

MENSAJE PARA LAS AUTORIDADES Y LAS COMUNIDADES

El presente mapa es el resultado del trabajo de campo realizado en el volcán El Reventador desde hace algunos años, así como de la aplicación de nuevas técnicas informáticas de modelización de los fenómenos volcánicos. Debido a su escala, este mapa se presenta como un instrumento de planificación regional dirigido a las autoridades para la toma de decisiones y la gestión del riesgo volcánico.

Se debe aclarar que los límites de las zonas de peligro representan una transición entre dos regiones con diferente grado de amenaza, por lo tanto dichos límites son solo aproximados y de ninguna manera constituyen bordes absolutos. Esto se debe a que los fenómenos eruptivos pueden variar enormemente en su magnitud, alcance y volumen, y por lo tanto en su extensión lateral y longitudinal.

ESCENARIOS DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA HISTÓRICA

El Reventador es uno de los volcanes más activos de la cadena volcánica ecuatoriana. A más de las erupciones recientes de los años 2002, 2004-2005, 2007-2008, 2009-2010, El Reventador ha tenido muchas erupciones durante los siglos XIX y XX, especialmente en los años 1898, 1912, 1926-29, 1944, 1958-60, y 1972-76, y sin duda muchas más en los siglos precedentes. El Reventador es un cono joven construido al interior de una inmensa depresión en forma de herradura (denominada "caldera") abierta hacia el oriente, y cuyo límite oriental está marcado por un cambio drástico de la topografía. Al pie oriental de dicha caldera se encuentra el valle de los ríos Quijos y Coca.

En base al conocimiento geológico y de la actividad eruptiva reciente del volcán El Reventador (especialmente durante el siglo XX), así como durante el presente ciclo eruptivo (iniciado en 2002 y que se prolonga hasta la actualidad –Diciembre de 2010), se puede definir 3 tipos de escenarios eruptivos para este volcán:

ESCENARIO I	Actividad efusiva o ligeramente explosiva (VEI 1-2*), caracterizada por la emisión de flujos de lava y por la ocurrencia de explosiones pequeñas a moderadas que emiten bloques y bombas volcánicas sobre los flancos del cono y una cantidad pequeña/baja de ceniza. Este tipo de erupciones está representado por los episodios eruptivos del 2004-2005, 2007-2010, así como por las erupciones del año 1976.
ESCENARIO II	Eventos explosivos de tamaño moderado a grande (VEI 3-4) caracterizados por una mayor tasa de extrusión de magma por la ocurrencia de erupciones mucho más explosivas, las cuales están acompañadas de flujos piroclásticos en los flancos del volcán y en el interior de la caldera, y por una distribución de ceniza a escala regional. Este tipo de actividad está representado por la erupción del 3 de Noviembre de 2002.
ESCENARIO III	Eventos explosivos de tamaño muy grande (VEI ≥ 4) caracterizados por ser erupciones altamente explosivas que generan flujos piroclásticos muy voluminosos asociados al colapso de la columna eruptiva y/o a explosiones dirigidas. Cabe recalcar que este tipo de erupciones son extremadamente raras en este volcán. No han sido observadas históricamente.

* VEI: Siglas utilizadas para abreviar "Volcanic Explosivity Index" (Índice de Explosividad Volcánica). El VEI es una escala ampliamente utilizada en vulcanología para describir la magnitud de las erupciones volcánicas explosivas, y que está 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 VEI ≥ 5 o más son consideradas "muy grandes" y ocurren raramente alrededor del planeta (alrededor de una erupción de éste tipo cada década).



Fotografía aérea oblicua desde el Sur-Este del volcán Reventador con su cono actual y su caldera. Foto: P.Ramón, IG-EPN.

DESCRIPCIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS POTENCIALES

FLUJOS PIROCLÁSTICOS (NUBES ARDIENTES)

Estos flujos son avalanchas de alta temperatura (≥ 500°C) conformadas por gases, ceniza y fragmentos de roca, que descienden por los flancos del volcán a gran velocidad (≥ 100 km/h), y que suelen presentarse durante erupciones explosivas importantes. Los flujos piroclásticos se generan por el desborde del magma desde el cráter o por el colapso de una columna eruptiva. La parte más densa del flujo se mueve por los fondos de las quebradas y los valles, mientras que la parte menos densa puede desbordarse de los valles e inclusive sobrepasar cerros importantes. En el caso de presentarse/ocurrir, todos los flancos del volcán serían afectados por este fenómeno, donde la distancia horizontal alcanzada por los flujos función de la magnitud de la erupción.

