanlahua, San Antonio de Pichincha y Calacalí.

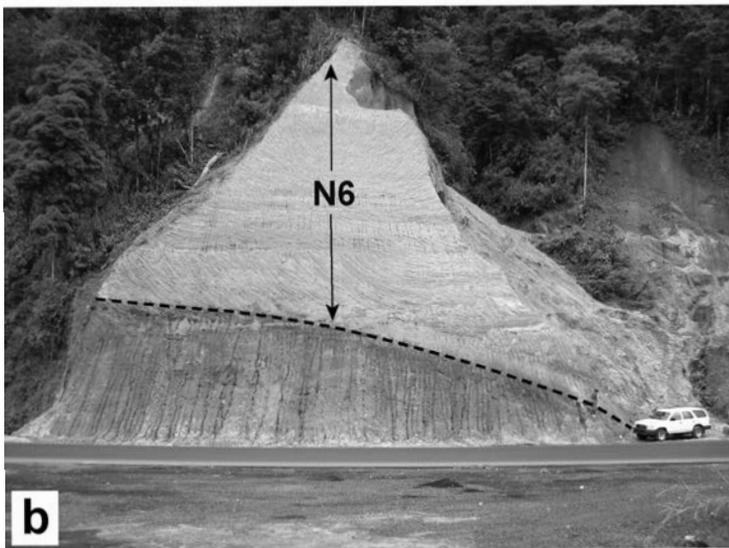
El cuarto y último evento explosivo, llamado **erupción E4**, ocurrió luego de un período de reposo de varios años o décadas posterior a la erupción E3. Los depósitos asociados a la erupción E4 también están compuestos de pómez y ceniza, y representan principalmente la ocurrencia de flujos piroclásticos de gran magnitud. Estos depósitos pueden verse alrededor de todo el Pululahua, como capas de colores crema y rojizo (fig. 12b), con espesores que van desde los pocos metros en el río Monjas, hasta decenas de metros en Calacalí (25-30 m) y en Nieblí (70-80 m).

La sucesión de las cuatro erupciones explosivas de gran magnitud descritas arriba destruyó parcialmente los domos preholocénicos y, sobre todo, dio lugar a la formación del gran cráter del Pululahua.

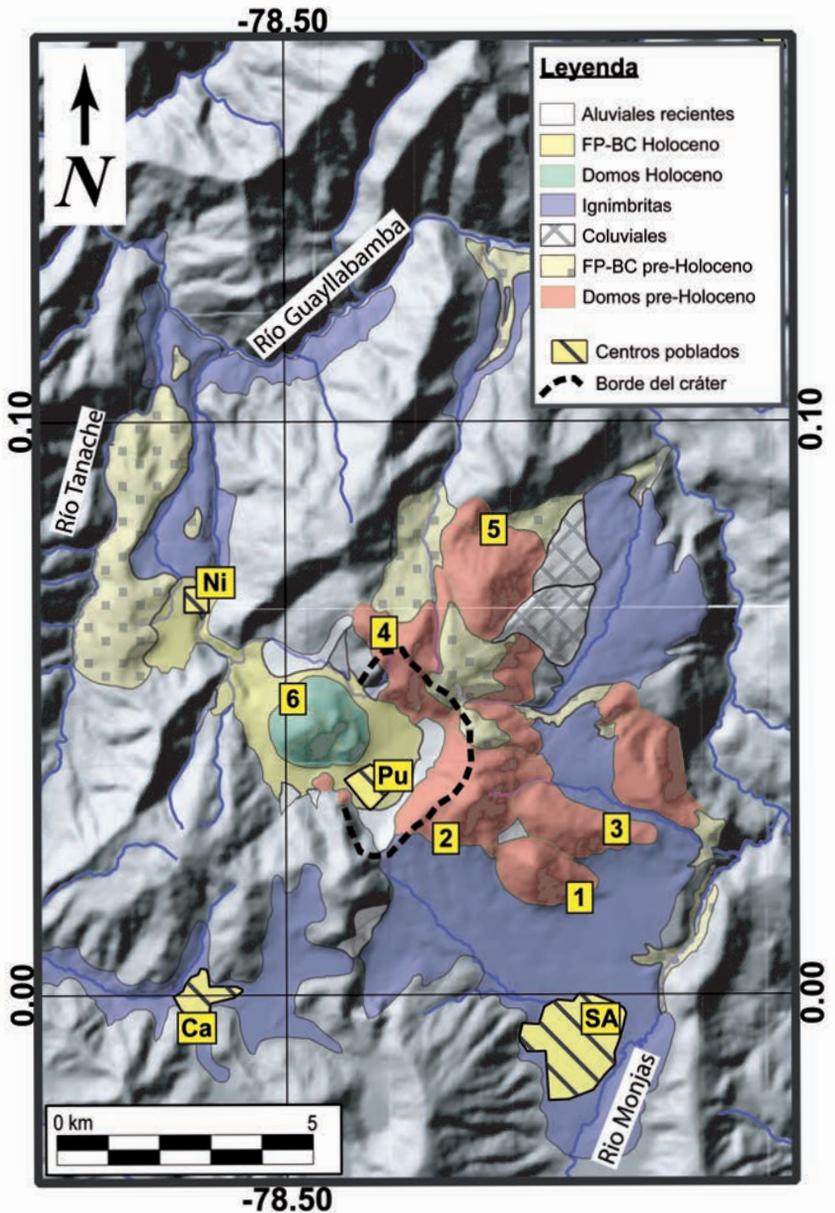
La última fase de actividad del Pululahua corresponde a la **formación del grupo de domos situados dentro del cráter** del volcán. Esta fase comenzó seguramente poco después de



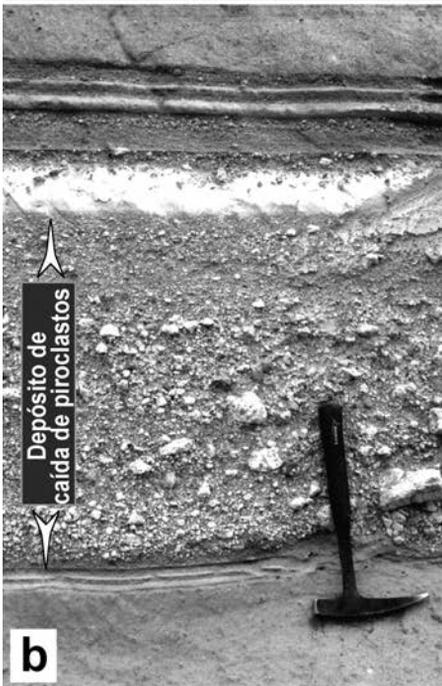
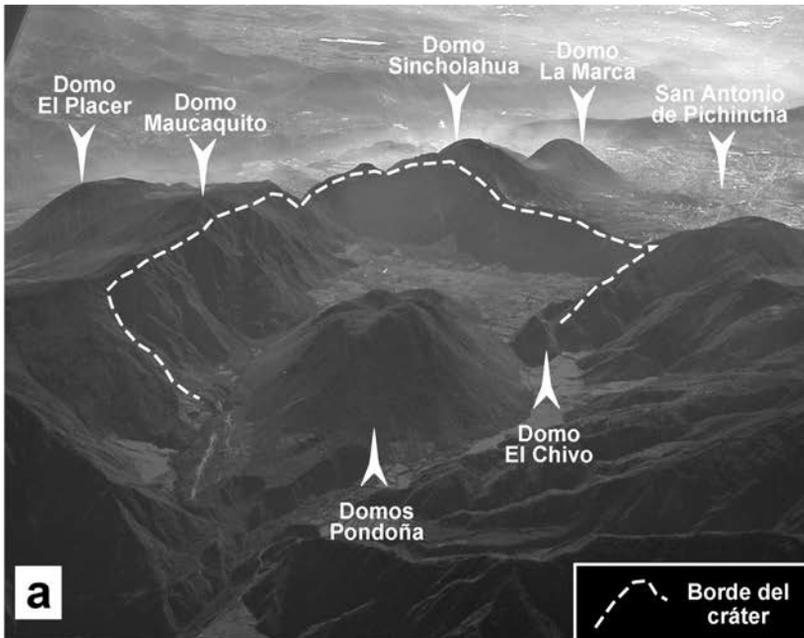
**Figura 4.** Mapa geológico simplificado del Atacazo-Ninahuilca. Nótese la distribución de los domos pre-holocénicos: 1. Omoturco, 2. Cuscungo y La Viudita, 3. Gallo Cantana, 4. Arenal I, y de los domos holocénicos: 5. Arenal II, 6. La Cocha, 7. Ninahuilca Chico I, y 8. Ninahuilca Chico II. (Tm = Tambillo; Co = El Corazón; Ta = Tandapi; FP-BC = flujos piroclásticos de bloques y ceniza) (Datum del mapa: WGS84).



**Figura 5.** a) Vista aérea oblicua del Atacazo-Ninahuilca desde el sureste donde se puede apreciar el edificio del Atacazo, los domos pre-holocénicos Omoturco, la Viudita y Arenal I y los domos holocénicos La Cocha y Ninahuilca Chico II (foto por M. Mouzier); ver también la figura 4. b) Restos de los depósitos de flujos piroclásticos de pómez (ignimbritas) dejados por el episodio N6 del Atacazo-Ninahuilca, observados en la carretera Alóag-Santo Domingo, en las cercanías de Alluriquín. Nótese el tamaño del vehículo en la parte inferior derecha de la fotografía, que da una idea de la escala (foto por M. Mouzier).



**Figura 6.** Mapa geológico simplificado del Pululahuá. Nótese la distribución de los siguientes domos pre-holocénicos: 1. La Marca, 2. Sincholahuá, 3. Shaygua, 4. Maucaquito, 5. El Placer, y del grupo de domos holocénicos: 6. Pondoña. (SA = San Antonio de Pichincha; Ca = Calacalí; Pu = Pululahuá; Ni = Nieblí; FP-BC = flujos piroclásticos de bloques y ceniza) (Datum del mapa: WGS84).



**Figura 7.** a) Vista aérea oblicua del Pululahuá desde el suroeste (foto por P. Ramón). b) Depósitos de la caída de piroclastos y ceniza ocurrida hace aproximadamente 2.480 años durante la erupción E1 que dio inicio a la formación del cráter del Pululahuá; la imagen se obtuvo en las cercanías de San Antonio de Pichincha. Nótese el espesor de la capa (aproximadamente 60 cm) y el tamaño de los bloques (foto por D. Andrade).

la erupción E4 y estuvo caracterizada por un retorno hacia un estilo eruptivo menos explosivo. Dentro del cráter del Pululahua se pueden observar los siguientes domos, en orden de crecimiento: 1. Rumiloma-I; 2. Rumiloma-II; y, 3. Pondoña (fig. 7a). Este grupo de domos ubicado al interior del cráter se formó en un período comprendido entre 2.400 y 2.200 años AP. Luego de la erupción de estos domos, el Pululahua ha permanecido inactivo hasta la actualidad. La pequeña loma “El Chivo” (fig. 7a), a pesar de encontrarse ubicada dentro del *cráter*, representa en realidad los restos de uno de los domos que fueron destruidos durante las erupciones explosivas que formaron el cráter del Pululahua (Andrade, 2002).

## ■ CONCLUSIONES

Como se ha podido ver en este capítulo, los estudios vulcanológicos han mostrado que tanto el Atacazo-Ninahuilca como el Pululahua se han desarrollado durante períodos de tiempo bastante largos para la escala humana, y que ambos volcanes se caracterizan por la ocurrencia de erupciones de gran magnitud a todo lo largo de su desarrollo. Sobre todo, vale notar que las más grandes erupciones de cada volcán han ocurrido en el Holoceno, por lo que **ambos son considerados como potencialmente activos**.

Una diferencia sustancial con respecto a los volcanes que se han presentado en los pasados números de esta misma serie **Los Peligros Volcánicos en el Ecuador**, como el Tungurahua (No. 1; Le Pennec *et al.*, 2005) o el Cotopaxi (No. 3; Andrade *et al.*, 2004), es que en el caso del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua los volcanes no han tenido erupciones en tiempos históricos, es decir durante los últimos 500 años. Además, ninguno de los dos volcanes forma grandes conos, sino que tienen

morfologías que son menos impactantes y que no calzan con la idea que generalmente tenemos sobre un volcán. Todo esto contribuye sin duda a que, en el imaginario social, el Atacazo-Ninahuilca y el Pululahua sean vistos simplemente como “montañas” o “lomas” y que sus peligros hayan sido poco conocidos.

### 3. Tipos de fenómenos volcánicos asociados a las erupciones del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua

---

**E**n el capítulo precedente, hemos podido hacernos una idea de los períodos de tiempo necesarios para el desarrollo de volcanes como el Atacazo-Ninahuilca y el Pululahua, y también hemos constatado que, en ambos casos, el período Holoceno ha sido caracterizado por la ocurrencia de grandes erupciones explosivas y la formación de domos de lava *dacítica* durante erupciones *efusivas*. En este capítulo vamos a estudiar con más detalle los diferentes fenómenos asociados a cada tipo de erupción, basándonos en el conocimiento adquirido en el Atacazo-Ninahuilca y en el Pululahua, pero también en el conocimiento de otros volcanes del Ecuador y del mundo. Si el lector quisiera obtener mayores detalles sobre **las zonas de peligro** asociadas a cada uno de los fenómenos volcánicos presentados a continuación, le recomendamos consultar los mapas de peligros de los respectivos volcanes, publicados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (Hall y Hillebrandt, 1987, 1988).

#### ■ SISMOS VOLCÁNICOS

##### **Descripción**

La gran mayoría de volcanes que se encuentran “dormidos”, o en períodos de calma, tienen una **actividad sísmica de fondo** que suele estar representada por la ocurrencia de unos pocos *sismos* diarios. Sin embargo, una de las primeras señales de reactivación de un volcán es el marcado aumento en el número de sismos registrados en el edificio. Este aumento en la *sismicidad*

se debe a que los magmas, antes de llegar a la superficie, deben abrirse paso a través de varios kilómetros de las sólidas formaciones rocosas del interior del volcán (figs. 8a y 8b). Por supuesto, este tránsito hacia la superficie es muy difícil y requiere la liberación de mucha energía que se manifiesta en forma de pequeños sismos y temblores (actividad sísmica).

Generalmente, los sismos provocados por el ascenso de un magma son bastante abundantes pero de pequeña magnitud, razón por la cual raramente son sentidos por los pobladores de las cercanías de los volcanes. Así, la actividad sísmica de un volcán no representa un verdadero peligro, sino que más bien resulta beneficiosa, pues permite a los científicos comprender mejor los procesos de transporte de los magmas y anticiparse a la ocurrencia de erupciones.

## **Peligros asociados**

En las recientes erupciones del Guagua Pichincha y del Tunurahua, ha sido común que las personas que habitan en las cercanías sientan algunos de estos sismos volcánicos, especialmente poco antes o durante los períodos de erupción mayores. Sin embargo, en ninguna ocasión conocida los *sismos* volcánicos provocaron daños directos en las edificaciones. Se considera que estos fenómenos no son peligrosos.

## **■ DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE**

### **Descripción**

Un volumen de magma que se acerca a la superficie puede provocar hinchamientos o “deformaciones” en la superficie (fig. 9). La magnitud de la deformación dependerá del volumen de magma en ascenso y de la profundidad a la que se encuentre.

Así, se puede decir que un volumen constante de magma que se desplaza hacia la superficie provocará cada vez más hinchamiento de la misma, lo cual continuará en aumento hasta que el magma comience a ser evacuado a través del punto de emisión (*vento volcánico*). Esto también implica que las zonas que más se hinchen serán aquellas que estén más cercanas al punto de emisión. Los principales efectos de la deformación pueden ser el desarrollo de grietas, fracturas y derrumbes en las zonas más deformadas.

### **Peligros asociados**

La deformación de la superficie debido al ascenso de magma es generalmente imperceptible a los ojos humanos y se requiere de instrumentos y métodos especiales para poder detectarla y medirla. La deformación puede dar lugar al desarrollo de grietas, fracturas o derrumbes solamente en casos muy puntuales; por ejemplo, en las proximidades del *vento volcánico*, o en caso de volúmenes de magma muy grandes, o cuando el magma es muy *viscoso* (como los magmas *dacíticos* del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua). Si los efectos de la deformación (derrumbes o fracturas) se hacen visibles a simple vista, es necesario que se evacuen de inmediato las zonas afectadas.

## **■ GASES VOLCÁNICOS**

### **Descripción**

El ascenso de magma hacia la superficie también puede producir un notable aumento en la cantidad y tipo de gases emitidos por un volcán. Grandes cantidades de gases están contenidos en los magmas, de las cuales una fracción significativa puede desprenderse y subir hacia la superficie con mayor facilidad, como

una fase independiente, dando lugar a la formación de *fumarolas*, por ejemplo (figs. 8 y 16). El resto de gases se queda atrapado dentro del magma y solamente se libera cuando el magma llega a la superficie, produciendo grandes explosiones.

Los gases volcánicos están compuestos principalmente de vapor de agua y cantidades menores de otros compuestos gaseosos tales como SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre), HCl (ácido clorhídrico), CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) o CO (monóxido de carbono), los cuales pueden resultar peligrosos para los seres vivos, sobre todo por su capacidad de acumularse en depresiones, valles y zonas bajas con poco viento, donde pueden alcanzar concentraciones letales. Por otro lado, existen también gases tóxicos como el ácido fluorhídrico (HF) y el azufre (S<sub>2</sub>), que se adhieren a la ceniza y producen la contaminación del suelo y las aguas. Adicionalmente, los gases volcánicos pueden mezclarse con el agua atmosférica provocando *precipitaciones (lluvias) ácidas* que podrían afectar a las plantas y animales, así como a los techos de zinc y otros materiales metálicos que pueden sufrir una fuerte corrosión.

Los magmas *dacíticos*, como los del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, son normalmente muy ricos en gases, por lo que se esperaría observar la evacuación de grandes volúmenes antes y durante sus episodios eruptivos.

## **Peligros asociados**

El contacto directo con altas concentraciones de gases volcánicos puede provocar irritación en los ojos, boca y nariz de hombres y animales, así como la destrucción de la vegetación. Especialmente, ciertos gases volcánicos pueden reaccionar con el agua de la atmósfera para formar compuestos ácidos, los cuales dan lugar a la ocurrencia de *precipitaciones (lluvias)*

*ácidas* altamente corrosivas (por ejemplo, el dióxido de azufre reacciona con el agua para formar ácido sulfúrico). Las lluvias ácidas pueden provocar serios problemas a la agricultura y a la ganadería, así como contaminar fuentes de agua potable en zonas extensas.

## ■ DOMOS DE LAVA Y FLUJOS PIROCLÁSTICOS DE “BLOQUES Y CENIZA”

### Definición

La lava es roca parcialmente fundida, en estado líquido, que se derrama desde un *vento* volcánico y que fluye de forma similar a un líquido espeso sobre la superficie de la Tierra. Las lavas tienen temperaturas elevadas, por lo general superiores a 700 °C, y su capacidad de fluir depende del caudal de emisión y de su *viscosidad*. Los domos se forman cuando la lava tiene una *viscosidad* tan alta que casi no puede fluir, por lo que empieza a aglutinarse y enfriarse directamente sobre el *vento* por donde está saliendo. Este comportamiento, con viscosidades tan altas como para formar domos, es más típico de los magmas *dacíticos* y *riolíticos*, como ha sido el caso de los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua durante el período Holoceno (figs. 5a, 7a y 10a). Las lavas *andesíticas* o *basálticas* tienen viscosidades menos altas, lo que les permite fluir más libremente y formar coladas, como en los volcanes Tungurahua y Cotopaxi (Andrade *et al.*, 2005; LePennec *et al.*, 2005). Los domos de lava se forman generalmente durante fases eruptivas poco explosivas, cuando el magma ha perdido la gran mayoría de sus gases.

