

4482

4487

Apuntes para un Curso Breve sobre

LOS PELIGROS VOLCANICOS

Robert I. Tilling

Edición

Bernardo Beate

Traducción

Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos
[World Organization of Volcano Observatories (WOVO)]

Una Comisión de la

*Asociación Internacional de Vulcanología y
Química del Interior de la Tierra*
[International Association of Volcanology
and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI)]

Apuntes para un Curso Breve sobre

LOS PELIGROS VOLCANICOS

2-3 de julio de 1989, Santa Fé, Nuevo México, U.S.A.

Robert I. Tilling y Raymundo S. Punongbayan
Co-Organizadores del Curso Breve

Robert I. Tilling
Edición

Bernardo Beate
Traducción

Publicado por

Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos
[World Organization of Volcano Observatories]

con el Apoyo de

División de Ciencias de la Tierra, UNESCO (Paris)
[Division of Earth Sciences, UNESCO (Paris)]

Oficina de Asistencia al Exterior en Caso de Desastres de USAID
[Office of Foreign Disaster Assistance,
U.S. Agency for International Development (USAID)]

Servicio Geológico de los Estados Unidos
[U.S. Geological Survey]

1993

INDICE

	PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS (Edición en Inglés)	<i>iv</i>
	PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS (Edición en Español)	<i>v</i>
CAPITULO 1.	INTRODUCCION Y MARCO GENERAL <i>Robert I. Tilling</i>	1
CAPITULO 2.	LOS PELIGROS VOLCANICOS <i>William E. Scott</i>	9
CAPITULO 3.	ZONIFICACION DE LOS PELIGROS VOLCANICOS Y PREDICCIONES A LARGO PLAZO <i>William E. Scott</i>	25
CAPITULO 4.	LA VIGILANCIA DE LOS VOLCANES Y PREDICCIONES A CORTO PLAZO <i>Norman G. Banks, Robert I. Tilling, David H. Harlow, y John W. Ewert</i>	51
CAPITULO 5.	LA HISTORIA DE ALGUNOS CASOS RECIENTES <i>Raymundo S. Punongbayan y Robert I. Tilling</i>	83
CAPITULO 6.	LAS RESPUESTAS CIENTIFICAS Y DEL PUBLICO <i>Robert I. Tilling y Raymundo S. Punongbayan</i>	105
	REFERENCIAS (Para todos los capítulos)	109

PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS

(Edición en Inglés)

La erupción catastrófica del Mount St. Helens el 18 de mayo de 1980 dio inicio a la peor década de crisis y desastres volcánicos desde 1902, año en el que tres erupciones durante un período de 6 meses (Mont Pelée, Martinica; Soufrière, St. Vincent; y Santa María, Guatemala) cobraron más de 36.000 vidas humanas (Tilling, 1989). Los desastres y crisis volcánicas de la década de los 80 aumentaron enormemente el nivel de conciencia científica y pública en lo referente a erupciones volcánicas y sus peligros asociados, impulsaron avances en vulcanología, llevaron a la creación de nuevos observatorios vulcanológicos, y estimularon la realización de numerosas conferencias, simposios y talleres internacionales sobre tópicos relacionados a los peligros volcánicos. Así, fue oportuno que los organizadores del 28° Congreso Geológico Internacional [IGC] (Washington, D.C. del 9 al 19 de julio, 1989) y de la Asamblea General sobre Magmatismo Continental de la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra [IAVCEI] (Santa Fe, Nuevo México, 25 de junio a 1° de julio, 1989) decidieron auspiciar conjuntamente un "Curso Breve sobre los Peligros Volcánicos."

Los capítulos aquí presentados proporcionan el marco para el curso breve de dos días, a llevarse a cabo el 2-3 de junio, 1989, en la Universidad de Santa Fe, Nuevo México. Este curso breve, co-auspiciado también por la División de Ciencias de la Tierra de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO] (París), estará abierto para participantes tanto en la reunión del IGC como de la IAVCEI. Evidentemente el vasto tema de los peligros volcánicos no puede ser cubierto de manera completa en tan sólo dos días. La meta fundamental de este curso breve es revisar algunos principios y métodos básicos de mitigación de los peligros volcánicos, enfatizando los países en vías de desarrollo, donde están ubicados la mayoría de los volcanes peligrosos del mundo. Además de conferencias y discusiones en el aula, el curso breve también incluye una excursión de medio día para examinar depósitos volcánicos y sus características, y para demostrar algunas mediciones utilizadas en el monitoreo volcánico.

Estos apuntes para el curso sólo se refieren a las actividades de aula, y pueden ser complementadas por medio de trabajos no publicados a ser distribuidos a los participantes. [El lector interesado puede obtener un juego de estos trabajos libre de costo contactando a cualquiera de los autores.] En vista de las limitaciones de tiempo y espacio, estos apuntes necesariamente son breves y generales; su intención no es ofrecer una cobertura completa de los temas, sino más bien proporcionar el marco de referencia para una discusión y ofrecer una guía hacia estudios más especializados y detallados (dados en las REFERENCIAS). En algunos aspectos, el curso breve de Santa Fe sigue el alcance y formato del componente de peligros volcánicos del "Programa de Entrenamiento para Peligros Geológicos e Hidrológicos" llevado a cabo con mucho éxito por el Servicio Geológico de los

Estados Unidos (USGS) en marzo de 1984 (Williams & Kitzmiller, 1984).