En el caso de la erupción explosiva del 3 de noviembre de 2002 se generaron varios flujos piroclásticos que viajaron en dirección orientada y que devastaron los flancos del cono y el interior de la caldera de El Reventador. Estos flujos se desplazaron hasta nueve kilómetros desde el cráter, alcanzando el valle del río Quijos. Por el contrario, en la erupción de 1976, los flujos piroclásticos fueron más pequeños, alcanzando solamente el pie del cono a una distancia de 4-5 kilómetros desde el cráter.

Recomendación: La probabilidad de sobrevivir al impacto de un flujo piroclástico es nula. Por eso, en caso de una erupción explosiva inminente es necesario evacuar a todas las personas de las zonas potencialmente afectadas por este fenómeno.

FLUJOS DE LAVA

Los flujos de lava son derrames de roca fundida de alta temperatura, originados en el cráter o en fracturas de los flancos del volcán, los cuales descienden por los flancos y las quebradas del cono a velocidades relativamente bajas. En el Reventador, estos fenómenos son muy frecuentes. Así, durante la erupción de 1976, dos flujos de lava descendieron por la parte sur oriental del cono y alcanzaron unos cinco kilómetros desde el cráter. Inmediatamente después de la actividad explosiva del 2002, dos grandes flujos de lava fueron emitidos y viajaron hasta seis kilómetros desde el cráter. Posteriormente en los años 2004, 2005, 2007, 2008, 2009 y 2010 se han emitido quince (15) flujos de lava por los flancos norte y sur de la caldera, llegando hasta 2-3 kilómetros del cráter (ver inserto en el mapa). Cabe mencionar que durante las erupciones recientes, así como durante las erupciones ocurridas en el siglo XX, los flujos de lava nunca alcanzaron el borde oriental de la caldera. Sin embargo, en caso de que los flujos alcancen el borde oriental de la caldera, el frente de dichos flujos podría colapsar y producir avalanchas de bloques calientes que afectarían la infraestructura existente en el valle del río Quijos-Coca.

Recomendación: La progresión de los flujos de lava es muy lenta y por lo tanto no representan un gran peligro para los habitantes de los alrededores del volcán, dado que generalmente hay tiempo para abandonar la zona potencialmente afectada. Por el contrario, la afectación sobre la infraestructura y los campos agrícolas es total. En caso de que exista una erupción que genere flujos de lava se debe poner particular atención al avance de los mismos con el fin de vigilar si estos se acercan al borde de la caldera del volcán.

FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS (LAHARES)

Los flujos de lodo y escombros (lahares) están compuestos por materiales volcánicos sueltos (rocas, pómez, arena, ceniza) que en el caso del volcán El Reventador, han sido mezclados y removilizados por el agua proveniente de las fuertes lluvias que existen en la zona. Una vez formados, los lahares descienden rápidamente por los drenajes naturales del volcán y de la caldera. La peligrosidad y la magnitud de estos fenómenos dependen del volumen de agua y por la cantidad de los materiales sueltos disponibles, así como de las pendientes y el grado de encajonamiento de los valles. Este fenómeno fue muy común luego de la erupción de 2002, pudiendo observarse eventos pequeños de gran tamaño en los ríos Marker, Montana, Reventador y que afectaron la vía Quijos - El Reventador.

estos fenómenos están determinadas por el volumen de agua y por la cantidad de los materiales sueltos disponibles, así como de las pendientes y el grado de encajonamiento de los valles. Este fenómeno fue muy común luego de la erupción de 2002, pudiendo observarse eventos pequeños de gran tamaño en los ríos Marker, Montana, Reventador y que afectaron la vía Quijos - El Reventador.

Recomendación: Por la rapidez con la cual puede formarse, por su velocidad y por su energía, un flujo de escombros es un fenómeno muy peligroso y la probabilidad de sobrevivir a su impacto directo es mínima. Durante una crisis volcánica y si hay lluvias fuertes en el volcán, se debe evitar el fondo de las quebradas y las vertientes bajas de los valles.