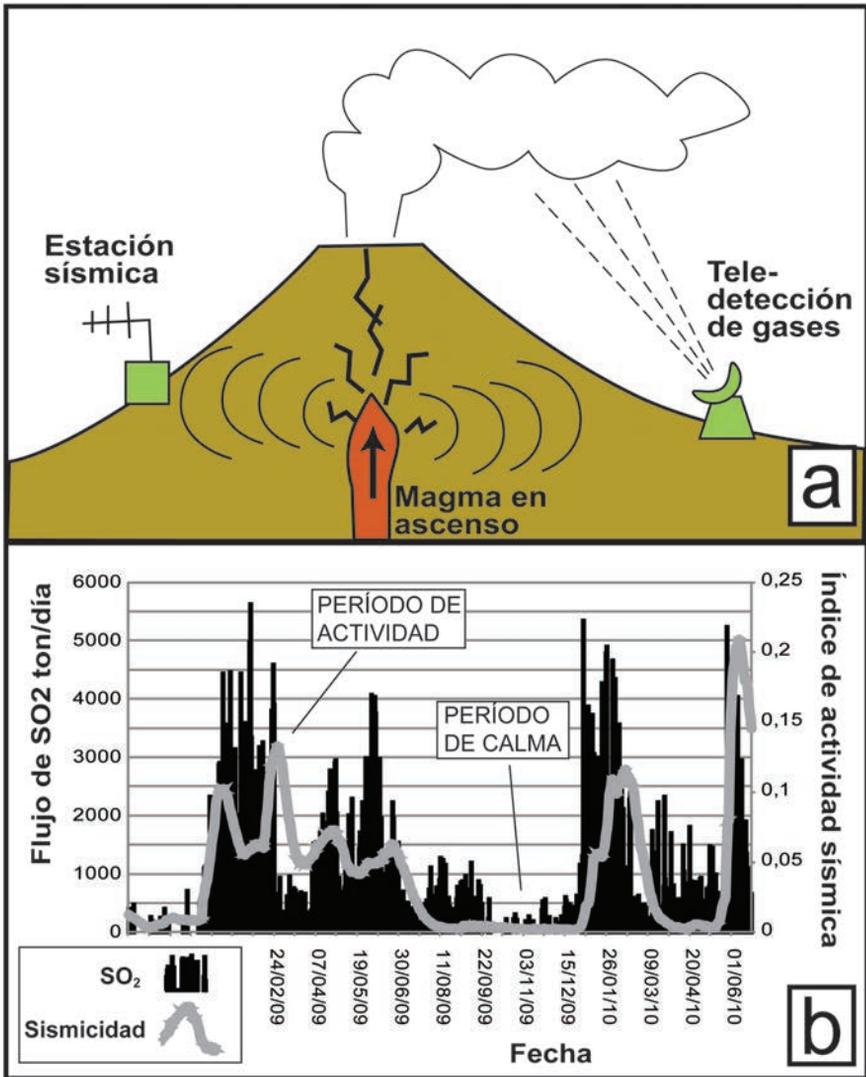
Es muy importante notar que la formación de un domo de lava implica una rápida acumulación de rocas calientes en una

superficie relativamente pequeña. Es por esto que generalmente los domos son estructuras poco estables y tienden a formar derrumbes en sus empinados flancos, bajo el efecto de la gravedad (fig. 10b). El resultado de tales derrumbes es la formación de *flujos piroclásticos* de bloques y ceniza, que son avalanchas de rocas, cuyas temperaturas pueden ser bastante altas (300-500 °C), y que pueden fluir a grandes velocidades (~100 km/h), lo que les permite alcanzar distancias considerables (varios kilómetros). Estas características hacen que los *flujos de bloques y ceniza* sean muy peligrosos y destructores.

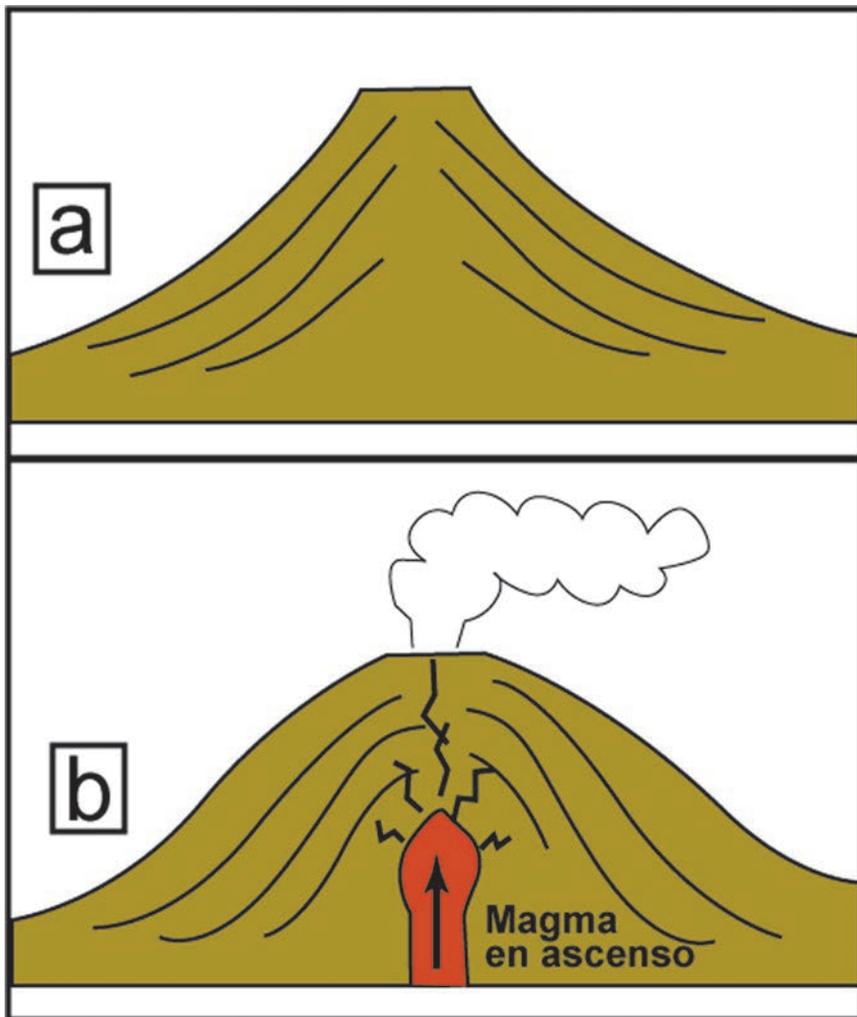
## Historia

La formación de domos de lava ha sido sin duda un fenómeno bastante común en la evolución geológica del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, tanto en la época pre-holocénica como en la holocénica. De hecho, toda la estructura de los edificios Ninahuilca y Pululahua está conformada exclusivamente por domos de lava dacítica, que se encuentran distribuidos dentro y fuera de los grandes cráteres de cada volcán (figs. 4 y 6). Los domos de lava más jóvenes del Atacazo-Ninahuilca se formaron hace aproximadamente 2.300 años, y los del Pululahua hace 2.200 años (para más detalles, ver el capítulo 2).

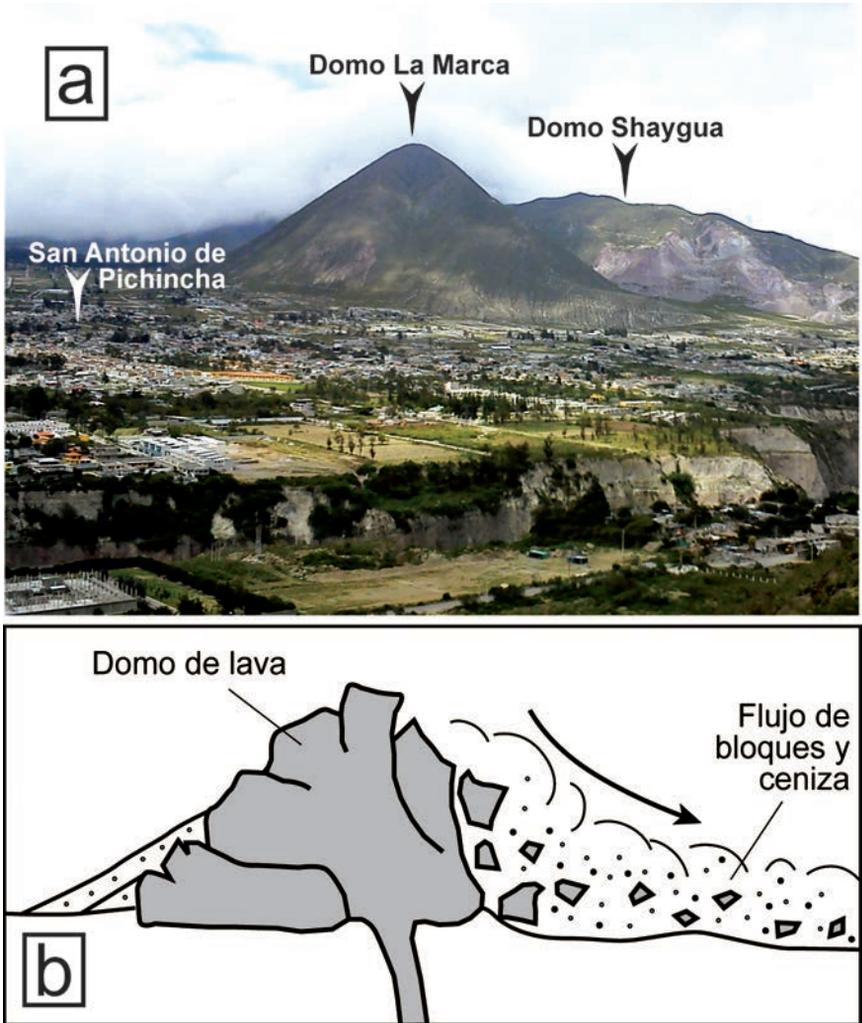
La formación de los domos de lava de ambos volcanes ha estado siempre acompañada por la ocurrencia de *flujos piroclásticos* de bloques y ceniza. En las cercanías del domo Gallo Cantana (fig. 4) se pueden observar los depósitos de un evento de este tipo. Igualmente, una gran parte del substrato de la planicie de San Antonio de Pichincha y de la zona de Tanlahua está conformada por los depósitos de los flujos de bloques y ceniza que ocurrieron como consecuencia de la formación de los varios domos de lava del Pululahua (figs. 6, 10a). Tanto en el Atacazo-



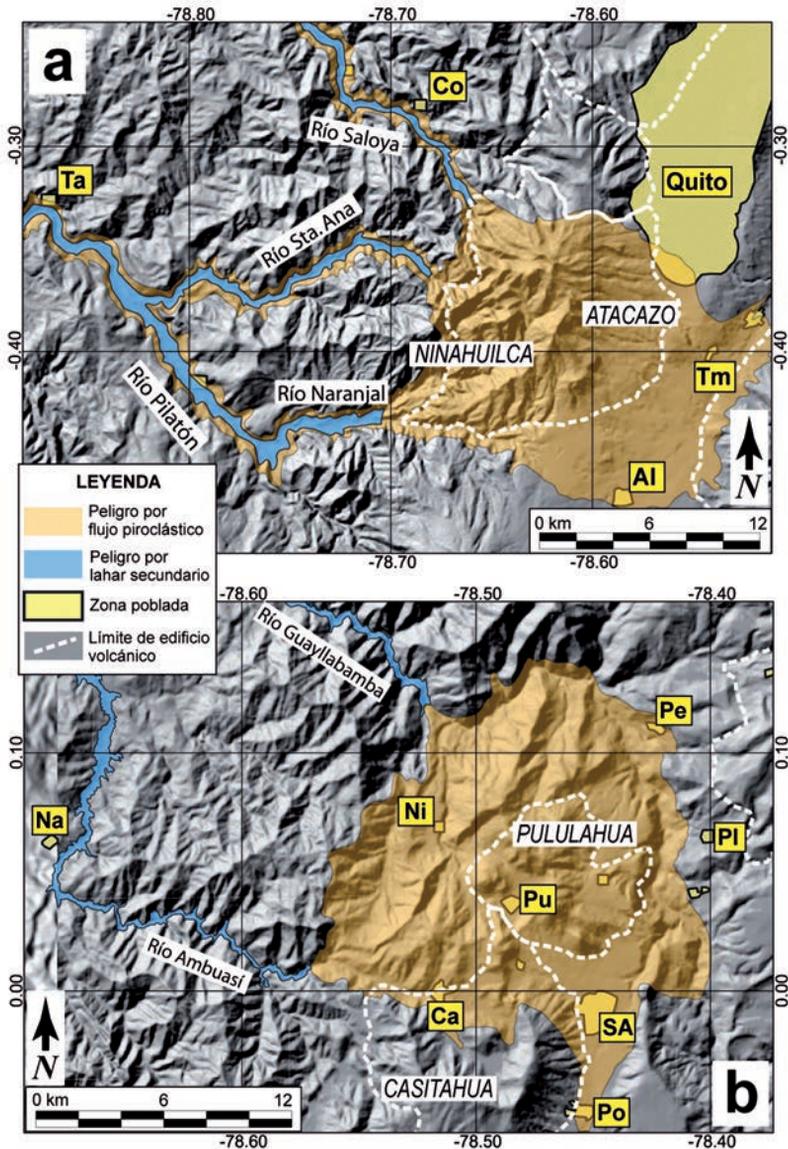
**Figura 8.** a) Esquema del ascenso de magma hacia la superficie, provocando actividad sísmica y emisiones de gases. b) Actividad sísmica y caudales de gases registrados en el volcán Tungurahua desde octubre de 2008 hasta junio de 2010; nótese que en este período las reactivaciones del volcán vienen acompañadas por incrementos en los niveles de sismicidad y emisiones gaseosas, y además que estos incrementos ocurren de forma casi paralela (ver también capítulo 4 y la figura 15).



**Figura 9.** Esquema del ascenso de magma provocando deformación de la superficie. Estas deformaciones casi siempre son imperceptibles al ojo humano, por lo que es necesaria la utilización de instrumentos de precisión (tales como estaciones GPS o inclinómetros electrónicos) para medirlas.



**Figura 10.** a) Fotografía del domo de lava llamado “Ioma La Marca”, ubicado en el flanco sureste del Pululahua (ver también la figura 6). El domo La Marca es fácilmente visible desde la zona de la Mitad del Mundo, en San Antonio de Pichincha (foto por D. Pacheco). b) Esquema de la formación de un flujo piroclástico de bloques y ceniza por desestabilización de un domo de lava (modificada de McPhie *et al.*, 1993). Gran parte de la planicie de San Antonio de Pichincha está conformada por depósitos dejados por este tipo de flujos.



**Figura 11.** Mapa de peligros simplificado en el que se muestran las zonas que podrían ser afectadas en caso de producirse flujos piroclásticos (sean estos flujos de bloques de ceniza o ignimbritas), o lahares secundarios, durante erupciones del: a) Atacazo-Ninahuilca; y, b) Pululahua. Estos mapas han sido obtenidos a partir de los trabajos de Hall y Hillebrandt, 1987 y 1988 (Datum WGS84). Estos trabajos deben ser consultados si se desea tener mayores detalles de las zonas de peligro. **Es necesario recalcar que la forma y extensión de las zonas de peligro mostradas en este mapa pueden variar enormemente, dependiendo de la magnitud de la erupción; por lo tanto, estas zonas deben ser tomadas solamente como referenciales.** Co = Corazón; Ta = Tandapi; Tm = Tambillo; Al = Aloag; Pe = Perucho; Ni = Nieblí; Pl = Puéllaro; Na = Nanegalito; Pu = Pululahua; Ca = Calacalí; SA = San Antonio de Pichincha; Po = Pomasqui.

Ninahuilca como en el Pululahua, el interior de los cráteres está parcialmente relleno con depósitos de *flujos de bloques y ceniza*, que ocurrieron durante el crecimiento de los domos de lava más recientes (figs. 4 y 6).

## **Peligros**

El principal peligro asociado al crecimiento de un domo de lava es su potencial inestabilidad y la consecuente formación de *flujos piroclásticos* de bloques y ceniza (ver arriba; fig. 10b). Como se ha mencionado, estos flujos son muy móviles y destructivos, por lo que las zonas potencialmente expuestas a su ocurrencia deberían ser evacuadas en caso de que se registre el crecimiento de un domo de lava (fig. 11). Tanto en el Atacazo-Ninahuilca como en el Pululahua, los domos de lava más recientes se han formado al interior de los respectivos *cráteres*, por lo que estas zonas pueden ser consideradas como las de mayor probabilidad para que estos fenómenos se repitan en el futuro. Sin embargo, los flancos externos de ambos volcanes también han registrado el crecimiento de domos de lava en épocas más antiguas, por lo cual no se puede descartar que esto se repita en el futuro (fig 11).

## **■ FLUJOS PIROCLÁSTICOS DE PÓMEZ (IGNIMBRITAS)**

### **Definición**

Los *flujos piroclásticos* de pómez son mezclas calientes (temperatura mayor a 500 °C) de gases, ceniza y fragmentos de pómez, que se desplazan en forma de avalancha, a grandes velocidades (mayor a 60 km/h), y que ocurren generalmente

durante fases eruptivas explosivas, con  $VEI > 5$ .<sup>2</sup> Los depósitos dejados por estos fenómenos son también conocidos con el nombre de *ignimbritas*.

Al momento de su ocurrencia, es decir durante su movimiento, el cuerpo de un flujo piroclástico de pómez tiene dos partes principales: 1. un componente más denso, constituido por ceniza y abundantes fragmentos de pómez, el cual se desplaza principalmente por el fondo de los valles y las quebradas; y, 2. un componente mucho menos denso, constituido mayormente por ceniza y gases calientes, que se desarrolla sobre el componente denso, expandiéndose rápidamente en todas las direcciones, lo que le permite desbordarse de los valles y quebradas e incluso sobrepasar relieves importantes (fig. 12). De este segundo componente se desprende una nube de ceniza que puede alcanzar importantes alturas y viajar grandes distancias para luego dar lugar a una caída de ceniza.

## Historia

Tanto el Atacazo-Ninahuilca como el Pululahua han dado lugar a la formación de grandes flujos piroclásticos de pómez, sobre todo en el período holocénico. Los depósitos dejados por estos fenómenos (*ignimbritas*) pueden ser fácilmente observados en las cercanías de ambos volcanes (figs. 4 y 6). Por ejemplo, las *ignimbritas* producidas por el Atacazo-Ninahuilca entre

- 
2. *VEI* son las siglas para *Volcanic Explosivity Index* o “Índice de Explosividad Volcánica”. Este índice varía desde 1 para las erupciones no explosivas, hasta 8 para las erupciones extremadamente explosivas y voluminosas. Así, el *VEI* fue creado para cuantificar y clasificar a las erupciones explosivas. Se recomienda leer más detalles sobre el *VEI* en el anexo 2, para una mejor comprensión del resto del presente capítulo.

