

MEMORIA EXPLICATIVA DE LA TESIS DOCTORAL

Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica

Alicia Felpeto Rielo

OBJETIVOS

Tras el desastre provocado por la erupción del Nevado del Ruiz (Colombia) en 1985, la UNESCO declaró la pasada década de los 90 como la *Década para la Mitigación de los Desastres Naturales*. El objetivo de este programa era identificar los mecanismos por los que un evento natural se convierte en una catástrofe, para lo cual diversos programas de investigación se centraron en el desarrollo de herramientas que contribuyesen a minimizar el impacto negativo de diversos peligros naturales. En el ámbito de la Volcanología, los esfuerzos se centraron tanto en el desarrollo de instrumentación para el seguimiento de la actividad volcánica, como en generar mapas de peligrosidad volcánica que constituyesen el punto de partida para análisis de riesgo volcánico y ensayo de medidas mitigadoras del mismo.

Una de las características esenciales que distingue el tratamiento del riesgo volcánico del de otros desastres naturales es el hecho de que, en la mayoría de éstos, el peligro es único, mientras que en una erupción volcánica los peligros pueden ser múltiples: coladas de lava, caída de cenizas, flujos piroclásticos, lahares, ... etc. Además, muchos de los parámetros que caracterizan los peligros volcánicos presentan un gran rango de variación, como, por ejemplo, la velocidad de propagación, que puede variar desde decenas de m/día para algunas coladas de lava a velocidades del orden de km/minuto en oleadas piroclásticas; o el área afectada por los productos de la erupción, que puede oscilar entre valores de pocos km² para coladas de lava o caída de bombas hasta miles de km² en caída de cenizas de erupciones plinianas. Estas grandes diferencias entre los distintos procesos volcánicos condicionan que tanto los estudios de peligrosidad y riesgo volcánico como las estrategias para la mitigación del riesgo deban ser diseñados de forma específica para cada uno de los posibles peligros.

El objetivo principal de esta tesis fue el desarrollo de una herramienta para la generación de mapas de peligrosidad volcánica basada en modelos numéricos de simulación de procesos eruptivos.

Este objetivo global se desglosa en dos objetivos de índole muy diferente: por una parte el diseño de una metodología para la elaboración de mapas de peligrosidad volcánica (que sea válida para todos los peligros volcánicos) y por otra el desarrollo de modelos numéricos de simulación de los distintos procesos eruptivos. Este trabajo se ha centrado en dos de los principales peligros volcánicos: la caída de cenizas y las coladas de lava.

METODOLOGÍA

Los objetivos de la tesis se han desarrollado a lo largo de una memoria estructurada en cinco capítulos.

En el primero de ellos se definen los conceptos básicos de peligrosidad y riesgo, describiendo brevemente la problemática concreta del estudio de la peligrosidad volcánica. Asimismo, se hace hincapié en el papel que los modelos físicos de procesos volcánicos tienen en este ámbito, y su inter-relación con los Sistemas de Información Geográfica, de forma que los mapas de peligrosidad volcánica constituyan una auténtica herramienta dinámica para la mitigación del riesgo volcánico.

Los capítulos II y III describen respectivamente los modelos propuestos para la simulación de caída de cenizas y coladas de lava. En ambos se hace una síntesis de los procesos físicos básicos que intervienen en el mecanismo eruptivo correspondiente, así como una descripción de los principales modelos existentes en la bibliografía. A continuación se describen los modelos propuestos, y algunos ejemplos de aplicación de los mismos, en los que se muestra su capacidad para reproducir erupciones pasadas.

En el capítulo II se presenta un modelo que permite simular tanto la evolución de una nube de cenizas originada por una erupción pliniana como el depósito final sobre la superficie terrestre. Este modelo se aplica a la reconstrucción de la última erupción explosiva que ha tenido lugar en las Islas Canarias: la erupción de Montaña Blanca (Tenerife), ocurrida hace unos 2000 años. También se aplica a la simulación de la pluma generada por una reciente erupción: la del volcán Láscar (Chile), ocurrida el 20/07/00.

