

RIESGO VOLCÁNICO

R. Ortiz

Dpto. Volcanología. Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. c/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

INTRODUCCIÓN

La Volcanología es una ciencia joven que ha experimentado un considerable avance en estos últimos veinte años, existiendo buenas escuelas de volcanólogos y una amplia literatura al respecto (Araña y Ortiz, 1984; Cas y Wright, 1987; Wohletz y Heiken, 1992). Sin embargo, el estudio de la actividad volcánica en una región cambia substancialmente cuando va dirigido a la evaluación de la peligrosidad volcánica (Blong, 1984; Tilling, 1989). Debe plantearse el estudio del volcán en dos frentes: hay que conocer cuál es el estado del volcán a través de su historia eruptiva, de los magmas que intervienen, de sus ciclos de evolución magmática y de los distintos mecanismos eruptivos. Por otra parte, se deben individualizar los peligros volcánicos asociados a cada estado evolutivo, determinando su periodo de retorno y los parámetros que lo caracterizan (Araña y Ortiz, 1993). Una reciente revisión de los desastres naturales ha centrado la catástrofe volcánica en su justo término (2% en pérdidas del total de las catástrofes), lo que contribuye a desarrollar una política realista de mitigación del riesgo volcánico a largo plazo y de cobertura mundial. Hoy también se tiende a analizar el impacto del fenómeno volcánico paralelamente a los otros desastres naturales, con la finalidad de desarrollar una política de mitigación homogénea (Mc Call et al., 1993; Alexander, 1993; Kovach, 1995), a la vez que se desarrollan nuevas herramientas que facilitan la toma de decisiones en situaciones críticas (Funtowicz y Ravetz, 1995).

La existencia y dimensión del riesgo volcánico es un concepto que gradualmente se está imponiendo en todo el mundo, debido a las últimas erupciones catastróficas y su impacto, magnificado por los medios de comunicación de masas y, especialmente por la labor de concienciación y divulgación que se realiza con motivo de la Década para la Mitigación de los Desastres Naturales. Podemos decir que en estos últimos años se está impulsando una cultura para la mitigación de los desastres naturales, desarrollándose metodologías para la estimación objetiva del riesgo, teniendo presente que su análisis riguroso afecta a todos los estamentos de la estructura social y para varias categorías de elementos expuestos a riesgo. Son numerosas las publicaciones recientes dedicadas al tratamiento unificado de los efectos negativos de los desastres naturales. En todas ellas presentan un peso importante los temas dedicados al riesgo sísmico, dado su gran impacto económico y el amplio desarrollo alcanzado por la ingeniería sísmica (Tiedemann, 1992). Un error frecuente es asociar el riesgo volcánico y el riesgo sísmico. Ambos sólo tienen en común ser los desastres naturales popularmente más espectaculares, quizá, porque pocas veces producen un impacto lo suficientemente grande para saltar a la primera página de los medios de comunicación y por ser un reflejo de la actividad interna del planeta. Una diferencia esencial entre el tratamiento del riesgo sísmico y el volcánico radica que el peligro sísmico es único (el terremoto) y casi instantáneo, mientras que la erupción volcánica puede prolongarse durante meses y los factores de peligro son múltiples: coladas lávicas, flujos y caída de piroclastos, lahares y avalanchas, gases, sismos volcánicos, tsunamis, anomalías térmicas, deformaciones del terreno, etc. En primer lugar, hay que considerar como un todo

el conjunto de elementos (instituciones, medios y personas) que intervienen en caso de ocurrencia de una erupción. Es absurdo que se potencie la estructura de la Protección Civil si, simultáneamente, no se refuerza el equipo científico, y poco se conseguirá, si esto no lleva acompañado un esfuerzo educacional a todos los niveles (Araña y Ortiz, 1996).

DEFINICIÓN DEL RIESGO

El riesgo podría definirse, en términos abstractos, como la expectación de que ciertos eventos produzcan un impacto adverso sobre algunos elementos expuestos. Esta expectación está basada en la racional proyección de experiencias, ocurridas en el pasado, al futuro inmediato. Son los intereses económicos los que introducen en la sociedad el concepto actual y la consiguiente cuantificación del Riesgo. Esto ocurre en épocas muy recientes, después de que el término *catástrofe natural* sustituye al de *castigo divino*, dándole así una opción a la Ciencia en el entendimiento de los fenómenos naturales. De acuerdo con el nivel del conocimiento actual del problema del análisis del riesgo, una parte importante del mismo se enmarca en un ámbito probabilístico que debe conjugarse con el conocimiento determinista que exista del fenómeno objeto de estudio. La adopción de este marco permite extraer, mediante el uso de modelos apropiados y datos reales, importantes conclusiones para la mitigación del impacto de las catástrofes naturales. Debemos tener siempre presente que la ocurrencia de un desastre es el resultado de la conjunción de múltiples elementos (cadena o árbol de sucesos). El establecimiento de un marco para el estudio de los riesgos asociados a los desastres naturales requiere la introducción de una serie de conceptos básicos que permitan relacionar de forma inequívoca los distintos desastres y sus efectos (cuadro 1).

Cuadro 1. Conceptos para la formulación del riesgo volcánico	
Peligro volcánico	Expectación de la incidencia de un fenómeno ligado a la actividad volcánica. Se debe expresar como la probabilidad de que ocurra el fenómeno en un determinado periodo de tiempo
Factor de peligro	El PELIGRO VOLCÁNICO se descompone en elementos más sencillos que pueden evaluarse separadamente (lavas, bombas, lahares, etc.)
Vulnerabilidad	Expectativa de daño o pérdida infligida a un elemento expuesto y condicionada a la severidad de la acción del evento volcánico. Se expresa el porcentaje de daño referido a la pérdida total para la acción esperada
Elemento de riesgo	Cualquier valor que pueda resultar adversamente afectado como consecuencia de la incidencia de un evento volcánico
Riesgo específico	Expectación de daño o pérdida infligida a un elemento de riesgo, durante un cierto período de exposición
Riesgo	Riesgo específico referido a coste

La adopción de una metodología común a todos los desastres, permite una mejor comprensión de la problemática de los distintos riesgos por parte de los estamentos sociales involucrados, y un mejor aprovechamiento de los recursos empleados en su mitigación. El concepto actual del riesgo lleva implícita su "no eliminabilidad". Así, el riesgo tendrá siempre un valor numérico (monetario o en número de víctimas), que podrá calcularse con

algún tipo de fórmula. Todas estas fórmulas, en el caso del riesgo volcánico, incluyen el producto de la *peligrosidad* volcánica por la *vulnerabilidad* y por la *exposición*. Al ser las funciones de peligrosidad y vulnerabilidad distribuciones definidas en un marco probabilístico, hay que entender este producto como un producto de convolución entre funciones.