8.000 y 2.300 años AP son visibles en los cortes de la carretera Alóag-Santo Domingo, entre los poblados de Tandapi y Alluriquín, donde aparecen como enormes paredes blanquecinas compuestas por ceniza volcánica y fragmentos de piedra pómez (fig. 5a). Igualmente, en las cercanías de Calacalí y de San Antonio de Pichincha se pueden observar capas similares, pero que corresponden a los flujos piroclásticos de pómez que ocurrieron durante las erupciones que formaron el cráter del Pululahua hace aproximadamente 2.400 a 2.500 años (figs. 6 y 12b). En ambos casos es evidente que los flujos piroclásticos de pómez recorrieron distancias grandes, destruyendo todo a su paso.

## **Peligros**

Los flujos piroclásticos de pómez, por las características descritas arriba, son fenómenos volcánicos altamente destructivos para cualquier infraestructura y letales para toda forma de vida. La ocurrencia de estos flujos es más común durante las erupciones explosivas de magmas *dacíticos* o *riolíticos*, como ha sido a menudo el caso del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua. Cuando un volcán de este tipo entra en actividad eruptiva, es imposible predecir si el proceso conducirá o no a la formación de flujos piroclásticos de pómez y peor aún el momento en el cual estos fenómenos podrían tener lugar. Por ello, en caso de que un volcán de magmas *dacíticos* entre en actividad, es necesaria la evacuación de las zonas que se consideren como potencialmente amenazadas por estos fenómenos (fig. 11). Las *ignimbritas* son generalmente consideradas como evidencias de la ocurrencia de erupciones explosivas de gran magnitud.

En las erupciones ocurridas en el período holocénico, los flujos piroclásticos del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua han recorrido distancias de decenas de kilómetros y han cubierto superficies de centenas de kilómetros cuadrados rellenando los principales valles que se originan en los respectivos edificios volcánicos (figs. 4 y 6). Por ejemplo, en el sector de Tandapi, las *ignimbritas* generadas por el Atacazo-Ninahuilca durante las erupciones N5 y N6 (ver capítulo 2) alcanzan espesores de 120 y 60 m, respectivamente, desde el nivel actual del río Toachi (fig. 5b). De igual manera, las *ignimbritas* generadas durante la formación del cráter del Pululahua, hace 2.400 años aproximadamente, tienen espesores de hasta 90 m en el río Guayllabamba, en el sector de Infiernillo al norte del volcán, y hasta 20 m en la zona de San Antonio de Pichincha (fig. 12b).

Una de las consecuencias principales de la deposición de una *ignimbrita* es la formación de grandes *lahares*. En efecto, al estar conformadas por ceniza y fragmentos de pómez, las *ignimbritas* se erosionan fácilmente con el agua de los ríos y las lluvias, lo que da lugar a la formación de *lahares* (flujos de lodo).

## ■ CAÍDAS DE CENIZA Y PIROCLASTOS

### Definición

Durante las explosiones volcánicas, los gases y el material piroclástico (fragmentos de *ceniza*, rocas y *pómez*) son expulsados desde el *vento* hacia la atmósfera. Los fragmentos de roca más grandes (varios centímetros) y densos pueden seguir trayectorias *balísticas* y caer cerca del cráter, en las partes altas del volcán; estos fragmentos son conocidos como *bombas volcánicas* (fig. 13a). En cambio, las partículas más pequeñas (pocos centímetros hasta menos de un milímetro) son conoci-

das como *ceniza volcánica* o *lapilli*, y pueden subir a grandes alturas a través de una “columna eruptiva”, impulsadas por su energía térmica, donde luego son acarreadas por el viento y forman las llamadas “nubes de ceniza”, que se mueven de forma horizontal en la atmósfera (fig. 13a). Las nubes de ceniza pueden transportar la ceniza y el lapilli por grandes distancias lejos del volcán. Al caer a tierra, este material fragmentario puede cubrir grandes áreas con una capa de varios centímetros o decímetros de espesor (fig. 13b). Las erupciones que producen caídas de *ceniza* y *piroclastos* varían desde explosiones discretas, de corta duración, que expulsan el material a pocos kilómetros de altura sobre el cráter, hasta grandes explosiones que pueden durar varias horas consecutivas y que lanzan el material fragmentario hasta zonas muy altas de la atmósfera (a veces más de 25 kilómetros de altura).

## Historia

Las caídas de ceniza y piroclastos son fenómenos muy comunes en las erupciones volcánicas. En los casos del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua vale notar que estos fenómenos han sido de gran magnitud en el período holocénico, debido sobre todo a que las erupciones han sido provocadas por grandes volúmenes de magmas dacíticos. El Atacazo-Ninahuilca ha provocado grandes caídas de piroclastos en cinco ocasiones durante los últimos 12 mil años, la última vez hace 2.250 años, aproximadamente. Los depósitos dejados por estas lluvias de piroclastos han cubierto extensas zonas del sur y suroccidente de Quito (fig. 13b). El Pululahua, por su parte, provocó una serie de caídas de *piroclastos* ocurridas durante un período de tiempo estimado entre 2.500 y 2.200 años AP, y que estuvieron asociadas a las erupciones que formaron el gran cráter del vol-

cán. El más grande de estos depósitos ocurrió hace 2.480 años, aproximadamente, cubriendo con ceniza una gran región del suroccidente del volcán hasta la provincia de Manabí (Vallejo, 2011). Los estudios arqueológicos muestran claramente que la cultura Cotocollao, que se desarrollaba en el norte de Quito hace 2.500 años, fue muy afectada por esta caída de ceniza y piroclastos del Pululahua, que provocó la destrucción de los suelos cultivables y obligó a los habitantes de la zona a abandonar de forma definitiva el asentamiento (Issacson y Zeidler, 1999). Es muy posible que tanto el Atacazo-Ninahuilca como el Pululahua hayan provocado lluvias de ceniza y piroclastos en épocas anteriores a la holocénica, pero dichos depósitos han sido erosionados y no se han conservado en el registro geológico, por lo que no se pueden conocer sus características ni sus edades.

## **Peligros**

Las caídas de ceniza y material piroclástico se depositan sobre la superficie terrestre cubriendo zonas que pueden extenderse por cientos de kilómetros cuadrados en la dirección del viento. El espesor de la capa depositada disminuye progresivamente, desde pocos metros en las zonas proximales al volcán, hasta pocos milímetros en las zonas distales (figs. 14), es decir, a medida que aumenta la distancia al volcán. La cantidad de ceniza y piroclastos que se acumulen por caída en una zona depende también de factores como el volumen de material emitido, la duración de la erupción, el caudal de salida del material, y la dirección y la velocidad del viento.

En el Atacazo-Ninahuilca y en el Pululahua, la mayoría de caídas de ceniza y piroclastos se han producido hacia las zonas occidentales de los respectivos volcanes, debido a que en el norte del Ecuador la dirección predominante de los vientos ha

sido hacia el occidente desde hace varios miles de años.<sup>3</sup> En la figura 14 se presentan las zonas que tienen mayor probabilidad de ser afectadas por las caídas de piroclastos en caso de que ocurra una erupción importante ( $VEI \geq 5$ ) en el Atacazo-Ninahuilca o en el Pululahua. Las curvas marcadas con “25 cm” en la figura 14 encierran las zonas en las que podría acumular un espesor superior a 25 cm de ceniza y piroclastos. Las curvas externas, marcadas con “5 cm” en la figura 14, encierran las zonas en las que se podrían acumular espesores superiores a 5 cm, mientras que en la zona exterior a la curva la acumulación sería menor a 5 cm.

Es importante recordar que todos estos datos son solamente aproximativos y de ninguna forma representan certidumbres o límites definidos de forma absoluta. Esto se debe a que los parámetros que controlan los fenómenos volcánicos (por ejemplo la velocidad y dirección del viento) son muy variables, dando lugar a considerables variaciones en la distribución, alcance y magnitud de los fenómenos; en este caso, de la lluvia de ceniza y piroclastos.

El impacto de una caída de ceniza y piroclastos depende principalmente del espesor de material acumulado y del tamaño que tengan los granos de ceniza y piroclastos. La afectación sobre la población y la agricultura empieza a hacerse notoria con espesores de ceniza pequeños, menores a 1 mm, y se incrementa sustancialmente si la ceniza se mezcla con agua, ya que el peso

---

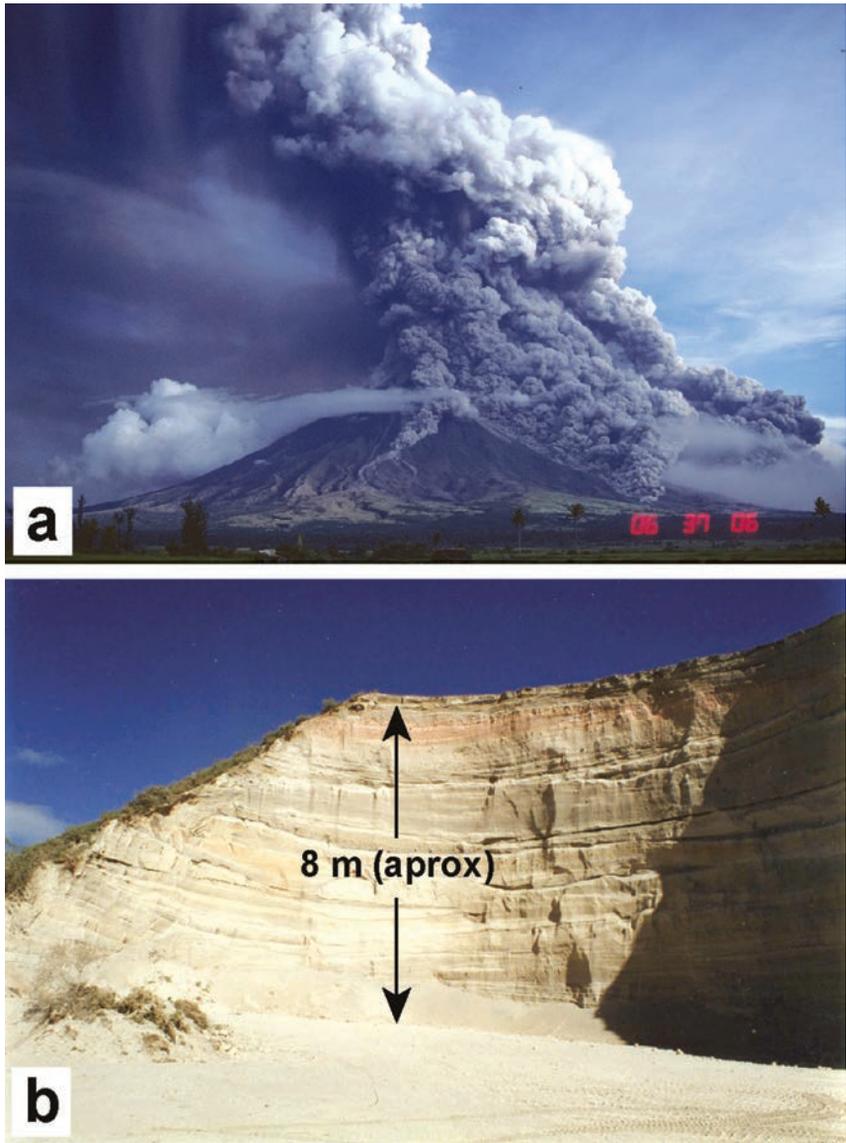
3. Este comportamiento de los vientos se puede confirmar observando las distribuciones de los depósitos de caída de ceniza ocurridos en los últimos 10 mil años en otros volcanes como el Cotopaxi (Barberi *et al.*, 1995; Andrade *et al.*, 2005; Hall y Mothes, 2008), el Tungurahua (Le Pennec *et al.*, 2005), el Guagua Pichincha (a finales de 1999) o el Reventador (noviembre de 2002).

acumulado aumenta notablemente, o si los granos de ceniza son cada vez más gruesos. Los efectos negativos producidos por las lluvias de ceniza incluyen problemas de salud (irritación de los ojos y de las vías respiratorias), problemas con el ganado, destrucción de plantaciones, daños a los motores (vehículos, aviones, maquinarias en general, transformadores, etc.), contaminación de fuentes y reservorios de agua, y en caso de caídas fuertes, problemas de visibilidad, riesgos de colapso de los techos, etc. Todos estos efectos, descritos de manera progresiva desde espesores menores a 1 mm hasta mayores a 30 cm, están resumidos en el anexo 1.

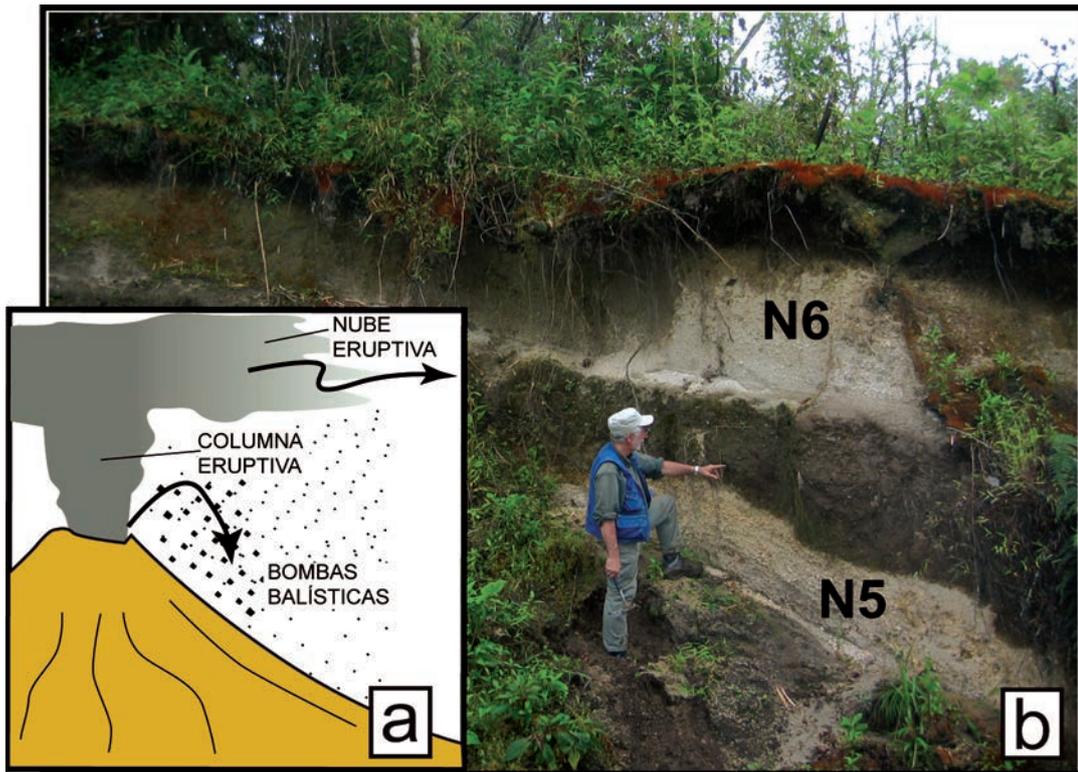
## ■ FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS (LAHARES)

### Definición

Los lahares son flujos lodosos, formados por la mezcla de materiales de origen volcánico (bloques, lapilli, ceniza) con abundante agua. La fuente del agua puede encontrarse en la fusión de un casquete *glaciar*, en la ruptura de un lago ubicado en un *cráter* o en las fuertes lluvias que ocurran en los volcanes. Los lahares se mueven ladera abajo por la fuerza de la gravedad, pudiendo alcanzar grandes velocidades (hasta 100 km/h) y siguiendo los *drenajes* naturales, de manera similar a un gran aluvión de lodo y escombros. El tipo de material movilizado por estos flujos es muy variable, pudiendo ser desde arena fina hasta bloques de varios metros de diámetro. Una vez formados, los lahares viajan por todo lo largo de los drenajes, provocando mayores o menores daños según su volumen y su velocidad. Los mayores daños pueden ocurrir cuando el volumen es tan grande que el flujo se desborda del cauce del drenaje e inunda las zonas aledañas.



■ **Figura 12.** a) Flujos piroclásticos descendiendo sobre los flancos del volcán Mayón (Filipinas) durante una erupción ocurrida en 1984 (foto cortesía de C. Newhall). b) Fotografía de depósitos de flujos piroclásticos de pómez (ignimbritas) observados en una cantera de las cercanías de San Antonio de Pichincha. Estos depósitos corresponden a las erupciones explosivas que formaron el cráter del Pululahua hace aproximadamente 2.400 años (foto por D. Andrade).



**Figura 13.** a) Esquema de una explosión volcánica, con *bombas* de trayectoria balística, una columna eruptiva y la formación de una nube eruptiva. b) Fotografía de los depósitos de caída de piroclastos originados en las erupciones N5 y N6 ocurridas hace 4.400 y 2.270 años, respectivamente, en el Atacazo-Ninahuilca. Esta fotografía fue tomada en la zona de Canchacoto, población ubicada a aproximadamente 10 km al suroccidente del Ninahuilca. Nótese que el espesor de las capas es de entre 100 y 160 cm, muy superior a las caídas de ceniza más recientes ocurridas en Quito en 1999 (volcán Guagua Pichincha) y en 2002 (volcán Reventador) que tuvieron apenas unos milímetros de espesor y no han dejado ningún vestigio en los suelos (foto por S. Hidalgo).