En el capítulo III se proponen dos modelos diferentes para la simulación de coladas de lava. Uno, de tipo determinista, que describe la evolución temporal del flujo de lava y, otro, de carácter probabilístico, que determina la probabilidad de cada punto del área de estudio de ser cubierto por la lava. Ambos modelos se aplican para simular una pequeña colada que tuvo lugar durante la erupción de 1991-93 del volcán Etna (Italia), mostrando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

El cuarto capítulo se centra en la aplicación de las simulaciones numéricas a la generación de mapas de peligrosidad volcánica, proponiendo una metodología para dicha generación. Dicha metodología se aplica a las islas canarias de Lanzarote y Tenerife. En el caso de Lanzarote, se obtienen mapas de peligrosidad para coladas de lava para toda la isla, y un mapa, más detallado, del área de Arrecife, principal núcleo de población de la misma. En Tenerife, se obtienen mapas de peligrosidad para caída de cenizas volcánicas, partiendo de las características de la última erupción explosiva ocurrida en la isla, la erupción de Montaña Blanca, y de los datos de viento obtenidos de registros meteorológicos de seis años. También se presentan varios mapas de peligrosidad de invasión por flujos de lava para toda la isla, partiendo de distintas distribuciones espaciales de probabilidad de futuros centros eruptivos, haciendo un análisis conjunto de los resultados obtenidos.

El último capítulo resume los ámbitos de aplicación de la metodología y los modelos propuestos, y presenta una síntesis de las conclusiones principales de este trabajo.

Finalmente, en un apéndice se describe la implementación de los modelos propuestos, incluyendo los diagramas funcionales simplificados y listados de las subrutinas y funciones principales de cada uno de los programas desarrollados.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Modelo de caída de cenizas

En el capítulo II se propone un modelo para la simulación numérica de la expansión de la nube de cenizas originada por una erupción pliniana y la caída de las partículas volcánicas a la superficie terrestre. Este modelo asume que la expansión de la nube de cenizas está controlada por la difusión y la advección debida al viento, mientras que la caída de las partículas está controlada por su velocidad límite de caída, que varía con el tamaño de la partícula, su densidad y la altura. El modelo considera constante la difusividad atmosférica horizontal y despreciable la difusividad vertical, así como la componente vertical del viento, permitiendo incluir vientos variables, tanto en altura como en cada uno de los planos horizontales considerados.

La aplicabilidad del modelo se ha mostrado en dos casos de muy distinta índole. El primero es la reconstrucción de la erupción de Montaña Blanca (Tenerife), mostrando una gran congruencia con los datos de espesor de depósito reales. El segundo es la simulación de la evolución de la pluma generada en el volcán Láscar (Chile) el 20/07/00. En este caso, los datos de partida para el cálculo de los parámetros de entrada del modelo son una serie de fotografías de la erupción, y datos de viento a distintas alturas obtenidos de diversos sondeos atmosféricos. Los resultados de la simulación para diversos tiempos desde el inicio de la erupción aproximan en gran medida la situación del frente de la nube de cenizas reflejada por diversas imágenes satélite. Esta simulación ejemplifica la utilidad del modelo como herramienta para el pronóstico de la evolución de una nube de ceniza volcánica en situación de crisis.

Estos ejemplos muestran la gran importancia de los parámetros atmosféricos, especialmente del viento, en los mapas finales de depósitos obtenidos y en la evolución temporal de la nube de cenizas. Por tanto, dada la gran variabilidad temporal de la dirección e intensidad del viento, la mayor utilidad del modelo propuesto radica en su aplicación para la generación de mapas de peligrosidad a corto plazo en situaciones de crisis. En dichas situaciones, los datos de viento serían los proporcionados por los servicios meteorológicos a corto plazo, es decir, que cada día se generarían los mapas de peligrosidad para las siguientes horas o días, y estos mapas se actualizarían frecuentemente en función de la evolución de la crisis y de los cambios en el campo de vientos.

Modelos de coladas de lavas

En el capítulo III se proponen dos modelos para la simulación del recorrido de coladas de lava, de características muy distintas. Uno de ellos, de tipo determinista, describe la evolución del flujo de lava en términos de altura y temperatura de la misma, para cada celda del área de cálculo en cada iteración temporal. El otro, de carácter probabilístico, asume que el factor principal que determina el camino que seguirá una colada es la topografía, y únicamente evalúa la probabilidad de cada celda del área de cálculo de ser invadida por la lava.