LEYENDA DE LAS ZONAS POTENCIALMENTE AFECTADAS

FLUJOS PIROCLÁSTICOS, FLUJOS DE LAVA Y FLUJOS DE ESCOMBROS

La delimitación de las zonas afectadas por estos flujos se realizó asociando dos metodologías diferentes. En primer lugar se utilizó la metodología denominada de "cono de energía", ampliamente aplicada en la elaboración de mapas de peligro alrededor del mundo, la cual

relaciona el alcance horizontal de un flujo (L) con la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación y el punto de deposición del flujo (Crandell et al., 1984.) El segundo método consiste en la aplicación de un simulador digital llamado Volc Flow (Kelfoun and Druitt, 2005), el cual sirve para modelar los flujos de origen volcánico.

La zona de color rojo intenso indica la zona que sería potencialmente afectada por flujos piroclásticos, y/o flujos de lava y/o flujos de escombros en caso de que ocurra una erupción pequeña a moderada (VEI 1-2). Esta zona ha sido afectada por tales fenómenos durante las erupciones históricas, como por ejemplo en 1976 o durante los episodios eruptivos recientes (2007-2010). Esta zona fue delimitada en base de la aplicación del modelo Volc Flow utilizando la relación H/L = 0.5 y volúmenes entre 1 y 5 millones de metros cúbicos, típicos de dichos flujos. La recurrencia de este tipo de evento eruptivo es de varias erupciones por siglo.

La zona de color rojo intermedio sería afectada por flujos piroclásticos, y/o flujos de lava y/o flujos de escombros, en caso de que ocurra una erupción grande (VEI 3-4), tal como lo sucedido durante el evento del 2002. Esta zona fue delimitada combinando la observación de campo de dicha erupción, así como la aplicación de la relación H/L = 0.35 con una altura de colapso de 300 m sobre el nivel del cráter y la utilización del modelo Volc Flow, con volúmenes iniciales entre 10 y 50 millones de metros cúbicos. La recurrencia de este tipo de evento eruptivo en el Reventador es probablemente de una erupción por siglo.

La zona de color rojo pálido podría ser afectada por flujos piroclásticos en caso de que ocurra una erupción muy grande (VEI > 4). Esta zona podría también ser afectada por flujos piroclásticos mucho más móviles y por avalanchas debidas al colapso del cono o a una explosión dirigida ("blast"). Esta zona fue delimitada en base de la aplicación de la relación H/L = 0.35 con una altura de colapso de 500 m sobre el nivel del cráter. Durante el trabajo de campo en la zona del Reventador, no se encontró evidencia geológica de este tipo de erupción, sin embargo por analogía con otros volcanes similares se consideró un escenario de este tipo.

FLUJOS DE ESCOMBROS DISTALES

La delimitación de las zonas afectadas por lahares se realizó combinando los estudios de campo y la utilización del modelo LaharZ (Iverson et al., 1998), el cual asocia el volumen del evento con el área inundada por un flujo de lodo y escombros.

Los eventos laháricos pequeños a moderados (< 4 millones de m³) están incluidos en la zona de color rojo intermedio, mientras que para los lahares grandes (> 4 millones de m³) que tienen un alcance importante se ha delimitado las zonas de inundación aguas abajo de los ríos Coca y Due Grande. Se debe recalcar que toda la zona de color pálido puede ser afectada por flujos de lodo y escombros asociados con las intensas lluvias que afectan a esta zona.

AVALANCHAS DE ESCOMBROS

Para la delimitación de esta zona se utilizó el concepto de "cono de energía", que relaciona el alcance horizontal alcanzado por un flujo (L) con la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo y el punto de deposición. Este tipo de eventos pueden estar asociados a eventos explosivos, peroafortunadamente son poco frecuentes.

Esta línea representa la posible extensión de una avalancha de escombros que afecte todos los flancos del volcán. Para este caso se utilizó una relación H/L de 0.2 propia a una avalancha de escombros.

CAÍDAS DE CENIZA Y PIROCLASTOS (CASCAJO)

Durante una erupción los gases y materiales piroclásticos (ceniza, fragmentos de roca, piedra pómez, cascajo) son expulsados desde el cráter y forman parte de una columna eruptiva que puede alcanzar varios kilómetros de altura y sostenerse por minutos u horas de duración. Los fragmentos más grandes siguen trayectorias balísticas y caen cerca del volcán, mientras que las partículas más pequeñas alcanzan y/o cascajo) de varios milímetros o centímetros de espesor. La peligrosidad de este fenómeno es función del volumen de material emitido en la erupción, la intensidad y duración de la erupción, la distancia al punto de emisión y la dirección del viento. Durante la erupción de El Reventador en 2002, las caídas de ceniza afectaron todo el Valle Interandino y al W del volcán, incluyendo la ciudad de Quito, provocando el cierre del aeropuerto durante varios días.