Este curso no podría haber sido ofrecido y llevado a cabo sin la participación de muchos grupos e individuos. Los comités organizadores del 28° IGC y de la Asamblea General sobre Magmatismo Continental de la IAVCEI, así como la División de Ciencias de la Tierra de la UNESCO, París, proporcionaron el apoyo logístico y motivacional. Mis agradecimientos más sinceros van para mi co-organizador, Raymundo S. Punongbayan, y para los conferencistas Norman G. Banks, John W. Ewert, David H. Harlow y William E. Scott, por haberse tomado el tiempo, a pesar de sus múltiples actividades, para servir en el equipo que llevó a cabo el curso. Uno o más borradores de los capítulos de estos apuntes para el curso fueron revisados por Steven Brantley, John J. Dvorak, C. Dan Miller, L.J. Patrick Muffler, Christopher G. Newhall, Donald W. Peterson, Patrick Pringle y Donald A. Swanson—todos ellos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Sus comentarios críticos y sugerencias valiosas mejoraron materialmente el contenido y la presentación de los capítulos. Un agradecimiento muy especial para Manuel Nathenson (USGS, Menlo Park) por sus consejos técnicos y ayuda en la preparación de la edición final (camera-ready copy), así como para Pamela Hanback (Unión Geofísica Americana [AGU] Washington, D.C.) por la armada cuidadosa de este volumen.

Los gobiernos de Canadá, Islandia, Francia, Italia, Japón, Estados Unidos y algunos otros países ayudaron a proporcionar y/o coordinar el apoyo logístico relacionado a las respuestas científicas a algunos desastres volcánicos de la década de los 80. En este sentido, las siguientes organizaciones internacionales desempeñaron papeles especialmente significativos: Instituto Vulcanológico Nórdico, Reykjavik; División de Ciencias de la Tierra, UNESCO, París; Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas de Ayuda en Caso de Desastres, UNDR0, Ginebra, y Organización Mundial de Observatorios Volcánicos (WOVO), una Comisión de la IAVCEI.

Finalmente, en nombre de todos los miembros de este equipo que elaboró el curso breve, deseo expresar nuestro reconocimiento por los estudios y observaciones de los fenómenos eruptivos realizados por nuestros colegas que trabajan en volcanes activos o potencialmente activos alrededor del mundo. Solamente se lograrán avances significativos en el monitoreo volcánico y en la predicción de erupciones en base a una mejor comprensión del funcionamiento de muchos volcanes individuales, en lugar de sólo unos pocos volcanes seleccionados.

Robert I. Tilling, Editor
Menlo Park, California
marzo de 1989

PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS (Edición en Español)

Desde la publicación de la edición en inglés de *Volcanic Hazards* (Tilling, 1989), el interés científico y público por los fenómenos volcánicos ha permanecido fuerte. El mantenimiento de un mayor nivel de conciencia respecto a erupciones volcánicas y sus peligros asociados refleja en gran medida la ocurrencia reciente de varias erupciones mayores: Volcán Redoubt (Alaska, U.S.A.) Diciembre 1989 - Agosto 1990, la cual causó estragos fuertes en la aviación civil y amenazó rutas navieras (Brantley, 1990); Volcán Kilauea (Hawaii, U.S.A.), cuya actividad muy prolongada y espectacular--que comenzó en 1983 y continúa al presente--ha destruido 180 casas y no da indicios de parar (Heliker & Wright, 1991); Volcán Unzen (Kyushu, Japón), el cual se reactivó en julio de 1990 después de casi dos siglos de no-actividad, y cuyos flujos piroclásticos, originados por colapso del domo, provocaron la muerte de 42 personas (incluyendo tres vulcanólogos) desde junio de 1991 y la evacuación de 12.000 personas (Shimozuru, 1991); y el Volcán Pinatubo (Luzon, Filipinas), cuya erupción cataclísmica del 15 de junio de 1991--la segunda o tercera más grande del siglo--causó cientos de muertos, destrucción generalizada y gran sufrimiento humano (según el Grupo Técnico del Observatorio Vulcanológico de Pinatubo, 1991). Así, la década de 1990 parece iniciar de manera igualmente ominosa que la anterior, que fue la peor en términos de desastres volcánicos desde comienzos de siglo.

Dentro de este contexto, es muy apropiado el que la década de 1990 ha sido designada por las Naciones Unidas como la *Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales* (DIRDN). Bien que ésta no fue su intención original, esta edición en español de los Apuntes para el "Curso Breve sobre Peligros Volcánicos" (Santa Fe, Nuevo México, Julio 1989) puede ser considerada como una contribución al programa de DIRDN, para mejorar las comunicaciones y la diseminación de la información dentro de la comunidad vulcanológica mundial. Muchos de los volcanes más peligrosos del mundo están

localizados en los países densamente poblados de habla hispana de la región Latinoamericana y del Caribe.

Mi profundo agradecimiento va para las siguientes personas y organizaciones que hicieron posible este volumen: Dr. Michio Hashizume (División de Ciencias de la Tierra, UNESCO, París) por su apoyo entusiasta del proyecto de traducción desde su inicio; la Oficina de Asistencia al Exterior en Caso de Desastres (OFDA) de USAID por correr con los gastos de impresión; el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) por contribuciones en especie durante la preparación de la edición final (camera-ready copy); y Dr. Alberto A. Giesecke (Director, Centro Regional de Sismología para América del Sur, Lima, Perú) por la coordinación administrativa del contrato con la UNESCO. Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento más sincero al Ing. Bernardo Beate (Instituto Ecuatoriano de Electrificación, Quito, Ecuador) por su traducción meticulosa del texto inglés y a la Sra. Patricia Beate por su ayuda oportuna durante la preparación y transmisión del texto en español.

Tal como se recalca en el *Prefacio y Agradecimientos* de la edición en inglés, estos apuntes para el curso breve no pretenden dar una cobertura total al vasto tema de los peligros volcánicos, sino más bien proporcionar una introducción y revisión de los principios básicos. El lector interesado puede profundizar en cualquier aspecto del tema consultando los estudios más especializados que se citan (ver REFERENCIAS). Espero sinceramente que este volumen sea de utilidad para mis colegas de habla hispana al iniciar o expandir la vigilancia y los estudios de evaluación de los peligros de los volcanes potencialmente peligrosos de sus países.