$$\langle \text{RIESGO} \rangle = \langle \text{VULNERABILIDAD} \rangle * \langle \text{EXPOSICION} \rangle * \langle \text{PELIGRO} \rangle$$

Según esta expresión, para establecer el riesgo se debe obtener la peligrosidad y la vulnerabilidad para cada punto de la zona en estudio. La peligrosidad y la vulnerabilidad pueden evaluarse siguiendo dos metodologías distintas: en base al estudio de los efectos de erupciones pasadas (métodos observacionales) o partiendo de modelos teóricos de los fenómenos y sus efectos (métodos predictivos). En el estado actual del conocimiento del fenómeno volcánico se utiliza un método mixto, que conjuga la observación detallada de los efectos de las pasadas erupciones ocurridas en la zona y, mediante técnicas numéricas basadas en la física de los fenómenos volcánicos, modeliza los efectos de la erupción esperada (Barberi et al., 1989; Dobran et al., 1990). El carácter estadístico de los análisis de riesgo volcánico requiere que los trabajos de muestreo en campo satisfagan dos condiciones

- suficientemente numerosos para que el resultado sea estadísticamente creíble
- suficientemente homogéneos para ser significativos

Estos dos requerimientos entran en ocasiones en conflicto, especialmente en el ámbito de las Ciencias de la Tierra, donde no siempre es fácil muestrear adecuadamente o donde los intervalos temporales entre los fenómenos no permiten tener un conocimiento directo de los mismos. Las vulnerabilidades pueden determinarse tanto para estructuras simples como para sistemas multicomponentes. La vulnerabilidad frente a la exposición a los diferentes peligros volcánicos es difícil de determinar experimentalmente, pues tenemos muy poca experiencia directa en erupciones catastróficas que hayan afectado un área urbana desarrollada. Por ello, debemos extrapolar la información obtenida de los efectos producidos sobre estructuras simples, generalmente rurales, a sistemas complejos. Esta extrapolación resulta muy difícil de realizar, por lo que hay que acudir a la utilización de métodos estadísticos como puede ser Montecarlo, considerando los efectos sobre las estructuras situadas en distintos escenarios (Sandi, 1986, 1995). Esta metodología está ampliamente desarrollada para el caso de la determinación de las vulnerabilidades en el riesgo sísmico, donde terremotos destructores como el de Ciudad de México en 1995 o el ocurrido en Campania (Italia) en 1980, han aportado suficientes datos experimentales.

El daño causado por una erupción volcánica depende en primer lugar del tipo y magnitud de la erupción, de la distancia entre el elemento de riesgo y la fuente, de la topografía, del viento y otras variables meteorológicas, de la vulnerabilidad del elemento de riesgo y, finalmente, del sistema de alarma y de la optimización del riesgo. Una vez evaluados los distintos factores de peligro volcánico, con clara referencia a su magnitud, extensión, duración y período de retorno, se debe proceder a estudiar los elementos de riesgo, definiendo para cada uno de ellos y para cada uno de los peligros su vulnerabilidad, la cual será función de sus propiedades estructurales y de su distancia al centro de emisión. El factor de exposición, que siempre reduce el factor de riesgo, introduce el hecho de que el elemento de riesgo no estará permanentemente en la zona de peligro y se expresa en % del

tiempo total. Por ejemplo, una construcción se supone que sólo durará 50 años, que una cosecha sólo está amenazada durante seis meses al año, los turistas sólo están en verano, etc.

El concepto de peligrosidad volcánica engloba aquel conjunto de eventos que se producen en un volcán y pueden provocar daños a personas o bienes expuestos, por encima de un nivel o grado de riesgo asumido. Los fenómenos que ocurren en un volcán son bien conocidos desde hace mucho tiempo, sin embargo, para valorarlos en su aspecto directamente relacionado con el riesgo volcánico es útil repasar las grandes catástrofes de origen volcánico de las que tenemos noticias (Araña, este volumen). Se observa que las erupciones que han producido mayor número de muertes lo han hecho de modo indirecto: provocando hambre al arruinar las cosechas, desencadenándose lahares o tsunamis que han llevado la destrucción hasta zonas muy lejanas del aparato volcánico o por terremotos probablemente tectónicos ocurridos en la zona. Esto es debido a que un volcán no pasa inmediatamente del más absoluto reposo a la más violenta actividad, por lo que todas las grandes erupciones vienen precedidas de actividad menor, pero suficiente para que las poblaciones próximas al volcán evacúen espontáneamente.

La mayor parte de los eventos volcánicos sólo suceden en las proximidades del volcán (caída de bombas y nubes de gases tóxicos) o bien presenta una movilidad baja, como las lavas. Incluso los grandes efectos del volcanismo explosivo están limitados a un entorno de pocos kilómetros. Otras catástrofes asociadas a los volcanes, como pueden ser los lahares o los deslizamientos de ladera pueden ocurrir sin erupción o terremoto, disparados simplemente por unas lluvias anormales que inestabilizan los materiales volcánicos. No sólo las vidas humanas son los elementos de riesgo, ya que nuestra sociedad posee y depende de estructuras básicas muy vulnerables, como son los sistemas de comunicación o las redes de distribución de agua y energía. Además, los núcleos urbanos en la proximidad de volcanes potencialmente peligrosos son cada vez mayores, llegándose en algunos casos a urbanizar hasta las laderas de un volcán de alto riesgo como el Vesubio. Es probable que la escala de los desastres volcánicos haya que modificarla dentro de pocos años, cuando se produzca una catástrofe volcánica en el nuevo orden urbanístico (Chester, 1993).

PELIGROSIDAD VOLCÁNICA

El estudio de la peligrosidad volcánica exige dividir cada uno de los episodios volcánicos en elementos muy sencillos que se evalúan independientemente (cuadro 2). Cada uno de estos elementos constituye un peligro volcánico, debiéndose definir para cada uno de ellos su magnitud (volumen, energía), alcance, duración del impacto y tiempo de propagación. Además, deberemos establecer las relaciones secuenciales entre ciclos eruptivos, peligros y periodos de retorno. Debe tenerse presente que toda esta información será procesada posteriormente de modo homogéneo, entrando como capa en el sistema de información geográfica a fin de poder establecer los mapas de riesgo volcánico. Este proceder es muy distinto al que se sigue habitualmente para fines académicos. Una vez aislados los tipos de peligro correspondientes a cada una de las fases del ciclo eruptivo, debe procederse a analizarlos individualmente, siempre tratando de poner de manifiesto aquellos aspectos que tengan relevancia a efectos de daños. Además, en aquellos casos que sea posible, debe realizarse el análisis del peligro volcánico de forma que puedan determinarse los parámetros físicos necesarios para la modelización numérica del mismo. En todo caso

deberemos establecer las leyes de atenuación con la distancia, aunque sea de modo empírico (Ortiz y Araña, 1996).