El modelo determinista se basa en un esquema de autómatas celulares, en el que las reglas de propagación se obtienen de la resolución de las ecuaciones de transporte simplificadas, asumiendo que la lava se comporta como un fluido Bingham, con viscosidad y cizalla umbral dependientes de la temperatura. La pérdida de calor de la lava se considera debida únicamente a la radiación a la atmósfera, teniendo en cuenta el efecto que sobre la temperatura efectiva de radiación tiene la formación de costra sólida en la superficie superior de la colada.

El modelo probabilístico consiste en calcular un gran número de posibles caminos para la colada. El cálculo de cada camino se realiza con un algoritmo de MonteCarlo, donde la probabilidad de que el flujo se desplace de una celda a cada una de sus ocho vecinas es proporcional a la diferencia de altura entre la celda fuente (corregida por un parámetro global) y cada una de las vecinas. El número total de caminos que han atravesado cada celda es proporcional a la probabilidad de dicha celda de ser cubierta por la lava.

Las ventajas e inconvenientes de ambos modelos han sido mostradas en el ejemplo de aplicación de ambos modelos a la simulación de una pequeña colada de la erupción de 1991-93 del volcán Etna (Italia). Así, el modelo determinista presenta como principales ventajas el aportar información temporal acerca del desarrollo de la colada, así como una descripción precisa de su alcance y área afectada. Sus mayores inconvenientes son el requerir múltiples parámetros de entrada, algunos de ellos de difícil evaluación y la lentitud de cálculo. El modelo determinista, por el contrario, requiere muy pocos parámetros de entrada y su proceso de cálculo es mucho más rápido. Sus principales desventajas son que no aporta información temporal y que puede sobreestimar el área afectada por los flujos.

En cada caso concreto de aplicación, la elección de uno u otro modelo está condicionada por los datos disponibles, la escala de trabajo, y el objetivo de la simulación. En general, según la escala de trabajo, el ámbito de aplicación de los modelos de tipo probabilístico es el de estudios de peligrosidad a escala regional, mientras que el de los modelos deterministas es el de estudios de detalle en zonas reducidas. Si la simulación numérica se emplea en situación de crisis como herramienta para la toma de decisiones de evacuación o intervención, la información temporal puede ser fundamental, por lo que los modelos idóneos serían los de tipo determinista. Sin embargo, precisamente en situaciones de crisis puede ser muy difícil determinar algunos de los parámetros de entrada requeridos por estos modelos, por lo que sería preciso realizar múltiples simulaciones variando aquéllos parámetros que no pueden determinarse con precisión, o bien optar por modelos de tipo probabilístico, que requieren muchos menos parámetros de entrada.

En cualquier caso, siempre que se puedan determinar todos los parámetros de entrada requeridos, la interpretación conjunta de los resultados de la aplicación de ambos tipos de modelos aportará más información que la aportada por un único modelo.

Metodología para la generación de mapas de peligrosidad volcánica

Al iniciar el diseño de una metodología para la generación de mapas de peligrosidad volcánica, se impusieron como requisitos que ésta fuese válida para cualquier área volcánica, cualquier peligro volcánico y cualquier intervalo temporal (es decir, para mapas a medio y largo plazo y casos de crisis).

Asimismo, se asumió que la distribución de los productos de la erupción debería ser calculada con herramientas de simulación numérica. Otra de las condiciones que debería cumplir la metodología es la de permitir un alto grado de automatización en la elaboración del mapa. Es decir, que, en la medida de lo posible, se puedan incluir, en el caso de mapas a medio y largo plazo, datos aportados por nuevos trabajos de investigación o, en el caso de una crisis, todos los cambios que se produzcan sobre las hipótesis iniciales a lo largo de la misma (en general, datos aportados por observaciones *in situ* y por los sistemas de vigilancia). Esto implica cambiar el concepto de mapa de peligrosidad “estático” a mapas de peligrosidad “dinámicos”, que son actualizados continuamente. El marco necesario para esta automatización son los SIGs, por lo que el diseño de la metodología debía ser tal que pueda ser incluido en dichos sistemas.