Robert I. Tilling, Editor
Menlo Park, California
julio de 1993

CAPITULO 1. INTRODUCCION Y MARCO GENERAL

Robert I. Tilling

U.S Geological Survey, Menlo Park, California 94025

Introducción

El volcanismo ha jugado un papel importante en el pasado geológico de nuestro planeta, tal como se evidencia en el origen volcánico de gran parte de la corteza terrestre, tanto debajo como fuera del mar. En la escala geológica del tiempo, la actividad volcánica ha beneficiado a la humanidad creando terrenos fértiles y de gran belleza escénica, los cuales estimulan y proporcionan sustento, permitiendo así el desarrollo de civilizaciones. Sin embargo, en la escala humana del tiempo, las erupciones volcánicas afectan de una manera negativa a la sociedad si éstas ocurren en regiones pobladas y/o cultivadas.

Se sabe que más de 1.300 volcanes han entrado en erupción durante los últimos 10.000 años; aproximadamente la mitad de éstos han registrado erupciones en tiempos históricos. Dos tercios de los volcanes activos se ubican en o cerca de los límites de las placas tectónicas en la región circumpacífica. Típicamente, unos 50 volcanes entran anualmente en erupción, y este promedio no ha variado apreciablemente en tiempos históricos (Simkin et al., 1981). Peterson (1986, tabla 15.1) ha estimado que unos 360 millones de personas - aproximadamente el 10% de la población del planeta - viven sobre o cerca de volcanes potencialmente peligrosos. Con la rápida expansión de la población humana, especialmente en los ya densamente poblados países en vías de desarrollo, y si se mantiene la frecuencia eruptiva actual, muchos millones de personas más estarán bajo la amenaza de alguna actividad volcánica futura. Dado que el "abandono total de todas las áreas volcánicas...no es una alternativa realista" (Walker, 1982, p.156), la comunidad científica y las autoridades civiles encaran un problema crónico y progresivamente más agudo al tener que enfrentar los peligros potenciales de erupciones futuras.

La Vulcanología: El Estudio de los Fenómenos Eruptivos

La ciencia de la vulcanología, en su sentido más amplio, comprende todos los estudios de los fenómenos magmáticos y volcánicos que ocurren tanto en el manto como en la corteza. A

propósito de este trabajo, se define a la vulcanología como el estudio del transporte y erupción de magma (Sigurdsson, 1987), enfatizando los volcanes activos o potencialmente activos (Tilling, 1987). La tabla 1.1 resume las relaciones cualitativas generales entre el tipo de volcán, la composición de la lava y el estilo eruptivo; para obtener una información más específica sobre los volcanes y sus productos y comportamiento, se sugiere al lector la consulta de libros de texto de vulcanología (p.e. Macdonald, 1972; Bullard, 1984; Williams & McBirney, 1979; Fischer & Schmincke, 1984). Muchos geocientíficos realizan levantamientos geológicos de terrenos volcánicos muy antiguos o llevan a cabo investigaciones sobre fenómenos volcánicos y magmáticos asociados que han ocurrido en el pasado geológico, pero solamente unos pocos trabajan en vulcanología (tal como se la definió arriba), y menos todavía están involucrados directamente en la evaluación y/o vigilancia de los peligros volcánicos.

La ciencia de la vulcanología ha estado asociada con, y ha sido catalizada por, los peligros volcánicos y los desastres. Por ejemplo, la primera descripción fehaciente de una erupción estaba contenida en dos cartas escritas por Plinio El Joven al historiador romano Tácito, describiendo en éstas la muerte de su tío, el famoso erudito romano Plinio el Viejo, quien se asfixió mientras observaba la erupción del Vesuvio en el año 79 de nuestra era (Sigurdsson et al., 1985 b). Sin embargo, la erupción de 1815 del Tambora (Sumbawa, Indonesia)--la erupción más grande y mortífera registrada por la historia--tuvo un impacto científico mínimo, por cuanto el volcán está ubicado en una región remota, las comunicaciones a nivel global eran pobres, y porque el estado de las ciencias naturales en ese tiempo era muy inmaduro (Simkin & Fiske, 1983). Ninguna expedición científica fue enviada al volcán Tambora hasta 1847, y pasaron ocho años más hasta que se publique el informe de la expedición (Zollinger, 1855) ! En contraste a esto, la erupción de 1883 del Krakatoa (Estrecho de la Sonda, Indonesia) causó gran revuelo tanto dentro de la comunidad científica como entre el público en general. La erupción indujo la primera investigación debidamente organizada de un desastre volcánico y sus

TABLA 1.1. Relaciones generales entre tipos de volcanes, tipo predominante de lava, estilos eruptivos y características eruptivas más comunes (según Tilling, 1987, Tabla 2).

Tipo de Volcán	Lava predominante		Estilo eruptivo	Características eruptivas más comunes
	Composición	Viscosidad relativa		
Escudo-Volcán ¹	Basáltica	Fluidal	Generalmente no explosivo a débilmente explosivo	Fuentes de lava, flujos de lava (extensos), lagos y pozas de lava
Estrato-volcán ²	Andesítica	Menos fluidal	Generalmente explosivo, pero a veces no explosivo	Flujos de lava (medianos), productos balísticos explosivos, caídas de tefra, flujos y oleadas piroclásticas
	Dacítica a Riolítica	Viscosa a muy viscosa	Típicamente muy explosivo, pero puede ser no explosivo, especialmente después una explosión grande	Productos balísticos explosivos, caídas de tefra, flujos y oleadas piroclásticas, flujos de lava (cortos) y domos de lava

¹ Ubicados generalmente en el interior de las placas tectónicas ("intraplaca"), y presumiblemente sobreyacen "puntos calientes," aunque también ocurren en otros ambientes tectónicos (p.e., Galápagos, Islandia, Kamchatka).