Cuadro 2. Peligrosidad volcánica (NLA 1992 modificado)	
Factores de peligro	Tipo de daño
Proyección de bombas y escorias	Daños por impacto. Incendio
Caída de piroclastos	Recubrimiento por cenizas. Colapso de estructuras. Daños a la agricultura. Daños a instalaciones industriales
Dispersión de cenizas	Problemas en tráfico aéreo. Falta de visibilidad
Lavas y domos	Daños a estructuras. Incendios. Recubrimiento por lavas
Coladas y Oleadas Piroclásticas (Nubes ardientes)	Daños a estructuras. Incendios. Recubrimiento por cenizas
Lahares	Daños a estructuras. Arrastres de materiales. Recubrimiento por barros
Colapso total o parcial del edificio volcánico	Daños a estructuras. Recubrimiento por derrubios. Avalanchas. Tsunami inducido
Deslizamiento de laderas	Arrastres de materiales. Recubrimiento por derrubios. Daños a estructuras
Gases	Envenenamiento. Contaminación aire y agua
Onda de choque	Rotura de cristales y paneles
Terremotos y temblores volcánicos	Colapso del edificio volcánico. Deslizamiento de masas. Daños a estructuras
Deformación del terreno	Fallas. Daños a estructuras
Variaciones en el sistema geotérmico de acuíferos	Cambios en la temperatura y calidad del agua
Inyección de aerosoles en la estratosfera	Impacto en el clima. Efectos a largo plazo y/o a distancia

PERIODOS DE RETORNO. ASPECTOS PROBABILÍSTICOS

Cada tipo de volcán tiene una vida media estimada, pero en este parámetro es determinante el origen del magmatismo y el marco geodinámico. En cualquier caso, hay que distinguir entre los escudos basálticos, alimentados casi directamente desde zonas muy profundas, y los estratovolcanes alimentados desde unas cámaras someras que las erupciones vacían periódicamente y vuelven a rellenarse desde zonas profundas. Sin embargo, también aquí puede haber una transición ya que no es extraño que los escudos basálticos terminen convirtiéndose en estratovolcanes (Araña y Ortiz, 1993). La identificación de cambios regulares o secuencias en la actividad volcánica no tiene porque referirse exclusivamente a los grandes ciclos magmáticos, ya que hay otras pautas de menor entidad que, correctamente interpretadas, proporcionan importantes elementos de predicción. La estimación de la probabilidad de que ocurra una erupción en uno cualquiera de los volcanes

que existen en la Tierra debe hacerse a partir de los datos del catálogo (Simkim y Siebert 1994), el cual recoge unas 9000 erupciones en 10000 años, que es una muestra muy incompleta, más aún si tenemos presente que la mayor parte de las erupciones catalogadas corresponde a los últimos 250 años. La muestra resulta todavía menos significativa si pretendemos estimar la probabilidad de que ocurra una erupción altamente explosiva en un determinado volcán. Si también consideramos que el sistema volcánico puede presentar largos periodos de reposo o responder a determinadas secuencias, todavía es más acusada la insuficiencia del tamaño de la muestra en relación con los periodos que pretendemos determinar. En general, se observa que la pauta para el volcanismo explosivo es el presentar largos periodos de inactividad, siendo tanto mayor la violencia de la erupción cuanto mayor sea el periodo de reposo precedente. El escaso número de grandes erupciones explosivas bien estudiadas hace aventurada cualquier hipótesis. Siempre deberíamos tener presente que la descripción estadística simplemente suple nuestra falta de conocimiento de la física de los procesos volcánicos. Un sistema volcánico no es un sistema Poisson, ya que, de hecho, se produce en el volcán una serie de procesos encadenados, perfectamente claros: ascenso del magma, almacenamiento y evolución en cámaras magmáticas y erupción. Esto es especialmente importante para las grandes erupciones explosivas, en las que intervienen volúmenes de magma que superan el km^3 . Es por ello que, después de una gran erupción, este tipo de volcanes queda en reposo durante varios centenares de años y, en general, la magnitud de la erupción es tanto mayor cuanto más largo ha sido el periodo de reposo.

El factor tiempo es muy importante para construir un mapa de peligros volcánicos. No es posible tratar por igual un fenómeno que se produce cada pocas decenas de años y otro con periodicidades de miles de años. Una erupción es la culminación de un largo proceso que se inicia con la generación de magmas, su lento ascenso, su posible almacenamiento en cámaras magmáticas más o menos superficiales y su salida a la superficie. Todo ese complejo proceso es claramente repetitivo, los tiempos entre erupciones o los distintos mecanismos eruptivos se repiten de forma tremendamente constante, pero con las lógicas fluctuaciones derivadas de su propia complejidad. El conocimiento adquirido en estos últimos años sobre los sistemas caóticos ha permitido comprender el por qué de estas fluctuaciones y está proporcionando las herramientas necesarias para cuantificarlo. La primera aproximación que podemos hacer es mediante la estadística de las distintas erupciones que ocurren en nuestro volcán (Astiz et al., este volumen). Es importante destacar que es imprescindible que los datos de los que se parte sean homogéneos, no es posible mezclar en el mismo modelo datos históricos precisos con datos intuitivos de leyendas o información geocronológica con amplias horquillas de error. Cada fuente de información deberá analizarse por separado. Una técnica sencilla para determinar el periodo de retorno entre erupciones consiste en representar el número de veces que un determinado tiempo ha transcurrido sin erupciones. Una vez obtenido el periodo de retorno y aplicando modelos estadísticos elementales podemos conocer cual es la probabilidad de que ocurra una erupción en un determinado intervalo de tiempo (ver Astiz et al., este volumen).