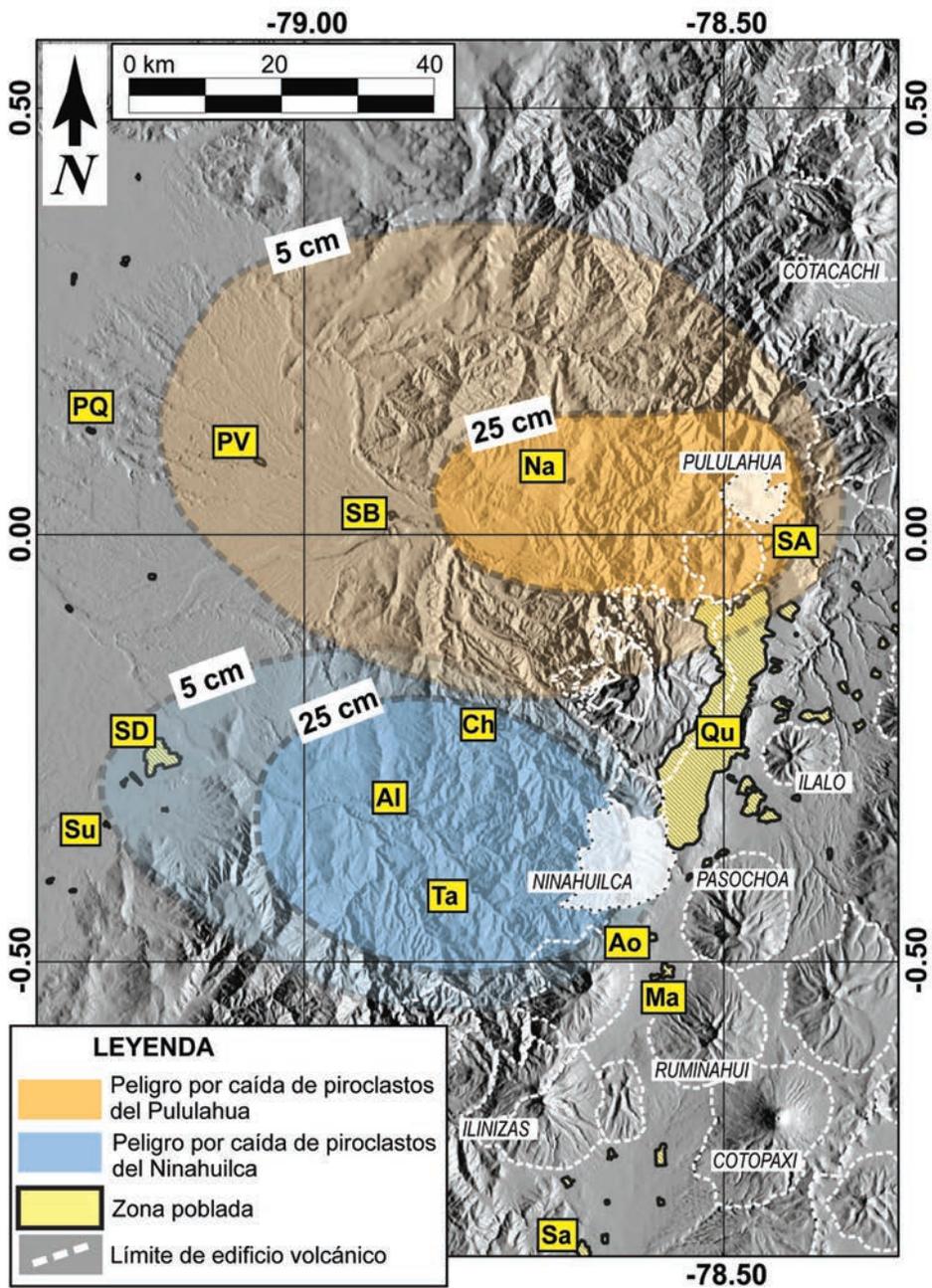


Figura 14 →

---

**Figura 14.** Mapa de peligros simplificado en el que se muestran las diferentes zonas del Ecuador que podrían ser potencialmente afectadas por lluvias de ceniza y *piroclastos* en caso de ocurrir grandes erupciones explosivas en el Atacazo-Ninahuilca (colores azulados) o en el Pululahua (colores naranjas). La extensión de estas zonas ha sido estimada suponiendo que se repitan erupciones similares a la N6 del Atacazo-Ninahuilca de hace 2.200 años, o a la E1 del Pululahua de hace 2.500 años (ver capítulo 2). Para cada volcán se muestran dos zonas con diferente nivel de afectación potencial: 1. una zona cuyo borde está etiquetado con “25 cm”, dentro de la cual se esperarían acumulaciones de ceniza y piroclastos superiores a 25 cm; 2. otra etiquetada con “5 cm”, dentro de la cual se esperarían acumulaciones de ceniza y piroclastos superiores a 5 cm. Para obtener más detalles sobre las zonas amenazadas por caída de piroclastos o lahares se recomienda consultar los Mapas de Peligros Volcánicos Potenciales del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, publicados por el Instituto Geofísico-EPN (Hall y Hillebrandt, 1987 y 1988). **Es necesario recalcar que la forma y extensión de las zonas de peligro mostradas en este mapa pueden variar enormemente, dependiendo de la magnitud de la erupción así como de la velocidad y dirección del viento al momento de ocurrir la erupción; por lo tanto, estas zonas deben ser tomadas solamente como referenciales.** PQ = Puerto Quito; PV = Pedro Vicente Maldonado; Na = Nanegalito; SB = San Miguel de los Bancos; SA = San Antonio de Pichincha; Ch = Chiriboga; Qu = Quito; SD = Santo Domingo de los Tsáchilas; Al = Alluriquín; Su = Susanita; Ta = Tandapi; Ao = Alóag; Ma = Machachi; Sa = Saquisilí.

Los lahares se pueden formar por dos mecanismos principales. En primer lugar, los lahares más voluminosos y destructivos se forman cuando *flujos piroclásticos* desbordados desde un *cráter* provocan la fusión violenta de la nieve y el hielo de un *glaciar* que cubra eventualmente un volcán. Los flujos así formados son conocidos como “**lahares primarios**”, y han sido bastante comunes en el Cotopaxi (Wolf, 1878; Aguilera *et al.*, 2004; Mothes *et al.*, 2006). En segundo lugar, lahares de tamaños más modestos se forman cuando las cenizas y los piroclastos recién depositados por una erupción son removilizados por las lluvias que ocurran en el volcán. Los flujos de este tipo se conocen como “**lahares secundarios**”, y han sido los más comunes en los casos del Atacazo-Ninahuilca y del Pulu-lahua. Los lahares secundarios pueden ocurrir en zonas distantes del volcán si la acumulación local de ceniza nueva y las lluvias son suficientes para formar el flujo. La gravedad y el efecto de arrastre de las lluvias tienden a removilizar las cenizas depositadas para formar lahares secundarios pequeños. Los lahares secundarios pueden también ocurrir mucho después de terminada una erupción, siempre que la lluvia removilice los depósitos dejados.

## **Historia**

Es posible que en épocas anteriores al Holoceno se hayan producido lahares primarios en el Atacazo-Ninahuilca, dado que el volcán se encontraba a la época cubierto por un manto glaciar. En el caso del Pulu-lahua, en cambio, lahares primarios seguramente nunca ocurrieron en toda su historia, ya que el volcán nunca estuvo cubierto con glaciares.

En lo concerniente a los lahares secundarios, sin duda han sido comunes tanto en el Atacazo-Ninahuilca como en el Pulu-

lahua, sobre todo en el período Holoceno. En los principales drenajes que se originan en ambos complejos, por ejemplo en los ríos Toachi y Saloya que nacen en el Atacazo-Ninahuilca y en el río Guayllabamba al norte del Pululahua (figs. 2 y 3), es posible encontrar depósitos que muestran la ocurrencia de lahares secundarios que se produjeron como efecto de la removilización de las *ignimbritas* depositadas durante las grandes erupciones explosivas. Incluso en la actualidad, cuando ocurren lluvias fuertes en la zona de San Antonio de Pichincha, se siguen formando pequeñas crecidas lodosas que descienden hacia el río Monjas, transportando abundante ceniza y fragmentos de pómez desprendidos de los depósitos del Pululahua.

## **Peligros**

La peligrosidad de un lahar depende principalmente de su volumen. En caso de que ocurra una gran erupción explosiva en el Atacazo-Ninahuilca o en el Pululahua, el principal factor que controlaría el volumen de un lahar es la disponibilidad de agua para removilizar los materiales recién depositados. En la actualidad, para el caso de ambos volcanes, la principal fuente de agua son los propios ríos que nacen de los respectivos volcanes y las lluvias que caen en las respectivas zonas. Esto implica que, de forma general, los lahares que podrían formarse en ambos volcanes serían de tamaño relativamente modesto, sobre todo si se los compara con los que potencialmente pueden formarse por fusión de un casquete glaciar (por ejemplo, en el Cotopaxi) o por la ruptura de un lago cratérico.

Las personas alcanzadas por un lahar tienen muy pocas posibilidades de sobrevivir, por lo cual, durante una crisis volcánica se recomienda la evacuación de las zonas pobladas que se encuentren en las zonas potencialmente amenazadas por estos

fenómenos, es decir principalmente las zonas aledañas a los cauces de los ríos que nacen en los respectivos volcanes (figs. 2, 3 y 14). Debido a su alta velocidad y densidad, los lahares pueden destruir y aun arrastrar objetos de gran tamaño y peso, tales como puentes, paredes de viviendas, vehículos, grandes árboles, etc. Las edificaciones y la vegetación que se encuentren a su paso serán destruidas o seriamente afectadas. Se ha medido la velocidad de lahares entre 20 y 80 km/h con caudales pico entre los 50.000 y 60.000 m<sup>3</sup>/seg (Aguilera *et al.*, 2004; Mothes *et al.*, 2004). Aun cuando no tenga gran velocidad, solamente el hecho de que un lahar inunde una zona puede causar pérdidas muy significativas del suelo y de la infraestructura.

## ■ AVALANCHAS DE ESCOMBROS

### **Definición**

Las avalanchas de escombros corresponden a grandes deslizamientos o derrumbes de rocas que pueden ocurrir cuando los flancos de un volcán se vuelven inestables. La inestabilidad de un volcán puede deberse al ascenso de una gran cantidad de magma en el edificio volcánico, a un sismo de gran magnitud en las cercanías del volcán, o al debilitamiento de la estructura interna del volcán inducida por ejemplo por la alteración *hidrotermal* de las rocas que lo conforman. Normalmente, el colapso del flanco de un volcán sucede por la combinación de varios factores y el volumen de la avalancha resultante puede ser muy variable (desde 0,01 hasta 15 km<sup>3</sup>). La inestabilidad de los flancos de un volcán se ve favorecida cuando sus pendientes exceden los 30° de inclinación. El colapso del flanco de un edificio y la avalancha de escombros pueden estar acom-

pañados por erupciones explosivas, dado que el gran deslizamiento puede destapar súbitamente el *conducto volcánico* y generar explosiones de extrema violencia conocidas como *blast*, que producen flujos piroclásticos de gran magnitud y alto poder destructivo.

Como resultado, una *avalancha de escombros* deja un *anfiteatro* de tamaño variable en el edificio volcánico que corresponde al sector del edificio que se derrumbó (por ejemplo, los anfiteatros de avalancha de los volcanes Guagua Pichincha y El Altar). Las avalanchas de escombros son flujos muy móviles, y sus depósitos pueden cubrir áreas de enorme extensión (10-1.000 km<sup>2</sup>), con un manto de escombros rocosos de varios metros de espesor que han arrasado con todo lo que se encontraba a su paso. Muchos *estratovolcanes* del planeta Tierra han sufrido, al menos una vez durante su historia geológica, un evento de este tipo; sin embargo, se debe recalcar que son fenómenos muy poco frecuentes en el tiempo (aproximadamente un evento cada varios miles de años o más durante la historia de un volcán).

En los casos del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, las configuraciones estructurales y geométricas de ambos volcanes no reúnen las condiciones para que se produzcan estos tipos de fenómenos. Sin embargo, las fuertes pendientes que tienen las paredes internas del cráter de ambos volcanes indican que eventos similares pero de menor magnitud pueden efectivamente ocurrir. En especial, en el caso del Pululahua, los deslizamientos o derrumbes que podrían ocurrir en las paredes internas del cráter son una amenaza potencial para los habitantes del interior del cráter.

## 4. Monitoreo de los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua

---

### ■ OBJETIVOS DEL MONITOREO

Uno de los objetivos principales de monitorear los volcanes potencialmente activos es poder anticiparse a la ocurrencia de erupciones, cuyos fenómenos asociados podrían representar alguna amenaza para la sociedad, sus individuos o sus infraestructuras. Este objetivo explica por qué algunos volcanes potencialmente activos son monitoreados, pero también por qué otros no lo son: si un volcán está suficientemente alejado de una sociedad, o si se considera que los fenómenos asociados a sus erupciones no son amenazantes, entonces no es prioritario monitorearlo. En ciertos casos, sin embargo, los volcanes potencialmente activos no son vigilados por otros motivos; por ejemplo, porque no se conoce suficientemente su historia geológica y se asume erróneamente que no son potencialmente activos, o porque se ha estimado que el próximo evento eruptivo está aún muy lejano y su probabilidad de ocurrencia en el corto y mediano plazos (años a décadas) es demasiado baja. Inversamente, en ciertos casos poco frecuentes, algunos volcanes son vigilados por puro interés científico, a pesar de que no representen amenazas para la sociedad.

El caso de los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua es sintomático de lo descrito arriba. Desde hace varias décadas se conoce que ambos volcanes son potencialmente activos (Hall, 1977; Barberi *et al.*, 1988; Hall y Mothes, 1994) y que los fenómenos asociados a sus erupciones podrían resultar muy peligrosos para amplios sectores de la sociedad ecuatoriana (Hall y Hillebrandt, 1987, 1988). Sin embargo, hasta el año

2010 ninguno de los dos volcanes ha contado con un sistema mínimo de monitoreo de su actividad. Las dos razones principales para explicar esta falta de monitoreo son: 1. Se ha estimado que es muy baja la probabilidad de ocurrencia de una erupción en el mediano plazo (próximas décadas) en el Atacazo-Ninahuilca o en el Pululahua; y, 2. Los recursos disponibles para monitoreo volcánico han sido destinados a volcanes cuya probabilidad de erupción es más alta en el corto plazo (por ejemplo, Cotopaxi) o a volcanes que han entrado en fases eruptivas (por ejemplo, Guagua Pichincha, Tungurahua, Reventador).

Entre los años 2011 y 2012, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional ha previsto finalmente instalar un sistema mínimo de monitoreo tanto en el Atacazo-Ninahuilca como en el Pululahua, gracias a un proyecto de investigación financiado por la SENESCYT del Ecuador. Este sistema de monitoreo permitirá obtener una línea de base de la actividad de ambos volcanes, con la cual se podrán identificar variaciones y anomalías en el futuro. Las técnicas de monitoreo que serán utilizadas en cada volcán están descritas en detalle más abajo.

Desde el punto de vista técnico-científico, el principal objetivo del monitoreo volcánico es detectar el ingreso de *magma* nuevo dentro de un edificio volcánico, el cual podría continuar su camino hacia la superficie y desembocar en una erupción. El ascenso de magma hacia la superficie es un proceso muy complejo y dificultoso, ya que debe abrirse paso por entre las formaciones rocosas que se encuentran sometidas a gran presión bajo la superficie del volcán. Así, la idea fundamental del monitoreo es que el ingreso de un cuerpo de magma dentro de un volcán provoca grandes perturbaciones y cambios físicos y químicos en el mismo, los cuales pueden ser medidos con téc-

nicas especiales y luego evaluados por personal competente. Esto permite conocer por anticipado sobre la potencial ocurrencia de una erupción en el futuro cercano.

El monitoreo de un volcán puede realizarse esencialmente por dos métodos: visual e instrumental.

## ■ MONITOREO VISUAL

Se denomina de esta forma a todas las observaciones realizadas en un volcán que no son asistidas por instrumentos de medición. En general, están basadas únicamente en los sentidos humanos y, por tanto, pueden ser descubiertas y descritas por cualquier individuo con capacidades normales, si bien su interpretación puede variar de individuo en individuo.

Cuando es realizado por un grupo de vulcanólogos, el monitoreo visual consiste en realizar observaciones de manera sistemática con el fin de determinar cambios como la formación de fracturas, deslizamientos o hinchamientos del edificio del volcán, del *cráter* activo o de sus flancos; la variación en las emisiones fumarólicas, como altura relativa de la nube de gases, color, olor, intensidad, etc.; o de cambios en el caudal, color, olor de las fuentes termales; el aumento o disminución de la temperatura en sitios determinados; la detección de daños o muerte de la vegetación; la percepción de cambios en el comportamiento de los animales, entre otros. Este método incluye, además, la percepción de ruidos subterráneos y temblores de origen volcánico.

Una vez que un volcán entra en erupción, el monitoreo visual es muy importante para la evaluación directa del progreso del evento y para la mejor interpretación de los datos obtenidos mediante el monitoreo instrumental (ver más abajo). La fuerza

del monitoreo visual depende en mucho del nivel de formación y de la experiencia acumulada por el observador.

Además de las observaciones que puedan ser hechas por los científicos, las personas que visiten a menudo un volcán pueden también percatarse de los cambios que ocurran a lo largo del tiempo en sus flancos o en su cráter. Con el fin de reportar y recibir estas valiosas observaciones, se incluye en el anexo 3 (ver más abajo) un formulario que puede ser utilizado por cualquier persona que desee aportar con sus propias observaciones a las tareas de vigilancia de los volcanes del Ecuador.

Sin embargo, el monitoreo visual es un método solamente cualitativo y por lo tanto subjetivo, ya que no utiliza instrumentos de medición. Esta característica puede dar lugar a serias confusiones, malentendidos e interpretaciones erróneas de las observaciones realizadas. Por eso, siempre que sea posible, es preferible que el monitoreo visual sea complementado y asistido por el monitoreo instrumental.

## ■ MONITOREO INSTRUMENTAL

Se denomina de esta manera a todas las observaciones que se realizan de forma sistemática en un volcán y que además son asistidas por instrumentos de medición. Los instrumentos que se pueden utilizar para vigilar un volcán son muy variados y van desde los más elementales como los termómetros o las cintas métricas, hasta instrumentos de altísima tecnología como los sismómetros de banda ancha, las cámaras termográficas y los satélites. Así mismo, hay instrumentos de medida que deben ser instalados de forma permanente en los mismos edificios volcánicos (por ejemplo, los sismómetros), otros que son transportados según las necesidades (como las cámaras termo-

gráficas) y otros que son utilizados en laboratorios especialmente adecuados (por ejemplo, algunos espectrómetros de masa). La frecuencia con la cual obtienen los datos también es muy amplia, y puede ir desde un dato por semana (como ciertas imágenes satelitales), hasta cientos de datos por segundo (por ejemplo, los sismógrafos).

A continuación, un resumen de los parámetros vigilados y los métodos instrumentales que serán utilizados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional para monitorear la actividad de los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua a partir de 2012.

## **La sismicidad**

Como ya se había dicho, el ascenso del *magma* es un proceso dificultoso, pues para llegar a la superficie tiene que abrirse paso por entre formaciones rocosas, a través de fracturas sometidas a gran presión (fig. 8a). Este proceso de ascenso puede ser especialmente arduo al principio de la reactivación de un volcán, que generalmente ocurre luego de un período de reposo que puede haber durado varias décadas. Así, el ascenso de magma da lugar a la ocurrencia de muchos sismos (*sismicidad*), los cuales pueden ser fácilmente detectados por medio de *sismómetros* instalados en las cercanías del volcán. Vale mencionar que cuando un volcán está “dormido” o inactivo, también se pueden producir sismos en su interior, pero su número y magnitud son pequeños respecto a cuando el volcán experimenta una inyección de magma nuevo o cuando ya ha entrado en erupción. En cualquier caso, la gran mayoría de los sismos volcánicos son totalmente imperceptibles por los sentidos humanos. Es fundamental instalar los sismógrafos en las épocas cuando el volcán se encuentre en período de reposo, ya

que esto nos permitirá reconocer más fácilmente las anomalías en la actividad sísmica que se presenten al momento de una inyección de magma nuevo.

Gracias a los sismógrafos se ha estudiado a profundidad la actividad sísmica de los volcanes de la Tierra desde hace varias décadas, y se ha llegado a determinar que los sismos más típicos son: 1. los volcano-tectónicos (VT); 2. los de largo período (LP); 3. los de tipo “tornillo”; y, 4. el tremor volcánico. Los sismos VT corresponden a la formación o propagación de fracturas al interior del volcán. Los sismos LP y los “tornillos” se generan por movimientos de corta duración de fluidos (gases o magma) en el interior del volcán, mientras que el tremor corresponde al movimiento o resonancia de larga duración de fluidos al interior de un volcán. Además, ocurren sismos llamados “híbridos” que corresponden, por ejemplo, a la formación de una fractura seguida de movimientos de fluidos al interior del volcán. Casi siempre, estos eventos sísmicos son de pequeña magnitud ( $< 3$  en la escala de *Richter*), pero proveen información fundamental sobre el estado de actividad del volcán. Muy a menudo, los primeros signos de reactivación de un volcán están representados por un claro aumento en los niveles de sismicidad del mismo (fig. 8b).

Otros signos de reactivación pueden venir dados por: 1. deformación de los flancos del volcán; 2. cambios composicionales en las emisiones gaseosas de las fumarolas y de las aguas termales; 3. cambios en la temperatura superficial; 4. cambios en los campos gravitacional, eléctrico y de esfuerzos de los volcanes. En el caso del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, en el corto plazo se utilizarán solamente técnicas orientadas al monitoreo de los tres primeros parámetros mencionados arriba.