mayores alturas son llevadas por el viento y caen a mayor distancia del volcán, cubriendo grandes áreas y dejando una capa de material piroclástico (ceniza y cascajo) de varios milímetros o centímetros de espesor. La peligrosidad de este fenómeno es función del volumen de material emitido en la erupción, la intensidad y duración de la erupción, la distancia al punto de emisión y la dirección del viento. Durante la erupción de El Reventador en 2002, las caídas de ceniza afectaron todo el Valle Interandino y al W del volcán, incluyendo la ciudad de Quito, provocando el cierre del aeropuerto durante varios días.

Recomendación: Las personas que se encuentren en las áreas afectadas por la caída de material piroclástico (ceniza y/o cascajo), deberán buscar refugio en sus casas u otras edificaciones cercanas, y si permanecen a la intemperie, se recomienda el uso de un casco, de ropa adecuada y de máscaras (o un pañuelo húmedo) para proteger la boca y la nariz. Además se debe impedir que el ganado consuma hierba contaminada por ceniza, para lo cual sería necesario su alimentación con hierba limpia traída de otras regiones o la evacuación de los animales. Se debe proteger las fuentes y el suministro de agua potable, para evitar que sea contaminada por la ceniza. Con mucha cautela será necesario limpiar continuamente los techos para evitar una gran acumulación de ceniza y el posible colapso de los mismos.

AVALANCHAS DE ESCOMBROS

Son enormes deslizamientos de rocas, arena y ceniza, que pueden suceder en un volcán como resultado de la inestabilidad y colapso de sus flancos. La inestabilidad de un volcán puede deberse a la intrusión de magma por dentro del edificio volcánico, a un sismo cercano y fuerte, o al debilitamiento de la estructura hidrotermal. En ocasiones, el colapso del edificio está acompañado por actividad magmática, caracterizada por explosiones de extrema violencia ("blast") que generalmente están dirigidas en la misma dirección del colapso. Las avalanchas de escombros son muy rápidas y móviles y arasan con todo lo que se encuentre a su paso. El volcán El Reventador ha experimentado eventos de estas características por lo menos en dos ocasiones, durante las cuales los edificios anteriores al cono actual fueron destruidos y formaron la actual caldera del Reventador. Sin embargo vale notar que estos eventos son muy poco frecuentes en la vida de un volcán.

internas del volcán provocado, por ejemplo, por una marcada alteración hidrotermal. En ocasiones, el colapso del edificio está acompañado por actividad magmática, caracterizada por explosiones de extrema violencia ("blast") que generalmente están dirigidas en la misma dirección del colapso. Las avalanchas de escombros son muy rápidas y móviles y arasan con todo lo que se encuentre a su paso. El volcán El Reventador ha experimentado eventos de estas características por lo menos en dos ocasiones, durante las cuales los edificios anteriores al cono actual fueron destruidos y formaron la actual caldera del Reventador. Sin embargo vale notar que estos eventos son muy poco frecuentes en la vida de un volcán.

Recomendación: Dada la magnitud y violencia de estos fenómenos, se recomienda la evacuación de las zonas amenazadas si la información científica señala la posibilidad de ocurrencia de un evento de estas características.

GASES VOLCÁNICOS

Antes, durante y después de una erupción los volcanes emiten cantidades importantes de gases, siendo en su mayoría vapor de agua, al cual se debe sumar ciertas concentraciones de CO₂ (dióxido de carbono), SO₂ (dióxido de azufre) y H₂S (hidrógeno de azufre) entre otros. Generalmente estos gases se diluyen rápidamente en la atmósfera, de manera que no representan un peligro mayor para la salud humana. El sentido del olfato humano es lo suficientemente sensible como para detectar concentraciones muy bajas de gases volcánicos, que no necesariamente son peligrosas para la salud, especialmente cuando existe una buena ventilación. Dado que las cenizas que cubren los sembríos llevan consigo ciertas concentraciones de estos gases, se recomienda lavar con agua limpia los productos agrícolas antes de proceder a ingerirlos.