VULNERABILIDADES

La vulnerabilidad de los elementos de riesgo es muy difícil de evaluar, pues no existen suficientes experiencias recientes en las que haya sido posible determinar directamente los daños sobre elementos de y grandes concentraciones de riesgo. Las vulnerabilidades se han establecido en base al análisis de observaciones antiguas y extrapolaciones. La

vulnerabilidad se expresa en % del valor total del elemento en riesgo. Este valor, al ser un concepto estadístico, hay que calcularlo para todos los elementos similares (igual tipo de construcción, de cultivo, etc.), por ello se prefiere definir una escala de daños de tres niveles: ligero (0-20%), moderado (10-60%) y grave (50-100%) que se superponen por la dificultad real de distinguir si un daño es del 45% ó 55% del total. Hay que tener presente que cuando una estructura sufre daños superiores al 40% ya no es rentable su reparación y debe ser destruida. Para cada uno de los peligros volcánicos, en sus distintos grados de intensidad, y para cada uno de los elementos de riesgo hay que analizar la correspondiente vulnerabilidad. El resultado de este análisis se puede expresar en forma matricial (matriz de vulnerabilidad) para transferirlo al sistema de información geográfica como capas distintas. En general, el daño producido por coladas lávicas está limitado al entorno próximo del volcán y fuertemente controlado por la topografía. Las avalanchas, incluyendo en ellas las coladas y oleadas piroclásticas, pueden causar la destrucción total a decenas de kilómetros del volcán. Las nubes de cenizas pueden causar pérdidas millonarias a miles de kilómetros del volcán. La complejidad de la actual sociedad tecnológica hace que sea mucho más vulnerable que las primitivas sociedades de subsistencia. Hoy, nuestros sistemas de energía y comunicaciones nos hacen tremendamente vulnerables ante la catástrofe volcánica (Blong, 1984; Tiedemann, 1992; Ortiz y Araña, 1996).

MAPAS DE RIESGO VOLCÁNICO

En el caso del riesgo volcánico debemos empezar por conocer cuáles son los peligros volcánicos. Después hay que conocer cuál es la probabilidad temporal de que ocurra cada uno de ellos y, en caso de que el fenómeno se produzca, cuál es la probabilidad de que cada lugar se vea afectado. Seguidamente, se deberá calcular qué vulnerabilidad presenta cada elemento de riesgo presente en la zona afectada para la intensidad esperada para el fenómeno. Con todo esto ya podemos construir el mapa de riesgo. En la práctica (Felpeto et al., 1996), se separan los tres factores en dos términos: el primero es exclusivamente el peligro, mientras que el segundo engloba solo información económica (exposiciones y vulnerabilidades). De esta forma el mapa de riesgo se construye partiendo de un mapa de peligros, realizado por volcanólogos, que se transforma incluyendo una información económica aportada por técnicos de otras disciplinas, como geógrafos, economistas, sociólogos, etc. Este tipo de mapas debe ir acompañado de la correspondiente memoria que facilite su utilización. Es importante insistir en que una información imprescindible que debe figurar en los mapas es el diagrama de tiempos disponibles para actuar frente a cada uno de los peligros. Lógicamente este tipo de información no sirve si no existe una planificación anterior. Es importante disponer del material didáctico necesario y preparado a distintos niveles. Además, este material debe actualizarse periódicamente. Hay que pensar que una crisis puede iniciarse en cualquier momento y puede que transcurran varios meses antes de culminar en una fase catastrófica. Pero este tiempo es muy pequeño si hay que improvisar todo el material informativo y preparar al personal que debe intervenir, además de establecer los correspondientes planes de actuación.

Para establecer un mapa de riesgo volcánico debemos partir de la definición de riesgo. El riesgo es una densidad de probabilidad, definida a partir de la peligrosidad, es decir de la densidad de probabilidad $P(x,y,z,\Delta t)$ de que en un punto (x,y,z) , en un intervalo de tiempo Δt , ocurra un evento peligroso y de la vulnerabilidad $V(x,y,z)$, entendida como densidad de probabilidad de que dado el evento peligroso se sufra un determinado daño. Hay que

destacar que mientras la peligrosidad es función del intervalo de tiempo y, por ello, invariante frente a una traslación temporal, la vulnerabilidad es sólo función del punto considerado y de la actividad humana en ella desarrollada y por ello puede estar sujeta a normas tendentes a disminuir el riesgo. Introduciendo el valor $\$(x,y,z)$ de los bienes sujetos a posibles pérdidas se tiene

$$R(x, y, z, \Delta t) = \$(x, y, z) V(x, y, z) P(x, y, z, \Delta t)$$

Por consiguiente, en la valoración del riesgo los factores primordiales son de carácter social y económico, mucho más próximos a la política regional que a la aproximación científica y técnica de los volcanólogos y técnicos de Protección Civil. En consecuencia, cuando a los volcanólogos se les pide un mapa de riesgo, éstos deben limitarse a establecer el mapa de peligrosidad volcánica, dejando a otros especialistas la transformación de este mapa en un mapa de riesgo, mapa que viene expresado en dinero y en el que hay que evaluar si es más rentable un hombre, una vaca o una industria, cuyos valores dependen del contexto socioeconómico (Araña y Ortiz, 1993).

Para plantear un mapa de peligrosidad (Felpeto et al., 1996; Felpeto, este volumen) se debe definir cuál es el intervalo de tiempo Δt considerado. Un criterio es considerar todos aquellos eventos que puedan producirse en los próximos 60 años, lo que supone períodos de retorno del orden de 500 años para un margen de confianza del 99.5%. Seguidamente, debe realizarse un estudio geológico de las erupciones habidas en la zona, reconstruyéndose sus mecanismos eruptivos y tratando de establecer las relaciones temporales existentes entre ellas y la presencia de secuencias significativas. Estos datos son analizados estadísticamente, tratando de establecer el modelo que permita reconstruir las distintas secuencias e intervalos. Este modelo estadístico permite calcular para cada mecanismo eruptivo, su densidad de probabilidad para el intervalo de tiempo considerado. En general, los valores obtenidos correspondientes a las erupciones más peligrosas, salvo en volcanes muy particulares, son tremendamente pequeños. En algunos casos, deben modelarse numerosas situaciones que pueden modificar considerablemente los resultados obtenidos; un ejemplo de ello puede ser la modelización de la caída de los piroclastos cuando en la zona no existen vientos dominantes claramente definidos.