## La deformación

El ascenso de un volumen de *magma* hacia la superficie es capaz de provocar “cambios en la forma” (deformación) del volcán (fig. 9). En principio, mientras más grande sea el volumen de magma inyectado y mientras más cerca se encuentre de la superficie, mayor será la deformación que se pueda producir. El fenómeno de deformación más comúnmente observado es que los flancos del volcán experimenten leves hinchamientos, aunque en ciertas ocasiones, si la cantidad de deformación es muy significativa, se pueden formar fracturas y grietas. Casi siempre, el hinchamiento de un volcán es imperceptible a los ojos humanos, ya que suele ser de tan solo unos pocos centímetros o decímetros, y por eso es necesario utilizar instrumentos de mucha precisión para detectarlo.

De entre las varias técnicas usadas en el mundo para medir la deformación de los volcanes, para los casos del Atacazo- Nihuilca y del Pululahua se ha decidido utilizar los receptores GPS (fig. 15). Estos instrumentos reciben constantemente datos muy precisos de su latitud, longitud y altura desde una extensa red de satélites que orbitan la Tierra, lo que permite realizar medidas con precisión de unos pocos centímetros. Esto a su vez permite detectar cualquier desplazamiento en tres dimensiones que se produzca a lo largo del tiempo en un punto determinado o fijo. Una limitación de los GPS es que miden la deformación de sectores puntuales, por lo que en el futuro será necesario complementar las medidas con receptores GPS adicionales y con técnicas de medida alternativas.

Uno de tales métodos alternativos es conocido como INSAR (Interferometría de Radar de Apertura Sintética, por sus siglas en inglés). Este método se basa en barridos de radar realizados a partir de satélites o aeronaves con los cuales se obtienen imá-

genes digitales muy detalladas de la superficie del terreno. Las posibles deformaciones se detectan cuando se compara medidas obtenidas en diferentes períodos de tiempo, pudiendo detectarse variaciones del orden de unos pocos centímetros sobre áreas de cientos de kilómetros cuadrados. Las ventajas de INSAR incluyen su gran cobertura y su independencia de las condiciones climáticas al momento de realizar las mediciones.

## **Las fumarolas y aguas termales**

Es muy común la ocurrencia de *fumarolas* y aguas termales en los alrededores de los volcanes, debido en parte a la pérdida de gases del *magma* en profundidad y/o por la interacción que tienen las aguas subterráneas con el magma a cierta profundidad. El ascenso de un volumen de magma nuevo puede provocar importantes cambios físicos y químicos en las fumarolas y aguas termales asociadas a un volcán, los mismos que pueden ser medidos y detectados con instrumentos apropiados.

Los cambios químicos en las aguas termales y fumarolas se detectan al realizar análisis químicos periódicos de las mismas, pero esto solamente es posible cuando las muestras de aguas o gases se pueden recolectar en sitios accesibles y seguros. Tanto en el Atacazo-Ninahuilca como en el Pululahua existen fuentes donde se realizan controles periódicos de las propiedades de las aguas (fig. 15). En esos sitios se realizan también mediciones de parámetros físicos tales como la temperatura, el caudal, la acidez-alcalinidad (pH), la conductividad, etc., siempre con la ayuda de instrumentos de medición adecuados.

Las fumarolas pueden a veces desarrollarse en sitios peligrosos o de muy difícil acceso, por ejemplo en el cráter del volcán, lo que dificulta hacer medidas directas. Para estos casos se utilizan instrumentos especiales conocidos como sensores remotos

que, como su nombre lo indica, realizan las medidas a distancia, sin contacto directo con las fumarolas. Para estos casos, el Instituto Geofísico de la EPN utiliza un *sensor remoto* portátil llamado **DOAS** (Differential Optical Absorption Spectrometer) que mide los contenidos dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en las emisiones gaseosas de los volcanes (fig. 16) (Arellano *et al.*, 2008). En el caso del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua, este instrumento no ha sido utilizado, ya que este tipo de fumarolas no se han desarrollado aún en esos volcanes.

### **La temperatura superficial**

Cuando un *magma* se acerca a la superficie puede provocar un aumento en la temperatura de la misma y de las fumarolas a proximidad, antes de que ocurra una erupción. Monitorear la temperatura superficial de un volcán por medidas directas es muy complicado y peligroso, por lo que el Instituto Geofísico de la EPN utiliza también en este caso un *sensor remoto* para realizar el trabajo: una cámara de imágenes termográficas (fig. 17). Esta cámara permite medir a distancia la temperatura de zonas geográficas relativamente grandes y es utilizada en varios otros volcanes del Ecuador, por ejemplo el Tungurahua, Cotopaxi, Sangay, Reventador y Guagua Pichincha (Ramón *et al.*, 2006; Ramón y Vallejo, 2010).

Este instrumento obtiene imágenes digitales de la temperatura superficial del terreno a partir de un sensor infrarrojo. Estas imágenes se vienen tomando desde el 2001, primero gracias a un convenio de cooperación entre el Instituto Geofísico y el BGR de Alemania, y actualmente gracias a un proyecto de investigación financiado por la SENESCYT del Ecuador.

## ■ EL MONITOREO VOLCÁNICO Y LA COMUNICACIÓN

En este capítulo hemos descrito los métodos de monitoreo y los diferentes parámetros que serán vigilados en los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua, con el fin de tener un mínimo de anticipación ante una reactivación de cualquiera de estos volcanes cuyas potenciales erupciones amenazan gravemente a la ciudad de Quito, en particular, y a la sociedad ecuatoriana en general. Sin embargo, como ha podido comprobarse en varios casos alrededor del mundo, hay dos puntos importantes que deben ser tomados en cuenta respecto al monitoreo.

En primer lugar, el monitoreo visual e instrumental, por sí solos, no garantizan que las erupciones volcánicas sean menos peligrosas. Todo trabajo de monitoreo por parte de los científicos (Instituto Geofísico) resultará completamente inútil si las observaciones, los resultados y las interpretaciones no son comunicados a las autoridades y a la población de forma oportuna y comprensible. Lo mismo sucederá si las autoridades y la población se muestran indiferentes ante los comunicados emitidos por los científicos oficialmente responsables del monitoreo (Instituto Geofísico).

En segundo lugar, es necesario recalcar que los resultados del monitoreo volcánico nunca serán 100% certeros debido a que las erupciones volcánicas y sus fenómenos asociados están controlados por muchas variables que no pueden ser tomadas en cuenta durante el monitoreo. Por ello **toda información sobre una erupción futura deberá ser emitida e interpretada como una probabilidad**, lo que implica directamente que **las autoridades, la población y los científicos deben estar listos para afrontar eventos de magnitud diferente a la esperada (más grandes o más pequeños), así como falsas alarmas.**

Para esto es necesario que tanto los científicos encargados del monitoreo como las autoridades y la población tengan un buen nivel de conocimiento en lo referente a fenómenos volcánicos peligrosos y vigilancia de volcanes. Especialmente la población que vive dentro o cerca de zonas de peligro volcánico debe ser consciente de la amenaza y aprender a vivir con ella, así como estar lista a reaccionar de manera razonable y planificada en caso de emergencia.

En general, la comunicación sobre los peligros volcánicos puede ser dividida en tres etapas principales: 1. **antes del evento**, 2. **durante el evento**, y 3. **después del evento**. Sin duda que lo más trascendental es mantener comunicación **antes del evento**, ya que este período puede ser bastante largo (meses, años y hasta décadas) y permitiría el diseño, implementación, práctica y evaluación de planes de contingencia y emergencia, con la asistencia de los científicos que pueden aportar con ideas, opiniones y datos importantes.

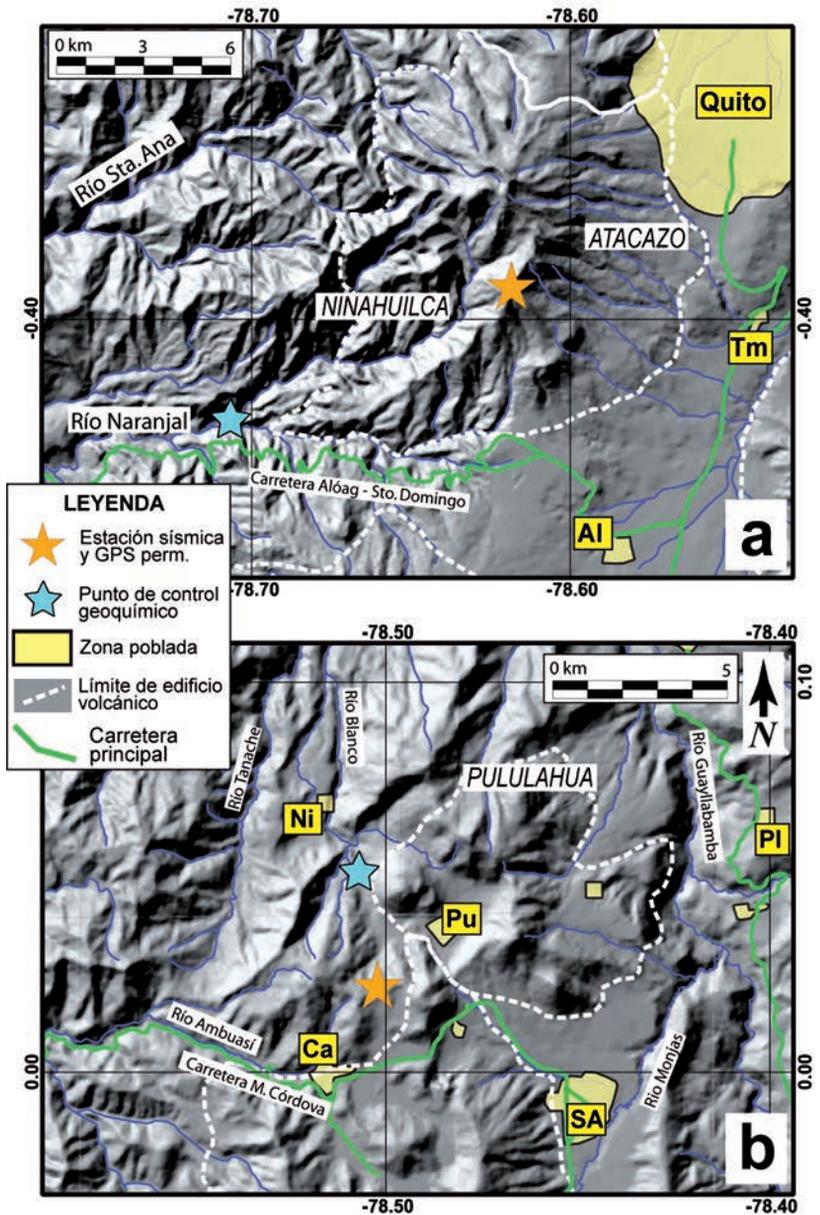
En cambio, **durante** y **después del evento**, la comunicación con los científicos será siempre más complicada, primero por el propio estado de crisis y segundo porque los científicos tendrán la mayor parte de su tiempo y energías consagrados al monitoreo y a la evaluación de la erupción en marcha. En estas etapas, la comunicación de los científicos con las autoridades y la población será más típicamente llevada a cabo mediante avisos de alerta, boletines informativos y conferencias de prensa.

En el caso específico de los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua, actualmente nos encontramos en la etapa de “**antes del evento**”, y por eso, a modo de ejercicio de comunicación, nos permitimos hacer algunas preguntas al lector:

- ¿Conoce sobre los peligros volcánicos potencialmente asociados a las erupciones del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua?

- ¿Conoce los peligros volcánicos que amenazan las zonas donde usted y su familia viven, trabajan, se educan o se recrean?
- ¿Tiene o conoce usted algún plan de emergencia en caso de que ocurriera una erupción volcánica?
- ¿Sabe usted por qué medios se le comunicaría en caso de que una gran erupción sea inminente?

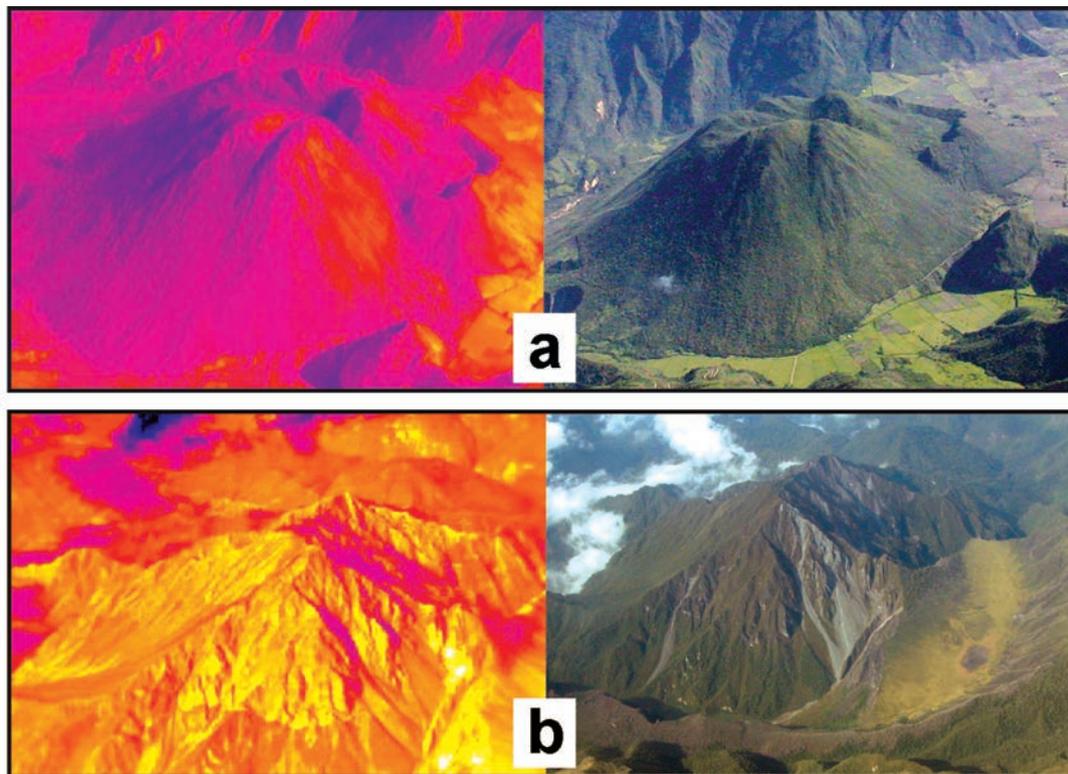
Es nuestro deseo que la presente obra ayude a responder algunas de estas importantes preguntas, pero las otras solamente pueden ser respondidas con la participación responsable y decidida de las autoridades y la población. El deber principal del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional es vigilar y comunicar sobre los peligros volcánicos en el Ecuador. Los medios para mantener la comunicación deben ser exigidos por la población y proveídos por las autoridades.



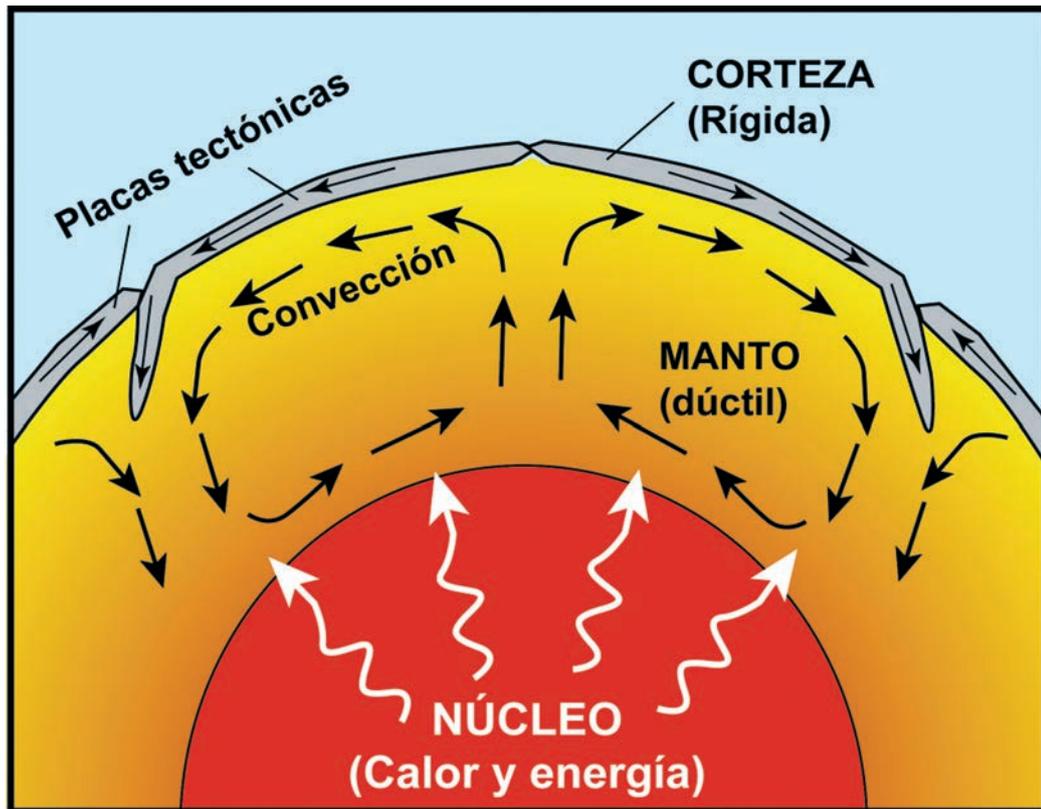
**Figura 15.** Mapa con la ubicación de los instrumentos de monitoreo sísmico y de deformación que serán instalados de forma permanente en el Atacazo-Ninahuilca y en el Pululahua en 2012. También se incluyen los sitios donde se realizan medidas de control geoquímico en fuentes de agua.



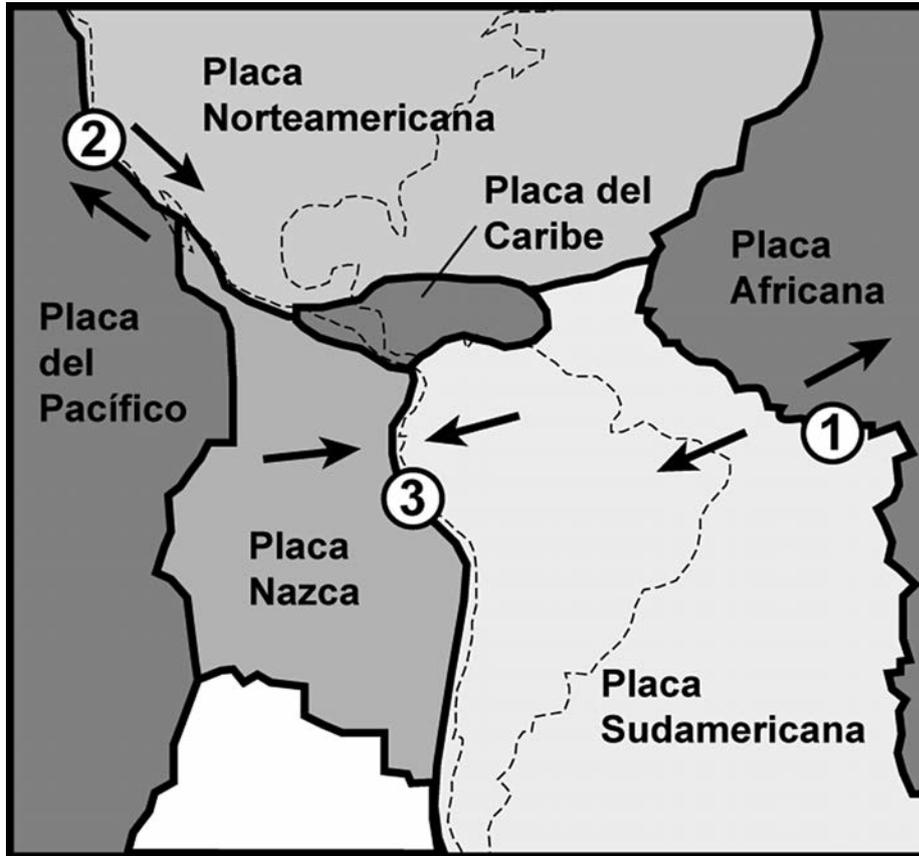
**Figura 16.** Medición de emisiones gaseosas en el volcán Reventador con el *sensor remoto* portátil DOAS (Espectrómetro de Absorción Óptica Diferencial, por sus siglas en inglés). Este instrumento mide a distancia el contenido de gases magmáticos en las emisiones volcánicas y por sus características puede ser rápidamente utilizado en cualquier volcán (foto por D. Andrade).