² Ubicados generalmente a lo largo o cerca de los márgenes de placas tectónicas convergentes (zonas de subducción); también se los denomina volcanes compuestos.

consecuencias, ya que, hacia finales del siglo 19, tanto la transportación global como las comunicaciones habían mejorado substancialmente durante una era de rápidos avances científicos y tecnológicos (Francis & Self, 1983; Simkin & Fiske, 1983). Se publicaron varias investigaciones de gran alcance dentro de los primeros cinco años después de la erupción (p.e. Verbeek, 1885; Judd, 1888; Symons, 1888). La vulcanología comenzó a emerger verdaderamente como una ciencia multidisciplinaria moderna con el establecimiento de observatorios vulcanológicos en Japón y Hawaii en 1911, en parte a causa de tres desastres volcánicos ocurridos en 1902 en la región centroamericana y del Caribe (Apple, 1987; Tilling, 1989).

Los Peligros Volcánicos y Otros Peligros Relacionados

Primeramente establezcamos claramente las diferencias entre peligros y riesgos. Las siguientes definiciones han sido adaptadas de Fournier d'Albe (1979):

Peligro es la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos o productos volcánicos potencialmente destructivos en un intervalo dado de tiempo.

Riesgo es la posibilidad de pérdida--de vidas humanas, propiedades, capacidad productiva, etc.--dentro de un área determinada sujeta a (los) peligro(s). Una

evaluación del riesgo involucra considerar la siguiente relación: $\text{Riesgo} = (\text{costo}) \times (\text{vulnerabilidad}) \times (\text{peligro})$, donde el costo puede incluir el número de vidas humanas, las propiedades, las obras de infraestructura y la capacidad productiva amenazadas; y vulnerabilidad es una medida de la proporción (0 a 100%) del costo susceptible a ser perdido en un evento peligroso dado.

Comparados con otros "desastres" naturales o inducidos por el hombre, aquellos causados por la actividad volcánica, considerados en base a una escala global, ocurren con poca frecuencia, "afectan" a mucho menos personas, y correspondientemente causan menos pérdidas de vidas humanas y menores daños materiales (ver Fig. 1.1 y 1.2). Sin embargo, las percepciones y definiciones de lo que constituye un "desastre" (Fig. 1.1) difieren ampliamente entre las autoridades oficiales, los periodistas y las personas afectadas. Asimismo, no existe un acuerdo general sobre el significado de "personas afectadas" (Fig. 1.2) por un desastre (muertos, heridos, desplazados, miembros de la familia desaparecidos, que han sufrido inconvenientes, etc.). De esta manera, la validez estadística de los datos mostrados en las Fig. 1.1 y 1.2 debe ser considerada a la luz de esta vaga terminología en los recuentos de los desastres. Sin embargo, la tendencia general que se muestra en estas dos figuras probablemente se mantendría, sin importar las definiciones y conjunto de datos utilizados.

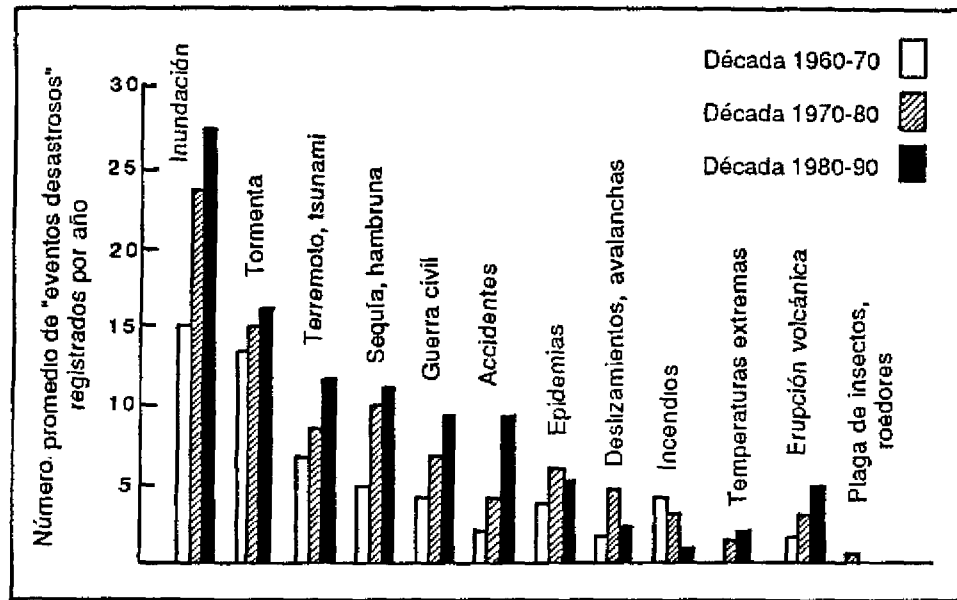


Fig. 1.1. Número promedio de "eventos desastrosos" registrados por año en el mundo (ver texto); excepto en los casos de las erupciones volcánicas, los datos para la década de los 1980's cubren solamente el período 1980-81. (Modificado de Wijkman & Timberlake, 1984, Fig.1). En esta figura "evento desastroso" se refiere a "una manifestación de una interacción entre fenómenos físicos o naturales extremos con un grupo humano vulnerable", cuyo resultado es "conmoción general, destrucción, pérdida de vidas y de medios de sustento, y personas heridas" (O'Keefe & Westgate, 1976).