La metodología (figura 1) para la realización del mapa de riesgo volcánico pasa por la necesaria coordinación de un equipo multidisciplinar, necesario para la realización de los estudios geológicos encaminados a la reconstrucción individualizada de cada evento eruptivo, de su modelización física y de su transposición a la realidad social y económica actual de la zona afectada por la posible erupción (Dobran et al., 1990). Es importante recordar que tanto los datos como los modelos deben utilizarse en una crisis real, lo que implica que mucha de la información requerida puede no estar disponible en ese momento. De poco sirve un sistema muy sofisticado si no es útil en el transcurso de una crisis. En muchos casos la única información de que se dispone en los primeros momentos (horas, días) son las coordenadas del centro de emisión y una vaga idea sobre el tipo de erupción. Posteriormente, si la accesibilidad del volcán y las condiciones meteorológicas lo permiten, se podrá empezar a estimar otros parámetros

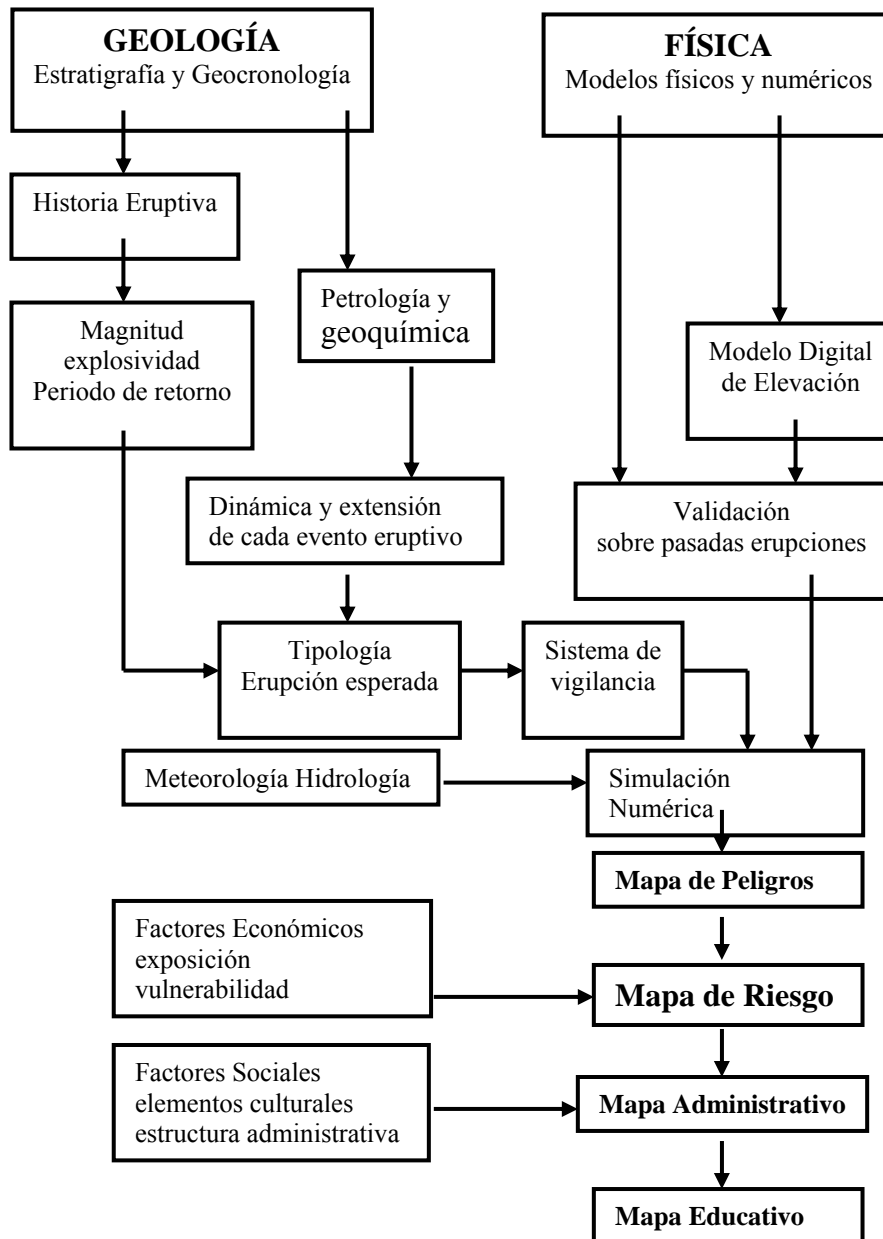


Figura 1. Metodología para la realización de mapas de riesgo volcánico.

La herramienta imprescindible para realizar estos mapas es un Sistema de Información Geográfica (SIG), aplicación informática que permite trabajar con bases de datos georeferenciadas. Este tipo de aplicaciones permite combinar una base topográfica con la

información disponible de cada localización (habitantes, cultivos, vías de comunicación, infraestructuras, etc.). Actualmente existen muchas aplicaciones de este tipo, aunque ninguna de ellas está específicamente diseñada para la gestión de desastres, por lo que siempre habrá que desarrollar módulos e interfaces (ver Felpeto, este volumen). El primer elemento que debemos introducir en el Sistema de Información Geográfica es el mapa topográfico de la zona. Es importante que este mapa se corresponda exactamente con el modelo digital del terreno utilizado por los modelos numéricos: red viaria, centros urbanos, etc. El material utilizado para los trabajos de campo (foto aérea, foto satélite, cartografía específica, etc.) deberá corregirse adecuadamente. El modelo digital de terreno debe construirse de forma que presente la máxima resolución posible en función de la información topográfica existente de la zona. Difícilmente se puede trabajar con resoluciones de 25 m partiendo de un mapa básico a 1:100.000. Una resolución de 200 m puede resultar insuficiente para el modelado de coladas lávicas, pero resulta más que suficiente para la proyección balística o los flujos piroclásticos. Para la modelización detallada de avalanchas se necesita un modelo topográfico particular que se puede obtener fácilmente transformando el modelo digital de elevación. Los modelos digitales de terreno contienen numerosos errores debidos al algoritmo que se ha utilizado para trazar las isocotas en el mapa original y al método seguido para transformarlas en malla regular.

La modelización de la erupción esperada, requiere disponer de un conjunto de programas para la simulación de los distintos peligros volcánicos que pueden presentarse en la zona. Esta modelización debe realizarse a distintos niveles de resolución, pues cuanto más preciso sea el ajuste mayor será el número de parámetros sobre la erupción que se necesitarán. No hay que olvidar que, a efectos de valoración del riesgo volcánico, se necesita más una valoración global de los efectos de la erupción que el detalle preciso de cada uno de los fenómenos. En este aspecto, es interesante organizar los modelos en forma escalonada, entrando cada vez más en el detalle de cada fenómeno mediante modelos más elaborados. Así, en primera aproximación, es posible utilizar el mismo modelo gravitacional para todos los fenómenos bajo control topográfico, introduciendo un parámetro que refleje la movilidad de cada evento particular y que se ajusta empíricamente en base a los datos disponibles para cada zona. Procediendo de este modo se puede obtener una buena representación del fenómeno, apta para servir de base al mapa de peligrosidad volcánica. Los modelos numéricos de los distintos peligros volcánicos parten de una simplificación del modelo físico del fenómeno y precisan de la entrada de una serie de parámetros característicos de la erupción esperada y utilizan los datos del modelo digital del terreno. En función del tipo de modelo será necesario realizar una transformación de los datos de elevación, generando un modelo local del terreno de menores dimensiones. Esto mejora la eficiencia del proceso de cálculo, pues se trabaja con modelos de menores dimensiones. Al finalizar, los resultados de la simulación deben escribirse en un fichero directamente compatible con el SIG.