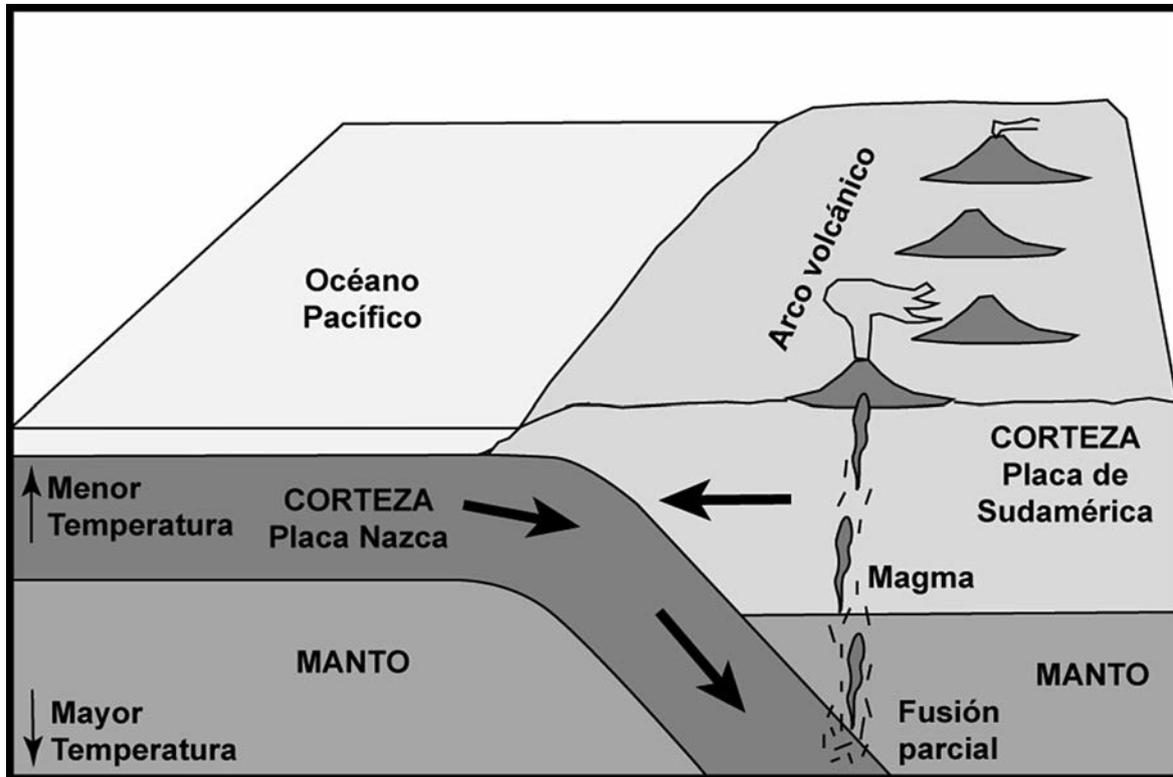
**Figura 17.** Fotogramas térmico (izquierda) y natural (derecho) del a) domo Pondoña del Pululahua y b) domo Ninahuilca Chico II, obtenidos durante sobrevuelos de vigilancia (fotos por P. Ramón). Los colores más claros en los fotogramas térmicos reflejan temperaturas más altas. En ninguno de los casos se notan temperaturas elevadas ( $>30^{\circ}$ ). La cámara termográfica es un sensor remoto que permite medir temperaturas superficiales.



**Figura 18.** Corte esquemático a través de la Tierra. Se presentan las principales capas que conforman el interior del planeta. El espesor de la corteza es de apenas entre 10 y 100 km, mientras que el manto tiene un espesor de 2.900 km y el núcleo uno de 3.500 km.



**Figura 19.** Representación de las diferentes “placas tectónicas” presentes en la zona de América. Las líneas gruesas representan los límites de las placas. Estos límites pueden ser de tres tipos: 1. de divergencia (las placas Sudamericana y Africana se separan una de la otra); 2. de Transcurrencia (la placa del Pacífico se desliza junto a la placa de Norteamérica a lo largo de la falla de San Andrés); y, 3. de convergencia (la placa Nazca se subduce por debajo de la Sudamericana).



**Figura 20.** Corte esquemático que representa la subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana. Al llegar a zonas del manto que tienen alta temperatura, la placa Nazca se funde parcialmente y da lugar a la formación de magmas. Estos magmas forman volcanes al llegar a la superficie.

## 5. Potenciales escenarios eruptivos futuros

---

**E**n los capítulos precedentes hemos mostrado que tanto el Atacazo-Ninahuilca como el Pululahua han tenido largas y complejas historias de desarrollo. En especial, hemos aprendido que ambos volcanes han tenido varias erupciones durante el período Holoceno (últimos 12 mil años), por lo que son calificados como volcanes potencialmente activos, y que los magmas involucrados en dichas erupciones siempre han sido de tipo *dacítico*. Este conocimiento ha sido adquirido a lo largo de los últimos siglos, en base a estudios históricos, geofísicos, geoquímicos y vulcanológicos. Sin embargo, no cabe duda de que los más importantes avances en el conocimiento del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua han tenido lugar en los últimos 25 años.

Basados en estos conocimientos, vamos a describir brevemente los potenciales escenarios que se podrían esperar en futuras erupciones de estos volcanes. Es importante hacer notar al lector que las descripciones que se darán a continuación no pretenden representar de manera exacta los eventos que ocurrirían durante las diferentes posibles erupciones del Atacazo-Ninahuilca o del Pululahua. Más bien, se debe considerar a las siguientes descripciones como “ejemplos discretos” correspondientes a una escala continua, dentro de cuyo rango pueden ocurrir todas las posibilidades intermedias. Así, los tres principales escenarios para las futuras erupciones del Atacazo-Ninahuilca y del Pululahua serían los siguientes:

## ■ ESCENARIO 1: EVENTO PEQUEÑO Y POCO EXPLOSIVO (V.E.I. = 1-2)

Se trata de un evento poco explosivo, caracterizado por la erupción de un domo de lava dacítica, de volumen inferior a aproximadamente 100 millones de m<sup>3</sup>. Un evento de este tipo podría estar acompañado de explosiones de pequeña magnitud, con generación de nubes de ceniza, y de flujos *piroclásticos* de bloques y ceniza generados a partir del domo recién erupcionado. Tanto las nubes de ceniza como los flujos de bloques y ceniza serían de tamaños modestos. Este escenario puede ser considerado como un predecesor de cualquiera de los dos escenarios descritos más abajo.

Este escenario sería muy similar, en cuanto a los fenómenos asociados y a su magnitud, al evento volcánico ocurrido en diciembre de 1999 en el Guagua Pichincha, el cual, sin embargo, provocó importantes estragos en la ciudad de Quito. Eventos de la misma magnitud, originados en el Atacazo-Ninahuilca o en el Pululahua, provocarían perturbaciones similares en la ciudad de Quito, es decir exclusivamente asociadas a leves lluvias de ceniza sobre la ciudad. Las zonas más probables donde podrían ocurrir nuevas erupciones de domos corresponderían a los grandes cráteres de ambos volcanes, lo cual implica, al igual que en el caso del Guagua Pichincha, que los flujos de bloques y ceniza que se generen en el domo no tendrían ninguna posibilidad de afectar la ciudad de Quito. En el caso específico del Pululahua, incluso este escenario de erupción menor implicaría la evacuación de la gente que actualmente habita en el interior del cráter.

Debido a su reducido tamaño y a la acción de la erosión, las erupciones de este tipo casi no dejan evidencias geológicas (depósitos rocosos), lo que se confirma por ejemplo al constatar

que casi todos los depósitos de la erupción del Guagua Pichincha de 1999 ya han desaparecido. Esto nos sugiere que es muy posible que hayan ocurrido eventos de este tamaño por varias ocasiones en el pasado en el Atacazo-Ninahuilca y en el Pululahua, pero que no los conozcamos, ya que sus depósitos han sido borrados por la erosión.

## ■ **ESCENARIO 2: EVENTO MODERADO Y EXPLOSIVO (V.E.I. = 3-4)**

Este escenario considera la erupción de un domo de lava dacítica, de volumen mayor a 100 millones de m<sup>3</sup>, que estaría acompañado por eventos explosivos de magnitud moderada a grande. En este caso, se podría esperar que ocurran importantes lluvias de ceniza y piroclastos, flujos piroclásticos de bloques y ceniza, e incluso flujos piroclásticos de pómez. El retrabajamiento de estos depósitos con el agua de las lluvias podría dar lugar a la formación de lahares secundarios de tamaño importante.

Una erupción de esta magnitud presentaría características similares a la ocurrida en el volcán Reventador en noviembre-diciembre de 2002 (VEI = 4) (Hall *et al.*, 2004). Así, las lluvias de ceniza y piroclastos podrían tener un fuerte impacto sobre la ciudad de Quito, donde podrían esperarse hasta unos pocos centímetros de acumulación de ceniza, y además podrían también afectar a extensas zonas ubicadas hacia el occidente de los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua, incluyendo la región costera del Ecuador. El alcance de los flujos piroclásticos de bloques y ceniza, y de los flujos piroclásticos de pómez, seguiría estando confinado por las paredes de los respectivos cráteres de ambos volcanes, lo que impediría que los mismos alcancen las zonas pobladas del sur de Quito (en el caso del Atacazo-Ninahuilca) o de San Antonio de Pichincha (en el caso del Pululahua). Sin em-

bargo, las poblaciones que se encuentren ubicadas en los cursos altos de los principales drenajes que se originan en ambos volcanes (ríos Naranjal y Quitasol, en el caso del Atacazo-Ninahuilca; Nieblí y el interior del cráter, en el caso del Pululahua) deberían ser evacuadas como medida de precaución ante la ocurrencia de flujos piroclásticos o ante la formación de lahares secundarios de tamaño grande.

A pesar de los varios estudios realizados, no se han encontrado aún evidencias de que el Atacazo-Ninahuilca haya tenido erupciones de esta magnitud durante el Holoceno. Esto sugiere que la probabilidad de este escenario parece menor en el caso del Atacazo-Ninahuilca. Por el contrario, las cuatro últimas erupciones ocurridas en el Pululahua, entre 2.400 y 2.200 años AP, durante las cuales se formaron los domos de lava que se encuentran al interior del cráter (figs. 6 y 7a), corresponden ciertamente a este escenario. Esto indica que la probabilidad de este escenario es importante en el caso del Pululahua.

### ■ **ESCENARIO 3: EVENTO GRANDE Y MUY EXPLOSIVO (V.E.I. = 5-6)**

Para el caso del volcán Atacazo-Ninahuilca, este escenario corresponde a un evento similar a cualquiera de las erupciones holocénicas ya descritas para este volcán, en especial a las erupciones N5 y N6 (ver capítulo 2). Para el caso del Pululahua, este escenario corresponde a cualquiera de las erupciones ocurridas entre 2.500 y 2.400 años AP, en especial las E1 y E4, las cuales dieron lugar a la formación del gran cráter de este volcán (ver capítulo 2). En ambos casos, los principales fenómenos asociados serían grandes erupciones explosivas que provocarían extensas caídas de ceniza y *piroclastos*, así como grandes flujos piroclásticos de *pómez*. En este tipo de eventos

no se espera que se formen nuevos domos de lava, sino más bien que los ya existentes sean destruidos total o parcialmente por la fuerza de las explosiones. La ocurrencia de lluvias simultáneas o posteriores a la fase eruptiva daría lugar a la formación de lahares secundarios, los cuales podrían alcanzar volúmenes significativos, dada la cantidad de nuevo material volcánico disponible para la removilización.

Durante la historia escrita del Ecuador, es decir durante los últimos cinco siglos, no ha ocurrido ninguna erupción de magnitud que pueda ser comparable a las correspondientes a este tercer escenario. A nivel internacional, tal vez el único ejemplo reciente sea la erupción del volcán Pinatubo (Filipinas) en 1991. Esta erupción fue la más grande ocurrida en el planeta Tierra durante el siglo XX (VEI = 6) y produjo grandes daños en la isla de Luzón (Filipinas), donde cerca de 8 mil casas fueron totalmente destruidas y otras 73 mil fueron afectadas por causa de las abundantes caídas de ceniza, los flujos piroclásticos de pómez y los grandes lahares secundarios (Newhall y Punongbayan, 1996). Antes de que ocurra la fase eruptiva principal, fue necesario evacuar cerca de 380 mil personas que vivían en las cercanías del volcán Pinatubo; a pesar de este impresionante número de evacuados, el número total de muertes asociadas directamente a la erupción fue de alrededor de 800 víctimas, debido a que el sistema de monitoreo del volcán permitió que la erupción sea pronosticada y así se pueda evacuar a la gran mayoría de la población. El impacto de esta erupción se pudo sentir en todo el mundo, ya que las emisiones de gases asociadas fueron tan importantes que formaron una gruesa capa de *aerosoles* en la alta atmósfera de la Tierra que bloqueó parcialmente los rayos del sol durante varios meses, lo que produjo que las temperaturas ambientales globales bajaran en 0,5 °C.

Si se llegara a considerar como inminente un escenario como el presente, sería necesaria la evacuación inmediata de extensas

zonas debido a que estarían amenazadas por flujos piroclásticos de pómez y lahares secundarios de gran magnitud. En el caso del Atacazo-Ninahuilca, las zonas a evacuarse incluirían el sur de Quito y las poblaciones ubicadas en las cercanías de los sistemas de drenaje Quitasol-Naranjal-Pilatón, Saloya y Santa Ana, por ejemplo Tandapi, Alluriquín y Chiriboga, mientras que en el caso del Pululahua, sería necesaria la evacuación de las poblaciones de San Antonio de Pichincha, Calacalí y Nieblí (figs. 11 y 14). Dependiendo de la dirección de los vientos al momento de la erupción, Quito podría ser afectada con caídas de cenizas y piroclastos que podrían acumularse hasta varios centímetros de espesor, y toda la zona costera del Ecuador ubicada al occidente de los volcanes sería afectada por importantes caídas de ceniza.

Dado que este escenario ha tenido lugar recientemente y de forma repetitiva tanto en el Atacazo-Ninahuilca como en el Pululahua, se puede considerar que su probabilidad de ocurrencia sería relativamente alta la próxima vez que cualquiera de los dos volcanes entre en erupción. Esta conclusión, que ha sido conocida desde hace varias décadas, viene acompañada por una pregunta consecuente: ¿cuándo se espera la próxima erupción? Esta pregunta es muy común, pero dado que no es posible dar una respuesta absoluta, la misma debe ser replanteada de la siguiente forma: ¿qué tan probable es una erupción dentro de un año? ¿Dentro de 10 años? ¿Dentro de 100 años? Los estudios vulcanológicos llevados a cabo en el Atacazo-Ninahuilca y en el Pululahua solamente pueden responder de forma parcial a estas preguntas, y nos indican que dentro de los próximos siglos, la probabilidad de ocurrencia de una erupción en el Atacazo-Ninahuilca o en el Pululahua es bastante alta. Para períodos más cercanos no se puede dar una respuesta certera, por lo que es necesario que se implemente un sistema de monitoreo que nos prevenga sobre cambios rápidos y significativos en la actividad de estos volcanes, los cuales podrían ser los precursores de una erupción.

## 6. Referencias

---

- Águila, C.,  
1986 “Geovulcanología del complejo Pululahua-Casitahua y sus implicaciones geotérmicas, provincia de Pichincha, Ecuador”, tesis inédita, Quito, Universidad Central del Ecuador, 89 pp.
- Aguilera, E., M.T. Pareschi, M. Rosi y G. Zanchetta,  
2004 “Risk from lahars in the Northern valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador)”, en *Natural Hazards*, vol. 33, pp. 161-189.
- Almeida, E.,  
1996 “Dinámica de las erupciones del volcán Ninahuilca”, 7mo. Congreso de Geología, Minas, Petróleo y Medio Ambiente, Quito, Ecuador.
- Andrade, D.,  
2002 “Estudio geovulcanológico del complejo volcánico Pululahua”, tesis de Ingeniería, Quito, Escuela Politécnica Nacional, 186 pp.
- Andrade, D., M. Hall, P. Mothes, L. Troncoso, J.-P. Eissen, P. Samaniego, J. Egred, P. Ramón, D. Rivero y H. Yepes,  
2005 *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*, Serie Los peligros volcánicos en Ecuador, No. 3, Quito, IG-EPN / IRD / Corporación Editora Nacional, 148 pp.
- Arellano, S., M. Hall, P. Samaniego, J.-L. Le Pennec, A. Ruiz, I. Molina y H. Yepes,  
2008 “Degassing patterns of Tungurahua volcano (Ecuador) during the 1999-2006 eruptive period, inferred from remote spectroscopic measurements of SO<sub>2</sub> emissions”, en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.05.017
- Barberi, F., M. Coltelli, G. Ferrara, F. Innocenti, J. M. Navarro y R. Santacroce,  
1988 “Plio-Quaternary volcanism in Ecuador”, en *Geological Magazine* 125 (1), pp. 1-14.