La erupción más mortífera de la historia (Tambora, Indonesia, 1815) cobró la vida de 92.000 personas, lo cual es poco comparado con las 500.000 víctimas del peor huracán (Delta del Ganges, Bangladesh, 1970). Tal vez el peor desastre natural en

la historia ha sido el terremoto de Huahsien (Shensi, China) en 1556, donde murieron más de 820.000 personas (DeNevi, 1977). En un caso reciente, algunos observadores externos especulan que perecieron hasta 800.000 personas en el terremoto

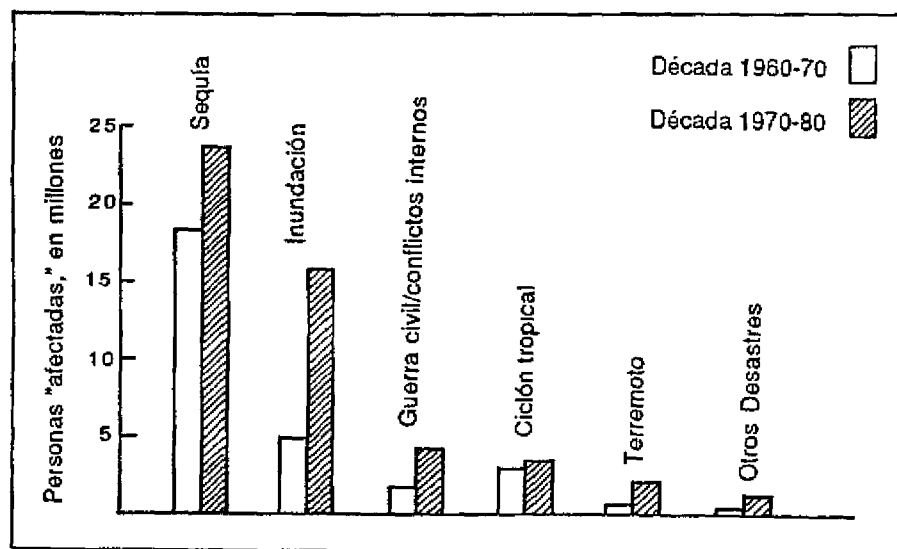


Fig. 1.2. Número de personas "afectadas" cada año por desastres naturales o inducidos por el hombre (ver texto); los desastres volcánicos están incluidos en la categoría de "otros desastres". Entre las décadas de los 1960's y los 1970's el número de personas afectadas cada año casi se ha duplicado. (Tomado de Wijkman y Timberlake, 1984, Fig.4).

TABLA 1.2. Lista de algunos desastres volcánicos notables desde el año 1000 D.C. en los que hubo víctimas fatales (las cifras están redondeadas a la decena más cercana). (Modificado de Yokoyama et al., 1984, Tabla 1, UNDRO/UNESCO, 1985, Tabla 1).

Volcán	País	Año	Causa Primaria de Muerte				
			Flujo piroclástico	Flujo de escombros	Flujo de lava	Hambruna post-eruptiva	Tsunami
Merapi	Indonesia	1006	*1.000				
Kelut	Indonesia	1586		10.000			
Vesuvio	Italia	1631			**18.000		
Etna	Italia	1669			**10.000		
Merapi	Indonesia	1672	*300				
Awu	Indonesia	1711		3.200			
Oshima	Japón	1741					1.480
Cotopaxi	Ecuador	1741		1.000			
Makian	Indonesia	1760					
Papadajan	Indonesia	1772	2.960				
Lakagfgar	Islandia	1783				9.340	
Asama	Japón	1783	1.150				
Unzen	Japón	1792					15.190
Mayon	Filipinas	1814	1.200				
Tambora	Indonesia	1815	12.000			80.000	
Galunggung	Indonesia	1822		4.000			
Nevado del Ruiz	Colombia	1845		1.000			
Awu	Indonesia	1856		3.000			
Cotopaxi	Ecuador	1877		1.000			
Krakatau	Indonesia	1883					36.420
Awu	Indonesia	1892		1.530			
Soufrière	St. Vincent	1902	1.560				
Mont Pelée	Martinica	1902	29.000				
Santa María	Guatemala	1902	6.000				
Taal	Filipinas	1911	1.330				
Kelut	Indonesia	1919		5.110			
Merapi	Indonesia	1951	1.300				
Lamington	Papua-Nueva Guinea	1951	2.940				
Hibok-Hibok	Filipinas	1951	500				
Agung	Indonesia	1963	1.900				
Mount St. Helens	E.U.A.	1980	***60				
El Chichón	México	1982	> 2.000				
Nevado del Ruiz	Colombia	1985		> 22.000			
TOTALES			65.140	53.900	28.000	89.340	53.090

* Incluye muertes ocasionadas por flujos de lodo asociados; sin embargo se ha cuestionado la validez de la erupción de 1006 (Djumarna et al., 1986).

** Incluye muertes por actividad explosiva y/o flujos de lodo asociados.

*** Las principales causas de muerte fueron impacto por explosión lateral y asfixia.

TABLA 1.3. Víctimas humanas por actividad volcánica, 1600-1986, agrupadas de acuerdo a la causa primaria de muerte. (Modificado de Blong, 1984, Tabla 3.2).