La transformación del mapa de peligrosidad en mapa de emergencia o en mapa de riesgo, es un proceso simple que se realiza directamente mediante el uso de las herramientas propias del SIG. Sin embargo, para que esta transformación sea sencilla de realizar es necesario que la salida de los distintos modelos de peligros volcánicos esté adecuadamente escalada, de modo que la aplicación de las tablas de vulnerabilidad sea inmediata. Evidentemente, la utilidad del sistema dependerá fundamentalmente de la correcta actualización de los datos que constituyen la base del SIG. Este tipo de proceso requiere

actuar sobre las vulnerabilidades definidas para todos los elementos. Por consiguiente, es conveniente que desde un principio se introduzcan las distintas capas que constituyen el SIG. Esto también debe aplicarse al formato de salida de los distintos modelos.

Los mapas de riesgo y gestión de la emergencia deben actualizarse continuamente en caso de crisis, en función de como vaya evolucionando la actividad del volcán o de como los datos procedentes del seguimiento de la crisis vayan permitiendo optimizar el ajuste de los modelos. Para que este proceso pueda realizarse de forma adecuada, el sistema debe poder operar de un modo sencillo sin necesidad de tener que realizar operaciones manuales. Finalmente, los mapas de tipo educativo o informativo deben realizarse manualmente, en colaboración con un equipo de pedagogos, ya que los criterios de tipo cultural y tradicional afectan al contenido de estos mapas.

Los mapas de peligros volcánicos se deben construir teniendo en cuenta su objetivo final. Así tenemos

- *Mapa de peligros ocurridos*: refleja todo lo que ha ocurrido en el volcán y en cierta forma se diferencia poco de un mapa geológico.
- *Mapa de peligro específico*: refleja sólo un peligro, por ejemplo el camino que recorrerán los lahares.
- *Mapa de erupción esperada*: construido en base al conocimiento del estado actual del volcán, refleja los efectos de una futura erupción. Este es el mapa de peligros volcánicos que se realiza habitualmente para la cuantificación del riesgo volcánico. Hay que tener en cuenta que en muchos casos vamos a tener varios tipos de erupciones posibles y deberemos construir un mapa para cada uno de ellos, considerando el árbol de probabilidades correspondiente.
- *Mapa del máximo evento posible*: se considera la mayor erupción que pueda ocurrir en ese volcán, independientemente de cuando se vaya a producir. Desborda las posibilidades de gestión inmediata. La probabilidad de que ocurra es extremadamente baja.
- *Mapa del mayor evento abordable*: considera la máxima erupción esperada que pueda ocurrir en un plazo razonable y que pueda gestionarse con los medios disponibles.

Por otra parte, un mapa de riesgo volcánico afecta los intereses de corporaciones e individuos. Las presiones sobre los investigadores para que una zona aparezca o no afectada en el mapa son muy fuertes, especialmente cuando la zona se reactiva y los habitantes son conscientes de ello. Además, el grado de responsabilidad sobre la zona a proteger no está claro. Ciudadanos y corporaciones tienden a transferirla al Gobierno Regional y al Nacional, independientemente del grado actual de responsabilidad. La educación sobre este tipo de fenómenos naturales es escasa y muy deficiente y, por ello, es muy importante tener previsto cómo debe ser la información que se debe proporcionar a los habitantes de una posible zona afectada. La aplicación de este tipo de estudio es clara cuando se trata de aparatos volcánicos en actividad continua o que por las características especiales de su estado actual, como es la presencia de un domo en evolución, de una cámara magmática somera activa o de erupciones casi continuas, sea posible conocer cuál será la evolución normal del sistema y establecer el modelo correspondiente. Situación muy distinta es cuando en una área volcánica activa se desencadena una crisis. En tal situación, hay una serie de indicadores que se activan y se empiezan a recibir datos por la aplicación

de las distintas técnicas de vigilancia de volcanes. Especialmente significativos son en estos casos los datos de la geodesia y de la geoquímica de fluidos: estos datos nos permiten delimitar con bastante precisión la zona donde se está produciendo realmente el fenómeno. Con los conocimientos volcanológicos de la zona es posible reducir a unos pocos tipos de mecanismos la posible erupción. La aplicación de los modelos de simulación numérica acoplados directamente al Sistema de Información Geográfica, permite establecer rápidamente los distintos tipos de mapas de riesgo necesarios para afrontar la crisis.

ZONIFICACIÓN

Es la división de una región en zonas y su ordenación en función del grado de riesgo frente a un peligro volcánico. Inicialmente, el concepto de zonificación era muy amplio y de hecho sólo permitía definir las áreas volcánicas activas. Para obviar esto se introduce el concepto de microzonificación aplicado a una zona concreta (Alexander, 1993). Esta técnica se ha diseñado para mostrar la variación espacial del riesgo, a fin de concentrar los recursos y enviar los equipos de emergencia durante los periodos de crisis. A largo plazo, permite dictar normas encaminadas a la ordenación del territorio y construir las infraestructuras del modo menos vulnerable posible. Hay que tener presente que el concepto de microzonificación es siempre local; el aplicarlo a escalas regionales puede traer problemas a largo plazo al introducirse datos no exactamente equivalentes para cada una de las zonas: una zona de alto riesgo puede quedar enmascarada por otra de menor riesgo pero de la que haya un conocimiento mayor. Los elementos básicos para la zonificación volcánica son: el número de personas expuestas, sus actividades económicas, la localización de las estructuras y servicios de emergencia y sus vulnerabilidades frente a cada peligro considerado. El tipo de mapa de microzonificación depende de dos factores: el peligro considerado y el uso al que va destinado.

- *Mapa de peligro único y un sólo uso:* Es el más fácil y barato de realizar. Resulta apropiado para resolver situaciones particulares, donde es posible aislar un único tipo de peligro que afecta a una estructura vulnerable muy simple. Por ejemplo analizar la caída de piroclastos sobre una zona residencial para realizar el diseño adecuado de las cubiertas.
- *Mapa de peligro único y múltiple uso:* Apropiado cuando el peligro esperado afecta a más de una actividad. Siguiendo con el ejemplo de la caída de piroclastos, se puede conocer, basándose en un único trabajo de campo, el impacto sobre el sistema de comunicaciones (carreteras y aeropuertos), el suministro de agua y energía, las construcciones residenciales y las zonas agrícolas.
- *Mapa de peligro múltiple y uso múltiple:* Este tipo de mapas es el requerido para la ordenación del territorio. Debe incluir todos los peligros esperados en la zona. Por su complejidad es necesario estructurarlo sobre un SIG. Es importante escalar cada peligro en relación con los otros, tanto en magnitud como en periodos de retorno.