- Barberi, F., M. Coltelli, A. Frullani, M. Rosi y E. Almeida,  
1995 “Chronology and dispersal characteristics of recently (last 5 000 years) erupted tephra of Cotopaxi (Ecuador): implications for long-term eruptive forecasting”, en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 69, pp. 217-239.
- Hall, M.,  
1977 *El volcanismo en el Ecuador*, Quito, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Sección Nacional del Ecuador.
- Hall, M., y P. Mothes,  
1994 “Tefroestratigrafía Holocénica de los volcanes principales del Valle Interandino, Ecuador”, en René Marocco, coord., *El contexto geológico del espacio físico ecuatoriano*, Estudios de Geografía, No. 6, Quito, Colegio de Geógrafos del Ecuador/Corporación Editora Nacional, pp. 47-67.
- 2008 “The rhyolitic-andesitic history of Cotopaxi volcano, Ecuador”, en *Bulletin of Volcanology*, No. 70, pp. 675-702.
- Hall, M., P. Ramón, P. Mothes, J.-L. Le Pennec, A. García, P. Samaniego y H. Yepes,  
2004 “Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador’s surprise November 3, 2002 eruption, Ecuador”, en *Revista Geológica de Chile* 31 (2).
- Hall, M., y C. von Hillebrandt,  
1987 “Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Pululagua (1:50000)”, Proyecto Undro-EPN, IG-EPN, Quito.
- 1988 “Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Atacazo-Ninahuilca (1:50000)”, Proyecto Undro-EPN, IG-EPN, Quito.
- Hidalgo, S.,  
2006 “Les interactions entre magmas calco-alcalins “classiques” et adakitiques: exemple du complexe volcanique Atacazo-Ninahuilca (Equateur)”, tesis de doctorado, Clermont-Ferrand-Francia, Université Blaise Pascal, 333 pp.
- Hidalgo, S., M. Monzier, E. Almeida, J.P. Eissen, J. van der Plicht, G. Chazot y M. Hall,  
2008 “Late Pleistocene to Holocene activity of Atacazo-Ninahuilca Volcanic Complex”, en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.05.017

- Humboldt, A. von,  
1810 *Vues des cordillères et monuments des peuples indigènes de l'Amérique*, Paris.
- LePenneq, J.-L., P. Samaniego, J.-P. Eissen, M. Hall, I. Molina, C. Robin,  
P. Mothes, H. Yepes, P. Ramón, M. Monzier y J. Egred,  
2005 *Los peligros volcánicos asociados al Tungurahua*, Serie Los peligros volcánicos en Ecuador, No. 1, IG-EPN / IRD / Corporación Editora Nacional, 2a. ed., 122 pp.
- Martínez, A. N.,  
1930 “Contribuciones para el conocimiento geológico de la región volcánica del Ecuador”, en *Pioneros y precursores del andinismo ecuatoriano*, t. III, Colección Tierra Incógnita, vol. 13, Quito, Abya-Yala (1994).
- Maruri, R.,  
1994 “Estudio vulcanológico del volcán Ninahuilca, provincia de Pichincha”, tesis de ingeniería, Quito, Escuela Politécnica Nacional, 126 pp.
- Meyer, H.,  
1907 *En los altos Andes del Ecuador*, Colección Tierra Incógnita vol. 3, Quito, Abya-Yala (1993).
- Mothes, P., M. Hall, D. Andrade, P. Samaniego, T. Pierson, G. Ruiz y H. Yepes,  
2006 *Character, stratigraphy and magnitude of historical lahars of Cotopaxi Volcano (Ecuador)*, Acta Vulcanológica, vol. 16, pp. 1-2.
- Nairn, I. A.,  
1991 “Volcanic hazards of Okataina Volcanic Center”, en *Volcanic Hazards Information Series*, No. 2, New Zealand Ministre of Civil Defense, p. 29.
- Neall, V. E., B. F. Houghton, S. J. Cronin, S. L. Donoghue, K. A. Hodgson,  
D. M. Johnson, J. A. Lecointre y A. R. Mitchel,  
1999 “Volcanic Hazards at Ruapehu Volcano”, en *Volcanic Hazards Information Series*, No. 8, New Zealand Ministre of Civil Defense, p. 30.
- Newhall, C., y R. Punongbayan, edits.,  
1996 *Fire and Mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, PHIVOLCS / University of Washington Press, USA.

- Newhall, C., y S. Self,  
1982 “The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical eruptions”, en *Journal of Geophysical Research*, No. 87, pp. 1231-1238.
- Papale, P., y M. Rosi,  
1993 “A case of no-wind plinian fallout at Pululagua caldera (Ecuador): implications for models of clast dispersal”, en *Bulletin of Volcanology*, No. 55, pp. 523-535.
- Ramón, P., D. Rivero, F. Böker y H. Yepes,  
2006 “Thermal monitoring using a portable IR camera: Results on Ecuadorian volcanoes”, en *Cities on Volcanoes 4 Conference. Extended Abstracts*, Quito, Ecuador.
- Ramón, P., y S. Vallejo,  
2010 “Thermal images as a useful tool to map recently emitted lava flows: examples on Reventador volcano”, en *Cities on Volcanoes 6 Conference. Extended Abstracts*, Tenerife, Spain.
- Sauer, W.,  
1965 *Geología del Ecuador (primera edición castellana)*, Quito, Editorial del Ministerio de Educación.
- Simkin, T., y L. Siebert,  
1994 *Volcanoes of the World*, Washington D.C., Geosciences Press, Inc., p. 349.
- Stübel, A.,  
1897 *Die Vulkanberge von Ecuador (Las montañas volcánicas del Ecuador)*, Quito, Banco Central del Ecuador/UNESCO (2004), 510 pp.
- Vallejo, S.,  
2011 “Distribución de las cenizas volcánicas holocénicas-tardías en la Costa del Ecuador”, tesis de ingeniería, Quito, Escuela Politécnica Nacional, 251 pp.
- 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)”, en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.03.011.
- Wolf, T.,  
1892 *Geografía y Geología del Ecuador*, Quito, Casa de la Cultura Ecuatoriana (1975), 798 pp.

## 7. Glosario

---

**Aerosol:** Conjunto de partículas sólidas o líquidas de una sustancia química que se encuentran en suspensión en un medio gaseoso.

**AFM:** Siglas en inglés de Acoustic Flow Monitor (Monitor Acústico de Flujo). Son instrumentos sísmicos que registran frecuencias de vibración del suelo de entre 10 y 300 Hz. Estas características permiten detectar el movimiento de flujos lodosos y lahares por un drenaje o quebrada.

**Análisis isotópico:** Se refiere a los análisis instrumentales que tienen como objetivo medir el contenido de ciertos isótopos en un material. También son los análisis matemáticos que se hacen con las medidas de contenidos de isótopos, con el fin de obtener informaciones adicionales, como edades o condiciones de formación, de un material (por ejemplo, rocas volcánicas).

**Andesita:** Roca de origen volcánico de color gris medio, que contiene entre 53 y 62% en peso de sílice y presenta comúnmente minerales como piroxenos olivino y plagioclasas. El color, la composición química, la vis-

cosidad y el carácter eruptivo son intermedios entre un *basalto* y una *dacita*. Es el caso de la mayoría de rocas del volcán Antisana actual. **Andesítico:** relativo a las andesitas.

**Anfiteatro:** Hemiciclo. Edificación de figura redonda, con graderíos alrededor, en el cual se celebran diversos espectáculos. En el caso de los volcanes, corresponde a la morfología que queda en un volcán luego de un colapso de flanco de gran magnitud.

**AP:** Siglas utilizadas en ciencias de la Tierra para abreviar “antes del presente”. Dado que el tiempo geológico es muy largo, se considera al “presente” como correspondiente al año de 1950.

**Avalanchas de escombros:** Deslizamientos volcánicos. Mezclas secas o húmedas, incoherentes y caóticas de suelo y escombros de rocas volcánicas que fluyen o se deslizan desde su fuente a alta velocidad. Ocurren ocasionalmente en estrato-volcanes y están entre los fenómenos volcánicos más peligrosos. Pueden alcanzar volúmenes de entre 0,1 y 10 km<sup>3</sup>.

**Balístico (fragmento):** Fragmento de roca expulsado violentamen-

te por una explosión volcánica y que sigue una trayectoria balística, en forma de parábola.

**Basalto:** Roca de origen volcánico de color gris muy oscuro, que contiene menos de 53% de sílice. En estado fundido presenta una baja viscosidad, que implica una erupción generalmente no explosiva que produce flujos de lava que fluyen con relativa facilidad (por ejemplo, islas Galápagos). **Basáltico:** relativo a los basaltos.

**Blast:** Explosión volcánica de gran escala y extrema violencia, que ocurre en dirección horizontal y que es producida por la despresurización súbita de un cuerpo de magma cercano a la superficie. Este fenómeno puede deberse a un deslizamiento de una parte de un edificio volcánico. Un “blast” es una mezcla caliente de baja densidad de fragmentos de roca, ceniza y gases que se mueve a altas velocidades a través de la superficie terrestre.

**Bombas y bloques volcánicos:** Se refiere a cualquier piroclasto de tamaño superior a 64 mm, expulsado por una explosión volcánica. Si son expulsados en estado sólido se denominan bloques, mientras que si son expulsados en estado semisólido o plástico se denominan bombas.

**Caldera:** Gran depresión de origen volcánico, generalmente de forma circular o elíptica, de varios kilómetros hasta varias decenas de kilómetros de diámetro, formada durante gigantescas erupciones volcánicas. La depresión (o anfiteatro) formada por el deslizamiento de un flanco de un volcán (colapso de flanco) se denomina **caldera de avalancha**.

**Cangahua:** Nombre atribuido a un tipo de depósito volcánico muy común en los Andes del centro y norte del Ecuador. Se caracteriza por ser un suelo rico en materiales volcánicos y pobre en materiales orgánicos, de color caqui a café muy claro, moderadamente endurecido y con espesores de varios metros. Es común encontrar depósitos de erupciones intercaladas en su interior. Se ha estimado que la cangahua se depositó bajo condiciones atmosféricas frías y secas, durante un período de tiempo comprendido entre los 200 mil y los 10 mil años antes del presente.

**Ceniza volcánica:** Fragmentos de roca volcánica de tamaño menor a dos milímetros, expulsados a la atmósfera durante las explosiones volcánicas.

**Columna eruptiva:** El material piroclástico expulsado por una explosión volcánica puede ascender verticalmente desde el

cráter impulsado por su gran energía térmica y formar una corriente ascendente conocida como columna eruptiva.

**Conducto volcánico:** Pasaje subterráneo por el cual el magma asciende desde una cámara magmática hacia la superficie. Normalmente se trata de una serie de fracturas interconectadas.

**Cráter:** Depresión de forma aproximadamente circular de menos de 2 km de diámetro, con paredes internas muy empinadas, generalmente ubicada en la cima de un volcán. Se forma por las explosiones o los colapsos asociados a las erupciones volcánicas.

**Dacita:** Roca de origen volcánico de color gris claro, cuyos contenidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) varían entre 63 y 68% peso. Los magmas dacíticos presentan generalmente una alta viscosidad. Las erupciones de magmas dacíticos son generalmente explosivas (por ejemplo, Guagua Pichincha) y pueden producir enormes lluvias de ceniza, flujos piroclásticos y domos de lava.

**Datación radiométrica:** Método que permite determinar la edad de un material (por ejemplo, una roca o un hueso) en base al decaimiento radiactivo de diferentes elementos cuyas concentraciones se obtienen mediante

análisis químicos (como Carbono-14).

**DOAS:** Siglas en inglés de Differential Optical Absorption Spectrometer (Espectrómetro de Absorción Óptica Diferencial). Sensor remoto que se utiliza en vulcanología para medir el contenido de ciertas especies químicas (por ejemplo,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) en las emanaciones gaseosas de los volcanes.

**Domo:** Topografía en forma de colina, de pendientes fuertes ( $> 25^\circ$ ), relieves de entre decenas a centenas de metros, formado por la acumulación de lava de alta viscosidad, que no pudo fluir lejos del punto de emisión. Generalmente, los domos están formados por lavas de composición andesítica, dacítica o riolítica.

**Drenaje:** Parte o totalidad del sistema fluvial que permite la concentración y la evacuación de las aguas de una región.

**Efusivo(a):** Se refiere a un magma que alcanza la superficie en estado total o parcialmente fundido y sin provocar explosiones que consigan fragmentarlo.

**Escoria:** Fragmentos de roca volcánica formados cuando pequeños volúmenes de lava (generalmente basaltos o andesitas), aún en estado líquido, son expulsados

hacia la atmósfera durante explosiones discretas, se enfrían en el aire y caen en forma de fragmentos oscuros rellenos de cavidades como una espuma solidificada.

**Estratigrafía:** Sucesión de depósitos sedimentarios generalmente divididos en capas. En la sucesión, normalmente es posible establecer al menos un orden cronológico relativo en que las capas fueron depositadas.

**Estratovolcán:** Edificio volcánico de forma cónica, de flancos con pendientes fuertes ( $>20^\circ$ ) construido por el apilamiento de coladas de lava y capas de ceniza/escoria emitidas en sucesivas erupciones.

**Estromboliana(o):** Tipo de erupción volcánica caracterizada por la ocurrencia periódica y constante de explosiones discretas de pequeña magnitud. En este tipo de erupción existe una importante producción de ceniza y escoria, la cual se acumula en los alrededores del cráter para formar un cono (cono de escoria o cono estromboliano). Este término proviene del volcán Stromboli (Italia) donde este tipo de actividad ocurre de forma permanente.

**Flujo piroclástico:** Es un nombre genérico que se utiliza en vulca-

nología para designar a varios tipos de avalanchas de rocas, ceniza y gases volcánicos calientes que pueden producirse durante una erupción. Generalmente son flujos veloces ( $>60$  km/h) y de alta temperatura ( $>200$  °C). Hay varios tipos, entre los cuales destacan los flujos de pómez (o ignimbritas), flujos de escoria, flujos de bloques y ceniza, flujos de ceniza. También se utiliza el término “flujo piroclástico” para designar al depósito rocoso dejado por estos flujos.

**Freático(a):** Explosión de vapor, agua y otros materiales, resultado del calentamiento del agua subterránea y de la acumulación de vapor en niveles bajo la superficie. Este tipo de erupción ocurre cuando el agua subterránea entra en contacto con rocas calientes en las cercanías de un cuerpo de magma. En este tipo de erupción el magma no se encuentra involucrado.

**Freato-magmático(a):** Explosión volcánica que envuelve gases magmáticos y vapor, combinados con lava y otros fragmentos de roca. Este tipo de actividad volcánica es el resultado de la interacción entre el agua subterránea, del mar o de un lago, y el magma.

**Fumarola:** Emanación de gases y vapor de agua, generalmente a altas temperaturas, que salen a la superficie a través de fracturas o grietas de un volcán o de una zona con actividad volcánica. El mayor volumen de los gases emitidos corresponde a vapor de agua, sin embargo, se encuentran también otras especies gaseosas como CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, HCl, etc.

**Glaciar:** Gran masa de hielo formada por la acumulación de nieve en períodos de tiempo relativamente largos. Son capaces de moverse lentamente de manera similar a un fluido viscoso.

**Hidrotermal:** Relacionado con las fuentes o sistemas de aguas termales o con la acción de dichos fluidos. Se denomina **alteración hidrotermal** a las transformaciones que sufren las rocas o minerales por acción de los fluidos (agua y gases) calientes asociados a un cuerpo de magma.

**Holoceno:** Es la época más reciente de la división geológica del tiempo, y corresponde oficialmente a los últimos 11.800 años de historia de la Tierra.

**Hummock:** Montículo o pequeña colina constituida por una secuencia de depósitos rocosos de un volcán que han sido transportados por una avalancha.

**Ignimbrita:** Depósito consolidado o semiconsolidado de un flujo piroclástico de gran volumen y extensión (>1 km<sup>3</sup>).

**Isótopo:** Átomo de un elemento químico que se caracteriza por tener una cantidad diferente de neutrones en su núcleo, con respecto a los protones.

**ka:** Símbolo utilizado en varias ciencias para abreviar “miles de años”. 1 ka = 1.000 años.

**Lapilli:** Se denomina así a todos los piroclastos de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, que han sido emitidos durante una explosión volcánica.

**Lava:** Término utilizado para referirse al magma que alcanza la superficie en estado aproximadamente líquido y que ha perdido la mayoría de su contenido en gases. Roca parcial o totalmente fundida que erupciona de un *cráter* o una fisura eruptiva en forma de un líquido viscoso.

**Lluvia (precipitación) ácida:** Se denomina así a toda forma de precipitación (neblina, granizo, nieve, lluvia) que sea inusualmente ácida (pH<5,5). Puede ser nociva para los seres vivos. Ciertos gases magmáticos (SO<sub>2</sub>, Cl, CO<sub>2</sub>, entre otros) emitidos por un volcán en erupción, al entrar en contacto con el agua atmosférica forman ácidos fuer-

temente corrosivos que caen a la superficie en forma de lluvia.

**Magma:** Cualquier roca total o parcialmente fundida, constituida normalmente por una fase en estado líquido, gases disueltos, cristales de minerales y eventualmente burbujas de gas. Los magmas se forman a grandes profundidades (entre 10 y 100 km) en el manto o en la corteza terrestre. Cuando el magma ha perdido sus gases y alcanza la superficie en estado líquido se denomina *lava*. Cuando el magma se enfría al interior de la corteza terrestre forma las rocas intrusivas.

**msnm:** Abreviación usada para “metros sobre el nivel del mar”.

**Nube ardiente:** Denominación que a veces se utiliza para los flujos piroclásticos (ver *Flujos piroclásticos*).

**Obsidiana:** Roca volcánica completamente vítrea (sin cristales), de color negro, verde muy oscuro o café pardo, normalmente translúcida y con composición química de *riolita*.

**Olivino:** Mineral de color verdusco a amarillento, compuesto de silicatos de hierro y magnesio, que es muy común en las rocas volcánicas como los basaltos. El olivino es, además, uno de los

componentes principales del manto de la Tierra.

**Petrografía:** Disciplina científica que se ocupa de la descripción cualitativa y cuantitativa de las rocas, tomando en cuenta su textura, estructura y minerales que la forman.

**Piroclasto:** Del griego “piros” = fuego, “clastos” = fragmento. Este término se utiliza para denotar cualquier fragmento de roca volcánica emitido durante una erupción explosiva. Incluye las piedras pómez, cenizas, escorias, bloques, etc. Piroclástico: relativo a los piroclastos.

**Piroxeno:** Es un mineral de color oscuro y forma equilateral, compuesto de silicatos de calcio, magnesio y hierro, y que es común en rocas volcánicas como los basaltos y las andesitas.

**Pliniana(o):** Tipo de erupción volcánica caracterizada por una extrema violencia y explosividad, en la cual grandes cantidades de ceniza y otros materiales piroclásticos son expulsados de manera continua hacia la atmósfera, formando una columna de erupción de varias decenas de kilómetros de altura (generalmente entre 10 y 40 km). El término hace honor a Plinio el Joven, quien observó y describió con gran detalle la gran erupción del

volcán Vesubio (Italia) del año 79 d.C., que destruyó las ciudades romanas de Pompeya y Hercolano.

**Pómez:** Roca volcánica de color claro (grisáceo a blancuzco), formada durante erupciones explosivas, llena de cavidades que la hacen muy poco densa (¡frecuentemente pueden flotar en agua!). Generalmente tiene una composición química *dacítica* a *riolítica*. Las cavidades se forman por la expansión de los gases volcánicos durante el ascenso del magma hacia la superficie.

**Richter (escala de):** Escala que cuantifica la energía liberada por un sismo o terremoto; a esta cuantificación se la conoce como “magnitud” del sismo. Se trata de una escala logarítmica abierta, es decir que en teoría no tiene límite superior ni inferior. Sin embargo, en la práctica, casi todos los sismos detectados en la Tierra tienen magnitudes de entre -1 y 9.

**Riolita:** Roca volcánica de color generalmente claro o blancuzco, que contiene 69% o más de sílice. En estado líquido presenta una muy alta *viscosidad*. Riolítico: relativo a la riolita.

**Sensor remoto:** Instrumento de medición que no necesita contacto directo con el objeto de la

medida, sino que se vale de propiedades físicas o químicas del mismo para realizarla de forma indirecta.

**Sismicidad:** Número de sismos que han ocurrido en una zona (por ejemplo, un volcán) en un período de tiempo determinado. La sismicidad es una medida estadística de la actividad de un volcán.

**Sismo:** Sacudón del suelo producido por el movimiento abrupto y violento de una masa de roca a lo largo de una falla o fractura de la corteza terrestre. Los volcanes activos presentan una gran variedad de eventos sísmicos. **Sismos de largo período (LP)**, asociados al movimiento de fluidos magmáticos bajo presión en los conductos volcánicos. **Sismos vulcano-tectónicos (VT)**, asociados a la fracturación de rocas bajo un volcán. **Sismos híbridos**, mezcla de varios tipos de señales sísmicas. **Sísmico:** relativo a los sismos.