Antes, durante y después de una erupción los volcanes emiten cantidades importantes de gases, siendo en su mayoría vapor de agua, al cual se debe sumar ciertas concentraciones de CO₂ (dióxido de carbono), SO₂ (dióxido de azufre) y H₂S (hidrógeno de azufre) entre otros. Generalmente estos gases se diluyen rápidamente en la atmósfera, de manera que no representan un peligro mayor para la salud humana. El sentido del olfato humano es lo suficientemente sensible como para detectar concentraciones muy bajas de gases volcánicos, que no necesariamente son peligrosas para la salud, especialmente cuando existe una buena ventilación. Dado que las cenizas que cubren los sembríos llevan consigo ciertas concentraciones de estos gases, se recomienda lavar con agua limpia los productos agrícolas antes de proceder a ingerirlos.

Recomendación: Cuando se detecte la presencia de gases volcánicos en la atmósfera, se debe evitar ambientes cerrados donde la ventilación sea mínima y donde los gases puedan acumularse. Una máscara o pañuelo mojado podría ayudar a filtrar el aire contaminado, pero será más prudente abandonar la zona afectada por gases.

CAÍDAS DE PIROCLASTOS

La delimitación de las zonas potencialmente afectadas por caídas de ceniza y piroclastos fue realizada usando el modelo numérico de advección-difusión TEPHRA2 (Bonadonna et al. 2005).

La calibración del modelo estuvo basada en los parámetros de la erupción de noviembre del 2002. Estos mapas muestran la probabilidad de 50% que una masa de piroclastos se acumule en una unidad de superficie (kg/m²) alrededor del volcán. Dicha probabilidad está basada en la distribución estadística de los episodios eruptivos posibles y de los perfiles de vientos.

Los parámetros de erupción y los perfiles de vientos se eligen aleatoriamente (dentro de un rango definido), y dan una evaluación probabilística del peligro para los escenarios eruptivos analizados. El rango de muestreo de dichos parámetros es definido mediante una función de densidad de probabilidad que está basada en observaciones. Los perfiles de vientos fueron muestreados a partir de una base de datos 12 años de medidas de viento, y 1000 simulaciones fueron realizadas para cada escenario. Se tomaron en cuenta los escenarios de magnitud más frecuente, basados en la historia eruptiva del volcán (VEI 3 y 4). Se definieron varios umbrales dado que la caída ceniza tiene una extensión importante y puede provocar diferentes tipos de daño o afectación. Cada umbral corresponde a un límite claro en el grado de afectación:

Color en el mapa	Umbral	Elemento afectado	Efectos posibles
	1 kg/m ² (1mm de espesor)	Aeropuertos	Cierre de los aeropuertos, puede provocar daños en los aviones. También puede dañar cultivos.
	> 10 kg/m ² (>10mm de espesor)	Vegetación	Daños en los cultivos y las cosechas, dependiendo del tipo de vegetación.
	> 100 kg/m ² (>100mm de espesor)	Casas	Desde este límite en adelante, se puede producir colapso de los techos, dependiendo del material y tipo de construcción.