Dependiendo del destinatario podemos considerar tres tipos de mapas de peligrosidad volcánica: un mapa que recoja la información estrictamente volcanológica, un mapa de carácter administrativo y un tercero de tipo educativo (Yoshioka, 1992):

- *Mapa de Peligrosidad Volcánica basado en Estudios Volcanológicos:* En él se muestran las áreas peligrosas bajo ciertas condiciones de cada factor de peligro

considerado. Se pueden adoptar dos criterios para establecer este mapa: reflejando los efectos de una erupción de un tipo concreto en un punto y bajo unas determinadas condiciones meteorológicas o bien un mapa recogiendo todas las posibles erupciones y fenómenos asociados que puedan tener lugar en la zona. El primero es útil para hacer frente a una crisis, mientras que el segundo es de interés muy relativo y sólo sirve a efectos de ordenación del territorio a muy largo plazo. En muchos casos, se opta por realizar un mapa en el que se superponen todas las erupciones posibles en la zona que son esperables durante el desarrollo de una crisis. Estos mapas sirven de base para crear el mapa administrativo y el educativo. Este mapa resulta inútil si no existe un equipo de volcanólogos, debidamente coordinado, trabajando en la zona.

- *Mapa de Peligrosidad Volcánica con Datos Administrativos*: Es el mapa útil para la Administración (no para especialistas en volcanes) y en él se incluyen las medidas a tomar para cada factor de peligro así como las escalas de tiempo correspondientes. Sobre este mapa se planificarán las operaciones de evacuación, las contramedidas a tomar y las actuaciones post-desastre. Se realiza revisando y evaluando el mapa volcanológico desde el punto de vista de la gestión de desastres, añadiendo la información referente a vías y centros de evacuación y todos aquellos datos necesarios para la actuación en la emergencia. Este mapa carece de sentido si no existe una normativa para su aplicación.
- *Mapa de Peligrosidad Volcánica para Uso Educativo de los habitantes*: Está basado en el Mapa Administrativo e incluye información precisa para los habitantes y turistas, especialmente sobre las medidas a tomar en caso de un factor de desastre, por ejemplo, las instrucciones para el caso de una evacuación. Se debe recordar que en la misma zona ya han ocurrido antes erupciones y que ello no siempre supone un desastre, así como dar a conocer el fenómeno volcánico. Hay que tener presente que la publicación y distribución de estos mapas puede provocar una alarma infundada que afecte seriamente la economía de la zona: disminuye el número de turistas, bajan los precios de las tierras, los seguros se disparan y muchas empresas pueden abandonar la zona o requerir fuertes compensaciones económicas.

SEGURIDAD AÉREA Y ACTIVIDAD VOLCÁNICA

La seguridad del tráfico aéreo en una erupción exige evitar que los aviones vuelen dentro de zonas contaminadas por cenizas. Ello requiere un adecuado seguimiento de las nubes de ceniza, que inmediatamente se recubren de una capa de agua, son semitransparentes y difícilmente distinguibles visualmente de las nubes normales. Además no son detectables por el radar que lleva el avión. Cuando un avión entra en una nube de cenizas volcánicas sufre importantes daños como la erosión de todas las superficies por el fuerte poder abrasivo de la ceniza o el fallo completo de los motores. Incluso nubes muy diluidas provocan daños que obligan a cambiar inmediatamente los motores con los enormes costes que esto supone. Evitar las nubes requiere la comunicación entre el piloto y los observadores en tierra. Es importante que la información sobre la actividad volcánica circule rápidamente entre todos los grupos involucrados, si es posible en tiempo real, para proporcionar la información oportuna a los directores de tráfico aéreo y a los pilotos. Cada grupo debe tener un plan o formulario de notificación de emergencia por ceniza volcánica y estos procedimientos deben ser parte de la rutina operacional del grupo.

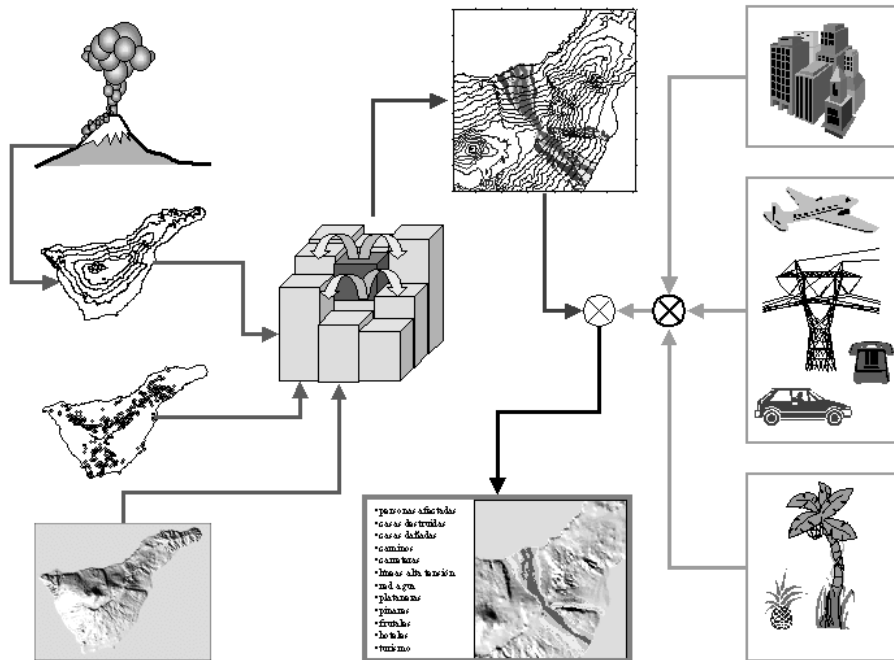


Figura 2. La confección de un mapa de riesgo involucra dos bloques: la actividad volcánica y su modelización y por otro lado la actividad humana. Al final obtenemos una representación de los efectos esperados que ocurrirán en una futura erupción.