Causa primaria	1600 - 1899		1900 - 1986	
Flujos piroclásticos y avalanchas de escombros	18.200	(9.8 %)	36.800	(48.4 %)
Flujos de lodo (lahares) y crecidas	8.300	(4.5 %)	28.400	(37.4 %)
Caídas de tefra y proyectiles balísticos	8.000	(4.3 %)	3.000	(4.0 %)
Tsunami	43.600	(23.4 %)	400	(0.5 %)
Hambruna post-eruptiva, enfermedad, etc.	92.100	(49.4 %)	3.200	(4.2 %)
Flujos de lava	900	(0.5 %)	100	(0.1 %)
Gases y lluvias ácidas	-----	-----	*1.900	(2.5 %)
Otras o desconocida	15.100	(8.1 %)	2.200	(2.5 %)
TOTALES	186.200	(100 %)	76.000	(100.0%)
Muertes por año (promedio)	620		880	

* Incluye las muertes causadas por escapes letales de gas en dos lagos cratéricos en Camerún: 37, Lago Monoun, agosto de 1984 (Sigurdsson et al., 1987b); y >1.700, Lago Nyos, agosto de 1986 (Kling et al., 1987). El gas letal (dióxido de carbono) es en ambos casos de origen volcánico, aunque los mecanismos que produjeron la salida del gas no están bien entendidos.

de magnitud 7.8 ocurrido en Tangshan (China) en julio de 1976, a pesar de que datos oficiales revelan un número de muertos de alrededor de 240.000 (Shi Dignang, 1987).

Para los Estados Unidos, la pérdida económica anual debido a erupciones volcánicas es probablemente un orden de magnitud más bajo que aquellas producidas por terremotos, las cuales a su vez son un orden de magnitud menores que aquellas producidas sea por inundaciones o fallas del terreno (Hays & Shearer, 1981). White y Haas (1975) sugieren que la persona promedio que vive en los Estados Unidos tiene más probabilidades de morir de un ataque al corazón al palear nieve o de ser alcanzado por un rayo, que a causa de una erupción volcánica o de un terremoto. Sin embargo, para países más densamente poblados (p.e. Indonesia, Filipinas y Japón), los peligros volcánicos tienen un potencial mucho más alto para causar víctimas y pérdidas económicas desastrosas.

En el CAPITULO 2 se traen los principales tipos, la naturaleza, así como ejemplos seleccionados de peligros volcánicos.

Recuento Histórico de los Peligros y Desastres Volcánicos

La única base relativamente completa para evaluar la frecuencia y magnitud de los desastres volcánicos es el número de muertos que han ocasionado las erupciones (Tabla 1.2); una información comparable sobre pérdidas económicas e impactos ambientales adversos sólo se encuentra en forma fragmentaria, o no se encuentra. Se debe enfatizar, sin embargo, que las cifras de la Tabla 1.2 reflejan unos pocos eventos de baja frecuencia pero altamente destructivos. Por ejemplo, las tres catástrofes volcánicas en 1902 en la región centroamericana y del Caribe y la erupción de noviembre de 1985 del Nevado del Ruiz (Colombia), causaron alrededor del 75% de las muertes atribuidas a actividad volcánica en el siglo 20.

Desde el año 1000 DC, más de 300.000 personas han sido víctimas, directa o indirectamente, de la actividad volcánica. La Tabla 1.2 muestra claramente que la zona volcánica circumpacífica (Cinturón de Fuego del Pacífico) ha causado la mayoría de muertos: en efecto, aproximadamente los dos



Fig. 1.3. Diagrama que ilustra el hecho que un programa efectivo de mitigación de los peligros y riesgos volcánicos debe sustentarse sobre una base sólida de estudios básicos a largo plazo. El ápice está separado del resto del triángulo para ilustrar la división de las responsabilidades primarias entre los científicos y las autoridades civiles. Modificado de Tilling y Bailey (1985, Fig.1).

tercios de todas las víctimas relacionadas a erupciones volcánicas han ocurrido en tres países solamente (Colombia, Indonesia y Japón). Blong (1984, Tabla 3.2) analizó las víctimas humanas de erupciones volcánicas durante el período 1600-1982 en términos de los peligros volcánicos que las causaron. Una tabulación modificada de su análisis, actualizado hasta 1986 (Tabla 1.3), permite establecer las siguientes observaciones:

- 1) El número promedio de víctimas por año para el período 1900-1986 (880) es mayor al promedio para los tres siglos precedentes (620), a pesar del despunte en el siglo 20 de la vulcanología moderna.
- 2) En el siglo 20, la incidencia de muertes causadas por peligros indirectos (p.e., hambruna post eruptiva, tsunamis; ver CAPITULO 2) ha sido reducida significativamente. Esta reducción refleja, en parte, el desarrollo de comunicaciones globales rápidas, de sistemas de reacción inmediata para la entrega de ayuda, y de una efectiva red internacional de aviso de tsunamis. Igualmente, y quizás esto sea más importante, en este siglo no se han producido tsunamis grandes, y destructivos generados por erupciones.
- 3) En el siglo 20 el número de muertes causadas por algunos peligros directos debidos a procesos de flujo (p.e., flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, flujos de lodo - ver CAPITULO 2) se ha incrementado dramáticamente, reflejando en gran parte el impacto desastroso de solamente dos catástrofes (Mont Pelée, 1902; y Nevado del Ruiz, 1985).

Algunas posibles explicaciones para las observaciones arriba mencionadas se discutirán más adelante.

Mitigación del Peligro y Reducción del Riesgo Volcánico

Los estudios de los peligros volcánicos deben estar sustentados sobre una base sólida de investigaciones fundamentales de los volcanes (Fig. 1.3), lo cual incluye un levantamiento geológico y geofísico debidamente integrado, una caracterización petrológica y geoquímica de los productos eruptivos y la datación (determinación de la edad) de muestras estratigráficamente bien controladas. Estos estudios deben ser llevados a cabo sistemáticamente en un programa a largo plazo--idealmente antes de que los volcanes muestren cualquier signo de reactivación; estos estudios no pueden ser realizados bajo circunstancias de apremio en un ambiente tenso, lleno de ansiedad que prevalece durante las emergencias volcánicas. Los resultados de estos estudios básicos a largo plazo constituyen la base para descifrar el comportamiento eruptivo pasado, para entender mejor el comportamiento presente, y, por extrapolación, para predecir el posible comportamiento futuro del volcán. Específicamente, el punto de partida para la mitigación de los peligros y riesgos volcánicos es una comprensión global de los fenómenos eruptivos y la frecuencia de las erupciones.