**Sismómetro:** Instrumento de alta precisión que detecta, amplifica y registra las vibraciones (ondas sísmicas) producidas por los sismos. Existen diversos tipos de sismómetros, dependiendo de las frecuencias de los sismos que se desea detectar. Los **sismómetros de Banda Ancha**

detectan un rango de frecuencias muy amplio, lo que permite tener mejores interpretaciones del origen y significado de los sismos detectados.

**VEI:** Siglas utilizadas para abreviar “Volcanic Explosivity Index” (Índice de Explosividad Volcánica). El VEI es una escala ampliamente utilizada para describir el tamaño de las erupciones volcánicas, basada, entre otros factores, en el volumen de material emitido. La escala VEI varía entre 0 y 8. Una erupción con un VEI de 0 denota una erupción no explosiva, sin importar el volumen de productos emitidos. Las erupciones con un VEI de 5 o más son consideradas “muy grandes” y ocurren raramente alrededor del planeta (alrededor de una erupción de este tipo cada década).

**Vento:** Se utiliza este término para designar el punto o sitio preciso de un volcán por donde ocurre la erupción de un magma. Una erupción puede ocurrir por varios ventos al mismo tiempo o a lo largo de la vida del volcán.

**Viscosidad:** Medida de la resistencia de un material a fluir en respuesta a un esfuerzo. La viscosidad de los materiales depende en gran medida de la temperatura a la que se encuentran. Para el caso de los magmas, la composición química también determina su viscosidad: mientras más alto sea el contenido de sílice, más alta será su viscosidad.

**Volcán:** Cualquier fractura u orificio de la superficie de la Tierra por donde sale *magma*. Con el mismo nombre se denomina a la elevación que se forma por la acumulación de material volcánico erupcionado por un cráter.

**Vulcaniana(o):** Tipo de erupción volcánica caracterizada por la ocurrencia de eventos explosivos de corta duración que emiten material en la atmósfera hasta altitudes del orden de 10 km. Generalmente, este tipo de actividad está asociada a la interacción entre el agua subterránea y el magma (erupción *freatomagmática*).

### ■ **ALGUNOS PROBLEMAS ASOCIADOS CON LA CAÍDA DE CENIZA VOLCÁNICA**

(Modificado de Neall *et al.*, 1999; y Nairn, 1991)

**S**i usted vive muy cerca a un volcán en erupción, la única protección completamente efectiva ante los fenómenos volcánicos peligrosos es la evacuación. Por el contrario, la gente que vive a distancias de moderadas a grandes del volcán puede continuar habitando en sus casas, siempre y cuando adopten algunas medidas de prevención.

El impacto de la caída de ceniza en las personas, animales, plantas, estructuras y maquinarias depende en gran medida del espesor del depósito. Estos efectos pueden verse incrementados en caso de lluvias, pues el peso de la ceniza aumenta al mezclarse o tomar contacto con el agua. Pero, en general, estos efectos pueden disminuirse con ciertas medidas preventivas simples. Con el fin de simplificar la evaluación de los peligros volcánicos asociados con las caídas de ceniza, se han establecido cinco niveles de afectación, en función del espesor de la ceniza. En la siguiente tabla se detallan los efectos de las caídas de ceniza sobre los animales y personas, así como en las estructuras, maquinarias y la vegetación. En esta tabla, los espesores corresponden a ceniza no compactada.

**EFFECTOS SOBRE  
LAS PERSONAS  
Y LOS ANIMALES**

**EFFECTOS SOBRE  
LA PROPIEDAD  
Y LA VEGETACIÓN**

**Espesor de la capa de ceniza inferior a 1 mm ( $\leq 0,1$  cm)**

Pequeño o ninguno.

Los aeropuertos pueden verse obligados a cerrar por la posible afectación a los aviones.

Irritación ligera de los ojos y las vías respiratorias.

Posible contaminación de las fuentes y/o reservorios de agua.

Problemas de visibilidad y presencia de lodo (en caso de lluvias) en las carreteras.

Podrían presentarse daños en los vehículos u otras maquinarias, debido al alto poder abrasivo de la ceniza.

**Espesor de la capa de ceniza entre 1 y 5 mm (0,1-0,5 cm)**

Además de los efectos causados por un espesor menor a 1 mm, se puede tener:

Problemas en las vías respiratorias.

Cierre de los aeropuertos y del espacio aéreo sobre el volcán.

Inflamación de los ojos.

Posible afectación a las cosechas.

El ganado puede ser afectado por la falta de alimentación, contaminación de las fuentes de agua o la ingestión de forrajes contaminados con ceniza.

Daños menores en las casas ocasionados por la entrada de ceniza fina, daños en los acondicionadores de aire, bombas de agua, cisternas, computadoras, etc.

Suministro de agua puede ser limitado o nulo.

Posibles cortes de la electricidad y cortocircuitos, si la ceniza fina se acumula en los aisladores eléctricos y si esta se encuentra saturada con agua.

Contaminación de las fuentes y reservorios de agua.

Las rutas necesitarán limpieza permanente para reducir el riesgo de la pérdida de visibilidad.

Las tareas de limpieza de la ceniza requerirán de grandes cantidades de agua, por lo que la continuidad en el suministro se ve afectada por la gran demanda.

El sistema de alcantarillado puede ser bloqueado por la ceniza o afectado por los cortes en el suministro de agua y electricidad.

Baja visibilidad.

Posibles daños en la maquinaria y otros equipos eléctricos.

Los insectos pueden comenzar a morir, así como algunos animales silvestres pequeños.

El transporte puede ser temporalmente afectado.

### **Espesor de la capa de ceniza entre 5 y 100 mm (0,5-10 cm)**

Además de los efectos causados por un espesor menor a 5 mm, se puede tener:

Serios problemas respiratorios.

Aplastamiento de los pastos y otros arbustos.

El ganado necesitará de alimento traído de otras partes.

El follaje de los árboles puede ser muy afectado, sin embargo la mayoría de árboles puede sobrevivir.

Los pájaros pueden ser seriamente afectados.

La mayoría de pastizales serán destruidos si el espesor de ceniza es superior a 50 mm.

Pérdida temporal de la visibilidad.

Las cosechas serán seriamente afectadas.

La mayoría de construcciones pueden soportar el peso de la ceniza, sin embargo las edificaciones con estructuras débiles pueden colapsar con espesores cercanos a 100 mm, sobre todo si la ceniza está húmeda.

El tráfico en las carreteras puede ser seriamente afectado por la acumulación de ceniza. Los vehículos pueden sufrir problemas por la acumulación de ceniza en los filtros de aire.

Cortes de la electricidad y peligro de incendios debidos a problemas eléctricos.

### **Espesor de la capa de ceniza entre 100 y 300 mm (10-30 cm)**

Además de los efectos causados por un espesor menor a 100 mm, se puede tener:

Heridos debido al colapso de los techos de las casas.

Si no se realiza la limpieza permanente de la ceniza acumulada en los techos de las casas, estos pueden colapsar, especialmente aquellas estructuras con techos grandes y planos, y si la ceniza está húmeda.

Daños severos a los árboles, caída del follaje, ruptura de ramas, etc.

Pérdida temporal de la visibilidad.

Destrucción completa de las cosechas.

Daños en las líneas eléctricas por la caída de ramas de árboles.

### **Espesor de la capa de ceniza mayor a 300 mm (>30 cm)**

Además de los efectos causados por un espesor menor a 300 mm, se puede tener:

Pérdidas humanas debida al colapso de los techos de las casas.

Colapso frecuente de los techos debido a la acumulación de ceniza.

El ganado puede morir o ser seriamente afectado.

Serios daños del suministro eléctrico y problemas en las telecomunicaciones.

Muerte de la vida acuática en lagos y ríos.

El suelo será completamente cubierto de ceniza. Pérdida del uso del suelo por largo tiempo (muchos años).

Las carreteras son inutilizables hasta su limpieza.

Destrucción total y extensa de la vegetación.

## ■ PROTECCIÓN CONTRA LAS CAÍDAS DE CENIZA

- La ceniza debe ser removida (con el mayor cuidado posible para evitar accidentes) de los techos de los edificios y de las casas, con el fin de evitar el colapso de los mismos.
- Antes de realizar la limpieza de los techos, se debe constatar que las cañerías del agua lluvia no estén selladas, con el fin de evitar su taponamiento.
- En lo posible, se debe tratar de limpiar la ceniza sin utilizar agua, para evitar el aumento del peso.
- Las estructuras bajas como casetas de telecomunicaciones, hidrantes contra incendios y otras estructuras ubicadas en el suelo deben ser protegidas para evitar que sean cubiertas por la ceniza.
- La ceniza removida manualmente de los techos debe ser dispuesta, en lo posible, lejos de los sitios de acumulación de basura ordinaria.
- En condiciones de caídas severas de ceniza ( $> 5$  mm), las ventanas y puertas de los edificios deben ser selladas para evitar la entrada de ceniza al interior de las edificaciones.
- Todos los tipos de motores deben ser protegidos ante las caídas de ceniza, para evitar su afectación.

## Anexo 2

### ■ ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA (V.E.I., VOLCANIC EXPLOSIVITY INDEX)

El Índice de Explosividad Volcánica (VEI) es una escala ampliamente utilizada para describir brevemente el tamaño de una erupción explosiva. La escala VEI varía entre 0 y 8, y está basada, entre otros factores, en el volumen total de materiales sólidos emitidos durante la erupción volcánica; si bien este parámetro no es el único. Así, por ejemplo, una erupción con VEI = 0 denota una erupción no explosiva, sin importar el volumen total de los materiales emitidos. Las erupciones con un VEI de 5 o más, son consideradas como “muy grandes” y ocurren muy raramente alrededor del planeta (en promedio, alrededor de una de estas erupciones ocurre en cada década).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción general	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada - Grande	Grande	Muy Grande			
Volumen de tefra (m <sup>3</sup> )	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{12}$	
Altura de la columna eruptiva (km)	< 0.1	0.1 - 1	1 - 5	3 - 15	10 - 25	> 25	→		
Descripción cualitativa	← “Apacible”, “Efusiva” →		← “Explosiva” →		← “Cataclísmica”, “Paroxismal”, “Colosal” →				
Tipo de erupción	← Hawaiana →		← Estromboliana →		← Vulcaniana →		← Pliniana →		← Ultra-Pliniana →

## Anexo 3

---

### ■ MONITOREO VISUAL DE LOS VOLCANES ECUATORIANOS

Como se había mencionado en el capítulo 4, uno de los métodos de monitoreo consiste en realizar observaciones sistemáticas de las condiciones de actividad de un volcán, mediante el uso de nuestros sentidos (vista, oído, olfato, tacto y gusto). Evidentemente, este tipo de observaciones pueden ser muy subjetivas y, por lo tanto, dar lugar a confusiones o malentendidos. De todas maneras, pueden ser de utilidad, ya que la cantidad de observaciones que podría hacer la población en general es mucho más grande que lo que puede hacer un pequeño grupo de vulcanólogos. En gran medida, la calidad de las observaciones que realicemos dependerá de la experiencia que adquiramos con el tiempo... ¡así que mientras antes empecemos, mejor! En particular, los guías de alta montaña o los andinistas experimentados, profesionales o aficionados que realizan visitas a volcanes de manera periódica pueden proporcionar datos relativos a cambios morfológicos en la cumbre o en la ruta de ascenso, cambios en la actividad fumarólica, etc.

A continuación se presenta un pequeño formulario con las informaciones mínimas que deben acompañar cualquier observación que se realice en un volcán.

## **Ficha de observación**

A ser enviada al Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional  
Apartado postal 17-01-2759, Quito, Ecuador  
Fax: (593 2) 2567847, Email: [geofisico@igepn.edu.ec](mailto:geofisico@igepn.edu.ec)

Nombre: .....

Dirección: .....

Teléfono(s): .....

Email: .....

Acompañantes: .....

Volcán: .....

Fecha de la observación: .....

Hora de la observación: .....

Lugar preciso de la observación (ruta de ascenso, altura, punto GPS):

.....  
.....

Tipo de observación (ruidos, olor a gases sulfurosos, temblor, avalancha de rocas o hielo, cambios importantes en el paisaje, presencia de fumarolas nuevas, cambios en fumarolas antiguas, aparición de fracturas, etc.); descríbala con el mayor detalle, incluyendo comparaciones y, si es posible, medidas o estimaciones cuantitativas:

.....  
.....

Calidad de la información (visibilidad/nubosidad, velocidad del viento):

.....  
.....

Repetición de la observación (a la subida o al descenso?):

.....  
.....

Información complementaria disponible (fotos, filmaciones, muestras):

.....  
.....

## Anexo 4

---

### ■ EL ORIGEN DEL VULCANISMO EN LOS ANDES DEL ECUADOR

En los últimos 50 años, los estudios de geofísica y geoquímica en todo el mundo han mostrado que el planeta Tierra está constituido por tres grandes capas concéntricas: la corteza, el manto y el núcleo (fig. 18). La corteza terrestre es la capa más externa, conforma los continentes y el piso de los océanos, tiene un espesor variable de entre 10 y 100 km, y se caracteriza por presentarse en estado sólido y tener un comportamiento *frágil*, es decir que al ser sometida a esfuerzos se rompe a través de fracturas (fallas geológicas).

El manto es la capa más voluminosa de la Tierra. Tiene un espesor de 2.900 km y se encuentra inmediatamente bajo la corteza terrestre. El manto se caracteriza por encontrarse en estado casi sólido, pero tiene una temperatura mucho mayor que la corteza. Además, el manto tiene un comportamiento *dúctil*, es decir que al ser sometido a esfuerzos no produce fracturas, sino que se deforma de manera similar a la plastilina.

Por último, el núcleo de la Tierra es la capa más interna, con un espesor de 3.500 km. La parte externa del núcleo se encuentra en estado casi líquido, mientras que la parte interna es sólida. El núcleo está muy caliente y emite enormes cantidades de calor y energía, los cuales son capaces de provocar movimientos de *convección* en el manto a lo largo de millones de años (fig. 18). Durante estos movimientos de *convección*, el manto arrastra en diferentes direcciones a la delgada corteza que se encuentra encima, lo que provoca que la superficie de

la Tierra esté dividida en grandes segmentos conocidos como “placas tectónicas”.

Al moverse, las placas tectónicas pueden generar tres tipos de límites entre sí: 1. límites de divergencia (cuando dos placas se separan una de otra); 2. límites de transcurrancia (cuando dos placas se deslizan una junto a la otra); y, 3. límites de convergencia (cuando dos placas chocan una contra otra) (fig. 19). La velocidad promedio de movimiento de las placas tectónicas es solamente de pocos centímetros por año, pero al moverse por millones de años pueden recorrer distancias importantes. Por ejemplo, una placa que se mueve a 5 cm/año durante 2 millones de años recorrerá una distancia de 100 km. Calcule el lector las distancias que pueden haber recorrido las placas y los cambios que han sucedido desde la extinción de los dinosaurios, hace 64 millones de años. La Tierra tiene una edad de cerca de 5 mil millones de años.

El Ecuador se encuentra en una zona donde dos placas tienen un límite de convergencia: son las placas de Nazca y de Sudamérica (fig. 19). En realidad, la placa de Nazca choca y luego se sumerge bajo la placa Sudamericana, entrando poco a poco al manto terrestre, lo cual ocurre principalmente porque la placa Nazca es más densa que la placa Sudamericana (fig. 20). Este proceso se conoce como “subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana”.

Al entrar en el manto, la placa Nazca alcanza regiones cada vez más profundas y calientes, hasta el punto en que la temperatura es tal que llega a fundirse parcialmente, dando lugar a la formación de *magmas* (roca fundida). Estos magmas recién formados encuentran su camino hacia la superficie a través de las fracturas de la corteza y forman volcanes al llegar a superficie (fig. 20).

Otras zonas de subducción importantes se encuentran a casi todo lo largo de los Andes, en Centroamérica, en Alaska, en las islas Aleutianas, en Kamchatka, Japón e Indonesia. Todas estas zonas forman parte del Cinturón de Fuego del Pacífico.

Por supuesto, el origen del vulcanismo que se ha descrito aquí es muy esquemático y generalizado. La manera exacta como los magmas se forman en el manto y los procesos que intervienen en su transporte hacia la superficie son muy complejos en la realidad, y en el caso del Ecuador aún no han sido comprendidos en su totalidad. Finalmente, vale mencionar que existen otras maneras de formar magmas en el manto de la Tierra, diferentes a los magmas de las zonas de subducción (por ejemplo, el caso de Galápagos, o de las cordilleras oceánicas), pero esto no será discutido aquí.

## Los autores

---

**Daniel Andrade y Silvana Hidalgo.** Docentes-investigadores del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Ambos obtuvieron sus grados de ingenieros geólogos en la EPN, y han realizado estudios de posgrado en la Universidad Blaise Pascal de Clermont-Ferrand (Francia), donde obtuvieron sus títulos de doctorado en 2009 y 2006, respectivamente. Varias de sus investigaciones han estado relacionadas a los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua. *dandrade@igepn.edu.ec, shidalgo@igepn.edu.ec*

**Michel Monzier y Jean-Philippe Eissen.** Investigadores del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD); cooperaron con el Instituto Geofísico de la EPN en la realización de estudios vulcanológicos entre 1997 y 2006. Fueron los codirectores de los proyectos de tesis de grado y posgrado de D. Andrade y S. Hidalgo, durante los cuales se adquirieron nuevos conocimientos sobre los volcanes Atacazo-Ninahuilca y Pululahua.

**Bernardo Beate.** Docente-investigador del Departamento de Geología de la EPN y consultor privado en Vulcanología y Geotermia. Tiene una larga experiencia en estudios vulcanológicos en el Ecuador continental y Galápagos. Ha participado activamente en los estudios recientes del Pululahua. *bbeate@gmail.com*

Referencia de este libro:

Daniel Andrade, Silvana Hidalgo, Michel Monzier,  
Jean-Philippe Eissen, Bernardo Beate  
2012

*Serie Los peligros volcánicos en el Ecuador, No. 5*

**Los peligros volcánicos asociados con el  
Atacazo-Ninahuilca y Pululahua**

Corporación Editora Nacional / IG-EPN / IRD.

Este libro es la continuación de la serie *Los peligros volcánicos en el Ecuador*, preparada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito y la Unidad de Investigación *Procesos y riesgos volcánicos* del IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*: Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) dentro de un convenio de cooperación existente entre estas entidades.

Títulos publicados:

- No. 1: Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua
- No. 2: Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe
- No. 3: Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi
- No. 4: Los peligros volcánicos asociados con el Antisana
- No. 5: Los peligros volcánicos asociados con el Atacazo-Ninahuilca y Pululahua

Dos volcanes poco conocidos por la sociedad ecuatoriana se presentan en esta quinta entrega de *Los peligros volcánicos en Ecuador*. El Atacazo-Ninahuilca y el Pululahua han sido desde siempre opacados por la presencia de volcanes más imponentes y con erupciones registradas por la historia, como el Cotopaxi, el Guagua Pichincha o el Tungurahua. Sin embargo, tanto el Atacazo-Ninahuilca como el Pululahua han presentado erupciones de gran magnitud en los últimos miles de años, por lo que se les califica como “potencialmente activos”. El objetivo de este trabajo es dar a conocer la historia de su formación, su tipo de actividad y sus peligros potenciales.