La coordinación y notificación debe ser rápida y eficaz; se deben usar caminos múltiples para evitar que la pérdida de un eslabón no rompa el camino de la información. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha establecido desde 1993 los procedimientos de comunicaciones para el caso de las cenizas volcánicas que establecen las consultas entre portadores aéreos, pilotos, meteorólogos y volcanólogos. Las autoridades de aviación civil deben estar alerta para informar sobre nubes de cenizas volcánicas originadas fuera de su jurisdicción. La OACI recomienda que todos los estados miembros con amenaza de ceniza volcánica establezcan un grupo en que los especialistas de los distintos organismos se reúnan periódicamente para discutir los procedimientos relacionados con el riesgo volcánico. Hoy, la Asociación Internacional de Aviación Civil mantiene una serie de centros especializados en el seguimiento de nubes volcánicas y dotados de computadores especialmente preparados para la modelización de la evolución temporal de las nubes de cenizas y enviar estos pronósticos inmediatamente a los centros de control de tráfico aéreo. Estos centros están en continuo contacto con los Observatorios Volcanológicos responsables de cada área volcánica activa. Como ejemplo podemos citar el volcán Redoubt (Alaska, año 1989) donde una erupción que no provoca ninguna víctima, si produjo daños en el tráfico aéreo comercial a más de 4000 km del volcán, que supusieron 80 millones de dólares en un sólo avión (Przedpelski y Casadevall, 1994). Durante la erupción del volcán Pinatubo (Filipinas, año 1991) sufrieron daños por la nube eruptiva 14 grandes aviones (Boeing 747 y DC10) con el resultado de tener que cambiar 10 motores (Casadevall, 1991 y 1995). En los aeropuertos situados en las proximidades de un volcán que presenta actividad

explosiva persistente, como es el caso del Sakurajima en Japón o el Popocatepetl en México, se han instalado equipos que proporcionan información automática de la actividad del volcán.

BIBLIOGRAFÍA

- ALEXANDER, D. (1993). *Natural Disasters*. UCL Press. Londres: 631 pp.
- ARAÑA, V.; ORTIZ, R. (1984). *Volcanología*. Rueda-CSIC. Madrid: 528 pp.
- ARAÑA, V.; ORTIZ, R. (1993). *Riesgo Volcánico*. En Nuevas Tendencias en Volcanología. Martí, J. y Araña, V., editores. CSIC. Madrid: 277-385
- ARAÑA, V.; ORTIZ, R. (1996). *Introducción al Riesgo Volcánico*. En Riesgo Volcánico, Ortiz, R., editor. Serie Casa de los Volcanes. Cabildo de Lanzarote. Nº 5: 1-36.
- BARBERI, F.; MACEDONIO, G.; PARESCHI, M.; SANTACROCE, R. (1989). *Pericolosità e rischio vulcanico: stato dell'arte e prospettive*. Gruppo Naz. Vulcanol. Bull., 2: 631-647
- BLONG, R. J. (1984). *Volcanic Hazards: a source book on the effects of eruptions*. Academic Press. 424 pp.
- CAS, R.; WRIGHT, J. (1987). *Volcanic Successions*. Allen & Unwin Publish. London: 528 pp.
- CASADEVALL, T.J. editor (1991). *First international symposium on volcanic ash and aviation safety*. U.S. Geological Survey. 1065 pp.
- CASADEVALL, T.J. (1995). *El uso de la información geológica para mitigar el riesgo de la ceniza volcánica en la seguridad de la aviación*. Workshop on communication between volcanologist and civil authorities. INGEOMINAS-U.S. Geological Survey. Popayan, Colombia: 18 pp.
- CHESTER, D. (1993). *Volcanoes and Society*. Edward Arnold. Londres: 351 pp.
- DOBTRAN, F.; BARBERI, F.; CASAROSA, C. (1990). *Modeling of volcanological processes and simulation of volcanic eruptions*. CNR. Gruppo Naz. Vulcanol., Italy. Report VSG90-01: 85 pp.
- FELPETO, A.; GARCÍA, A.; ORTIZ, R. (1996). *Mapas de riesgo. Modelización*. En Riesgo Volcánico Ortiz, R., editor. Serie Casa de los Volcanes. Cabildo de Lanzarote. Nº 5: 67-98.
- FUNTOWICZ, S. O.; RAVETZ, J. R. (1995). *Planing and decision making in an uncertain world: the challenge of post-normal science*. En Natural Risk and Civil Protection. Horlick-Jones, T.; Amendola, A.; Cassale, R., editores. E&FN Spon.: 415-423
- KOVACH, R. L. (1995). *Earth's Fury. An introduction to natural hazards and disasters*. Prentice Hall. New Jersey: 214 pp.
- MC CALL, G. J. H.; LAMING, D.J.C.; SCOTT, S.C., editores (1993). *Geohazards. Natural and man-made*. Chapman & Hall, Londres: 227 pp.
- ORTIZ, R., editor (1996). *Riesgo Volcánico*. Serie Casa de los Volcanes. Cabildo de Lanzarote. Nº 5: 304 pp.
- ORTIZ, R.; ARAÑA, V. (1996). *Daños que pueden producir las erupciones*. En Riesgo Volcánico. Ortiz, R., editor. Serie Casa de los Volcanes. Cabildo de Lanzarote. Nº 5: 37-66
- PRZEDPELSKI, Z.; CASADEVALL, T. (1994). *Impact of volcanic ash from 15 december 1989 Redout volcanic eruption on GE CF6-80C2 turbofan engines*. En Volcanic ash and aviation safety. Casadevall, T. Edit., US Geological Survey Bulletin. 2047: 129-135
- SANDI, H. (1986). *EAAE/WG on vulnerability and risk analysis for individual structures and for systems*. Report to the 8-th ECEE, Lisboa: 76 pp.
- SANDI, H. (1995). *Methodological aspects of the analysis of seismic vulnerability and of the use of vulnerability characteristics*. Workshop on evaluation of seismic risk. Lecture Notes. Servei Geologic Catalunya. Barcelona: 1-30

- SIMKIM, T.; SIEBERT, L. (1994). *Volcanoes of the World*. Geoscience Press. Arizona: 349 pp.
- TIEDEMANN, H. (1992). *Earthquakes and Volcanic eruptions. A Handbook on Risk Assessment*. Swiss Re. Zurich: 951 pp.
- TILLING, R. (1989). *Volcanic hazards and their mitigation progress and problems*. *Rev. Geophysics*, **27**: 237-269
- WOHLETZ, K.; HEIKEN, G. (1992). *Volcanology and geothermal energy*. University of California Press. Berkeley, USA. 432pp.
- YOSHIOKA, K. (1992). *A guideline for hazard map on volcanic eruptions*. Kagoshima International Forum on Volcanoes. Kagoshima Prefectural Government. 35-38