Un programa efectivo para mitigar el riesgo de las erupciones volcánicas (y otros fenómenos relacionados) debe incluir los siguientes componentes: 1) la identificación de los volcanes de alto riesgo; 2) la evaluación y zonificación de los peligros

volcánicos; 3) la vigilancia volcánica y predicción de erupciones; y 4) el manejo de las emergencias volcánicas. Estos tópicos constituyen el foco primordial de los capítulos subsiguientes, pero algunas acotaciones introductorias, basadas en Tilling (1989) se dan a continuación.

Identificación de los Volcanes de Alto Riesgo

Solamente una pequeña fracción de los aproximadamente 600 volcanes activos o potencialmente activos conocidos en el mundo ha sido, o está siendo, estudiada en algún detalle. El problema es simplemente que existen demasiados volcanes, demasiado pocos científicos y equipo, y magros recursos económicos para estudiar estos volcanes y vigilarlos. Mientras este problema afecta incluso a los países desarrollados (p.e., Francia, Islandia, Italia, Japón y los Estados Unidos), es especialmente serio en el caso de los países en vías de desarrollo (p.e., Indonesia, Filipinas, los países de América Latina). Por lo tanto, es necesaria la identificación de volcanes de alto riesgo con el objetivo de determinar cuáles merecen la mayor y posiblemente la más inmediata atención por parte de científicos y autoridades gubernamentales.

Se han realizado en el pasado varias compilaciones de los volcanes "peligrosos" o de alto riesgo (p.e., Shimozuru, 1975; Lowenstein, 1982; Lowenstein & Talai, 1984; Yokoyama et al., 1984), basadas en varios criterios de clasificación que incluyen la historia y el comportamiento eruptivo, la composición y distribución de los productos eruptivos, eventos conocidos de deformación del suelo o sísmicos, y consideraciones demográficas. Sin embargo, todas aquellas compilaciones son deficientes, porque los datos geológicos y geofísicos necesarios son inadecuados, incompletos, o inexistentes para muchos volcanes. Por ejemplo, el Nevado del Ruiz no estuvo incluido en la lista de volcanes de alto riesgo compilada hasta 1983 (Yokoyama et al., 1984); dos años más tarde su erupción produjo el peor desastre volcánico desde la erupción en 1902 del Mont Pelée. Asimismo, Yokoyama et al. (1984) puntualizan que si se hubiera evaluado el volcán El Chichón, utilizando los mismos criterios, pero antes de su erupción de 1982, (Alcayde, 1983; Duffield et al., 1984; Luhr y Varekamp, 1984) éste tampoco hubiera sido identificado como de alto riesgo.

La Evaluación de los Peligros y su Zonificación

Tal como fue resumido por Crandell et al. (1984), los datos esenciales necesarios para una evaluación adecuada de los peligros deberían incluir lo siguiente: 1) los registros completos de las erupciones históricas; 2) la actividad eruptiva prehistórica, deducida del registro geológico; 3) datos geológicos (especialmente estratigráficos), petrológicos y geoquímicos sobre la naturaleza, distribución y volumen de los productos eruptivos, y 4) la datación de los productos volcánicos y de los eventos interpretados a partir de los mismos. En conjunto estos datos permiten la reconstrucción del comportamiento eruptivo pasado del volcán, lo cual provee la base para evaluar los peligros potenciales de futuras erupciones.

Las evaluaciones de los peligros volcánicos generalmente toman como premisa el asumir que en general las mismas áreas en los alrededores del volcán serían afectadas por similares eventos eruptivos en el futuro a una frecuencia promedio igual que en el pasado. Mientras más largo sea el período de tiempo que abarca la base de datos utilizada para reconstruir el comportamiento eruptivo pasado, más útil y confiable será la evaluación resultante de los peligros volcánicos. Mapas de zonificación del peligro volcánico a escalas apropiadas deberían constituir una parte integral de la evaluación de los peligros, ya que éstos presentan la información pertinente en forma resumida, fácilmente comprensible tanto por los científicos como por las autoridades civiles. Tales mapas persiguen dos objetivos importantes: 1) proveer los lineamientos básicos para una planificación de largo alcance de la utilización del terreno en los alrededores de los volcanes, que tome en cuenta los peligros potenciales de erupciones futuras; y 2) determinar cuáles áreas deberían ser evacuadas y evitadas durante erupciones. Sin embargo, los volcanes no necesariamente siguen justo o aproximadamente un patrón de comportamiento similar al seguido en el pasado, y pueden ocurrir eventos catastróficos que exceden cualquier precedente eruptivo en el mismo volcán (Crandell et al., 1984). Por lo tanto, hasta los mejores mapas de evaluación de peligros y zonificación de los mismos, basados en un buen conocimiento del comportamiento eruptivo pasado, no son perfectos. Por ejemplo, el mapa de zonificación de peligros elaborado por Crandell y Mullineaux (1978, Placa 2), a pesar de ser altamente preciso, no anticipó plenamente la fuerza de la explosión lateral que ocurrió durante el climax de la erupción del Mount St. Helens. La explosión del 18/05/1980 se extendió tres veces más allá del volcán que cualquier explosión anterior conocida del mencionado volcán y afectó un área aproximadamente 10-15 veces mayor que las conocidas (Miller et al., 1981).