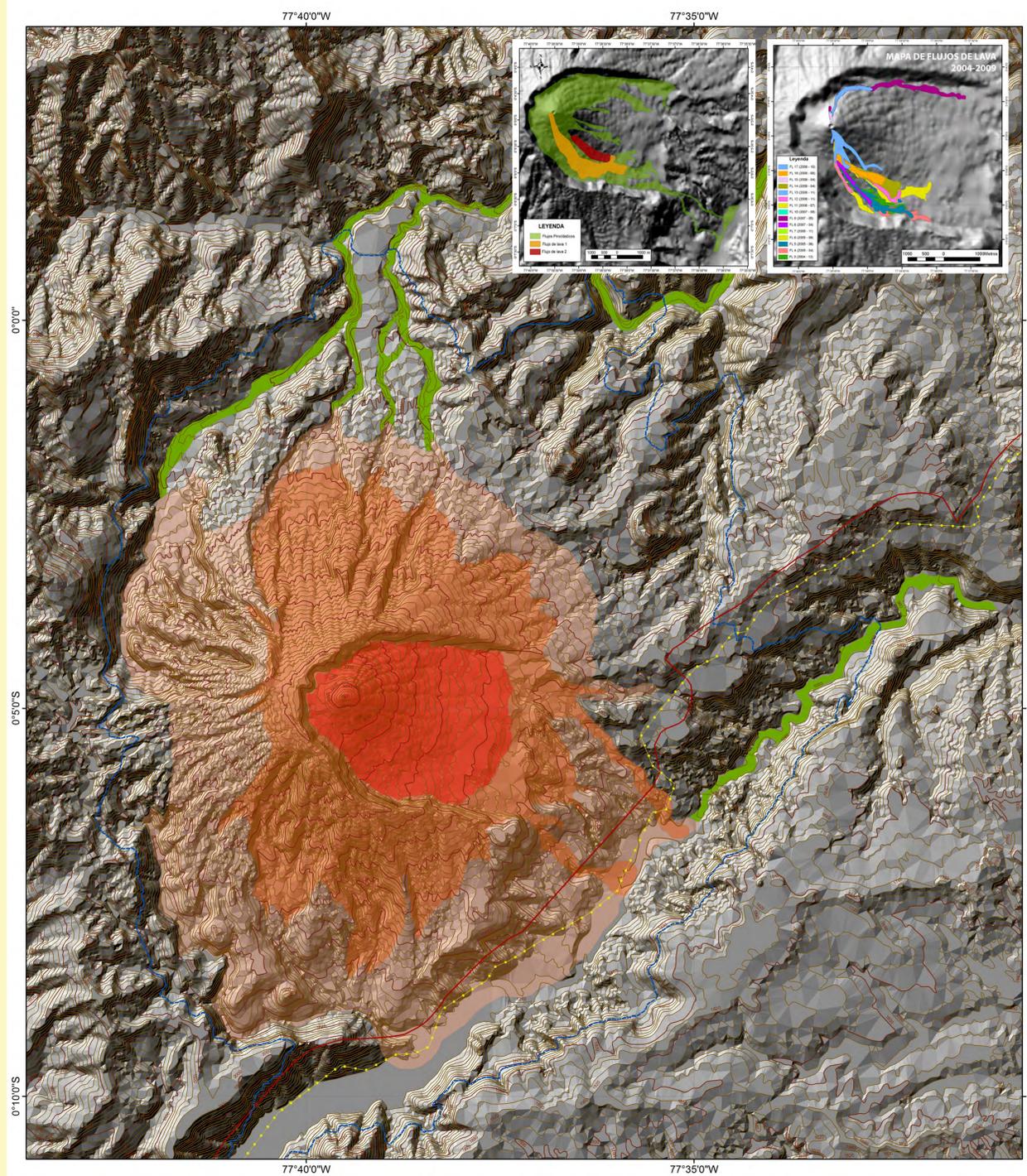
Bourquin, J.¹, Samaniego, P.^{1,2}, Ramón, P.², Bonadonna, C.³, Kelfoun, K.^{1,2}, Vallejo, S.¹, Hall, P.¹, Mothes, P.¹, LePennec, J.L.², Yepes, H.¹

¹ Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional
² Institut de recherche pour le développement
³ Universidad de Ginebra, Centre d'Etude des Risques Géologiques
 Quito - Ecuador; agosto 2011
www.igepn.edu.ec, Telf. 2 225655, 2 227031

Impresión con financiamiento de la "Direction de l'information et de la culture scientifiques pur le Sud (DIC)" del IRD.
 Gran cantidad de la información aquí plasmada ha sido obtenida gracias al apoyo logístico del OCP en épocas de crisis.

Referencias
 Bonadonna, C., C.B. Connor, B.F. Houghton, L. Connor, B. Byrne, A. Long, and T. K. Heide (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Taupo, New Zealand. *J. Geophys. Res.*, 110, B03203.
 Crandell, R. C., B. Miller, J. Glicken, M. Choukroun, and G. Newhall (1984). Catastrophic debris avalanche from ancient Mount Shasta volcano. *Geology*, 12, 149-154.
 Hall, M., P. Ramon, P. Marfisi, J. J. Lafreniere, A. Garcia, P. Somaruga, H. Vapet (2004). Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption. *Geothermics*, 34, 19-24.
 INEGI (1988). Estudio Volcanológico de El Reventador. 117p. Quito, Ecuador.
 Kelfoun, K., Schilling, S.P., Villeneuve, J.W. (1995). Objective determination of tephra-ventilation hazard zones. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 107:972-984.
 Kelfoun, K. and Druitt, T.H. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *J. Geophys. Res.*, 110.

MAPAS DE LOS PELIGROS POTENCIALES DEL VOLCÁN REVENTADOR



Mapas de probabilidades de caída de piroclastos