Idealmente, deben realizarse evaluaciones del peligro para todos los volcanes de alto riesgo antes de que cualquiera de ellos muestre señales de reactivación. Quizás el mejor ejemplo de una evaluación oportuna de los peligros fue aquella realizada para el Mount St. Helens, publicada dos años antes de su reactivación en 1980 (Crandell & Mullineaux, 1978). Actualmente se encuentran disponibles mapas de evaluación de los peligros volcánicos y/o de zonificación de los peligros, para algunos de los volcanes de alto riesgo, a nivel mundial, pero muchos de ellos son preliminares y carecen de suficiente detalle. Desafortunadamente, evaluaciones de peligros de calidad aceptable todavía no están disponibles para muchos volcanes potencialmente peligrosos ubicados en áreas densamente pobladas.

La Vigilancia Volcánica y la Predicción de las Erupciones

La experiencia obtenida en varios volcanes debidamente vigilados demuestra claramente que la mayoría, y tal vez todas las erupciones están precedidas y acompañadas por cambios geofísicos y/o geoquímicos en el estado del volcán. A la fecha, mediciones de las variaciones en la sismicidad y deformación del suelo han proporcionado los datos más confiables y más

ampliamente utilizados en la vigilancia de los volcanes. Varias otras técnicas geofísicas de vigilancia volcánica (p.e., micro-gravimetría, geomagnetismo, geoeléctrica, radar y radiación térmica), todavía tienen que ser consideradas experimentales, a pesar de que prometen mucho. De una manera similar, los métodos de vigilancia geoquímica, basados en variaciones temporales en la cantidad y/o rata de emisión de ciertos gases volcánicos, (p.e., dióxido de azufre, dióxido de carbono, hidrógeno, radón, helio y mercurio) también están siendo probados en algunos volcanes. Una vigilancia volcánica óptima se obtiene de la mejor manera al emplear una combinación de enfoques, en lugar de fiarse en un solo método o indicador precursor. En este trabajo solamente se cubren técnicas de vigilancia sísmicas y de deformación del suelo (ver CAPITULO 4).

El progreso de la vigilancia volcánica ha involucrado el desarrollo de instrumentos electrónicos cada vez más sofisticados y complejos, así como también el uso intensivo de procesos y modelos de computadora para la elaboración de los datos. Estas técnicas, tecnológicamente muy sofisticadas, son muy costosas y requieren considerables recursos monetarios y científicos, difícilmente disponibles, especialmente en los países en vías de desarrollo. No siempre es posible o fácil aplicar o utilizar exitosamente los recursos de alta tecnología. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de desarrollar métodos tecnológicamente sencillos y confiables, y de amplia aplicación, bajo costo y fácil utilización. Por ejemplo, la medición rutinaria entre puntos de nivelación utilizando cintas aceradas, provee una manera efectiva y de bajo costo para verificar desplazamientos horizontales a gran escala. Este tipo de mediciones de los movimientos de pequeñas fallas de sobrecorrimiento en los alrededores del domo en etapa de crecimiento, ha suministrado excelentes resultados en predecir las erupciones de domo relacionadas al crecimiento del mismo en el caso de las erupciones del Mount St. Helens (Swanson et al., 1983).

La vigilancia volcánica provee los datos primarios para la predicción de erupciones a corto plazo (horas a meses); el registro geológico generalmente proporciona los principales datos para una predicción a largo plazo (un año o más). En años recientes, el estado de conocimiento sobre la predicción de erupciones volcánicas a corto plazo ha avanzado notablemente en volcanes debidamente vigilados. Por ejemplo, los científicos del

Observatorio Vulcanológico de las Cascadas han predicho exitosamente casi todos los eventos que han construido domos en el Mount St. Helens desde junio de 1980 (Swanson et al., 1983, 1985). Hasta ahora no se ha conseguido establecer una capacidad de predicción rutinaria para erupciones explosivas grandes o para predicciones a largo plazo. Sin embargo, con aplicaciones más amplias e intensivas de las tecnologías de vigilancia más comúnmente utilizadas, las señales precursoras de grandes erupciones explosivas deberían ser reconocibles y probablemente útiles en la predicción de dichos eventos.

El Manejo de las Emergencias Volcánicas

El elemento más crítico de todos en el marco de un programa efectivo de mitigación del riesgo volcánico, lo constituye el manejo de las emergencias volcánicas (UNDRO/UNESCO, 1985), ya que es el enlace vital para traducir la información científica sobre la evaluación y vigilancia de los peligros volcánicos en planes para salvaguardar vidas y propiedades, y en acciones concretas durante un desastre o una crisis volcánica. Por ejemplo, un mejor manejo de la emergencia volcánica en el caso del Nevado del Ruiz podría haber reducido enormemente el gran número de muertos en la erupción de 1985 (Herd et al., 1986; Tomblin, 1988; Tilling, 1989). Pero este elemento, tan importante para reducir el riesgo volcánico, no ha concitado - ni concita - gran interés por parte de científicos y de los responsables de la toma de decisiones, ni siquiera en los países desarrollados que tienen volcanes activos o potencialmente activos. Esta situación, aunque lamentable, quizás es comprensible debido a que las erupciones volcánicas ocurren con una frecuencia baja en relación al tiempo de vida humana, y comparado con otros tipos de peligros, sean éstos naturales o inducidos por el hombre.

Dadas sus amplias implicaciones socio-económicas, la responsabilidad primaria para el manejo de las emergencias volcánicas yace en manos de las autoridades civiles (ver Fig. 1.3). A pesar de que el tema del manejo de una emergencia volcánica no está dentro de los objetivos de este trabajo, más bien dirigido a los aspectos científicos de los peligros volcánicos, en el CAPITULO 6 se exponen algunos de los pasos a seguir por parte de los geocientíficos a fin de mejorar el manejo de las emergencias volcánicas.