Una vez definida el área de estudio y el intervalo temporal para el que se va a elaborar el mapa, la metodología propuesta en este trabajo consiste en los seis pasos siguientes:

(a) Definición de los peligros esperables

Se basa fundamentalmente en el conocimiento acerca de las erupciones ocurridas en el área de estudio. Sin embargo, los datos provenientes de otras zonas volcánicas de características similares pueden ser de utilidad para inferir el posible comportamiento futuro del volcán. La fiabilidad de la definición de los peligros esperables es función de la cantidad (y calidad) de la información disponible acerca del comportamiento del volcán a lo largo de su historia eruptiva y de su estado actual y, en caso de crisis, también de la experiencia instrumental en el seguimiento de crisis pasadas, experiencia existente en un pequeño porcentaje de los volcanes activos.

Para cada uno de los peligros esperables deben evaluarse los siguientes pasos.

(b) Probabilidad de ocurrencia de cada peligro

Se realiza, al igual que en el punto anterior, basándose en el conocimiento de la historia eruptiva del volcán. En el caso de mapas a medio/largo plazo, esta probabilidad se calcula a partir de los períodos de recurrencia para cada peligro esperable y del estado actual del volcán. El cálculo de los períodos, sólo será significativo si se dispone de un conjunto de dataciones de suficiente precisión que sea suficientemente amplio. En caso de crisis, la estimación de períodos de recurrencia carece de sentido, y las probabilidades deben estimarse en función del desarrollo de la crisis, generalmente basándose en la técnica del árbol de probabilidades.

(c) Acotación del área fuente

El método para definir el área que puede contener futuros centros eruptivos depende enormemente de las características del área de estudio. Así, en algunos volcanes, el área fuente puede estar limitada a uno o unos pocos cráteres, mientras que en otras, el área susceptible de contener futuros centros de emisión puede ser mucho más extensa, en cuyo caso puede ser necesario determinar la probabilidad de cada punto de contener futuros centros eruptivos. La evaluación numérica de esta probabilidad debe hacerse teniendo en cuenta todos los datos que puedan aportar información acerca de la estructura del área de estudio. En el caso de una situación de crisis, la acotación del área fuente se realizará basándose fundamentalmente en los datos aportados por la red de

vigilancia y, en general, será menos extensa que en el caso de mapas a medio o largo plazo.

(d) Caracterización de la erupción esperable

La caracterización de la erupción esperable consiste en determinar, o, al menos, acotar una serie de parámetros de la misma que serán los parámetros de entrada del modelo de simulación numérica. Por tanto, a pesar de la estructura lineal de la metodología, este punto y el siguiente están íntimamente relacionados, puesto que los datos disponibles limitarán la elección del modelo que se empleará en la simulación numérica, y el modelo elegido determinará qué parámetros son necesarios para caracterizar la erupción esperable. En muchos casos, la erupción esperable puede definirse tomando como modelo una erupción ya ocurrida que haya sido bien estudiada y que responda a la erupción esperable en el área.

(e) Simulación numérica de los peligros esperables

Para cada peligro volcánico esperable se elegirá un modelo numérico que simule los efectos de la erupción esperable. La elección de dicho modelo estará condicionada no sólo por el tipo de información que se desea obtener sino, como ya se ha apuntado, por los datos disponibles. Es importante analizar si las características del área de estudio se enmarcan en las condiciones de aplicabilidad del modelo escogido, puesto que, por ejemplo, un modelo diseñado para describir el comportamiento de flujos piroclásticos en zonas de escasa pendiente puede ser completamente inútil si se está trabajando en áreas muy abruptas, ya que se pueden producir fenómenos no contemplados por el modelo.

(f) Elaboración del mapa de peligrosidad

Una vez realizadas las simulaciones numéricas pertinentes, los resultados obtenidos se procesan del modo apropiado para obtener un mapa que refleje la probabilidad de afección de cada punto para la erupción esperable. El producto de este mapa por la probabilidad de que se produzca dicha erupción será el mapa de peligrosidad, en el que el valor de cada punto representa la probabilidad de que dicho punto se vea afectado por el peligro considerado durante el intervalo de tiempo para el que se realiza el mapa.

Los mapas obtenidos según esta metodología responden a la definición de peligrosidad, es decir, el valor en cada punto corresponde a la probabilidad de que durante el intervalo de tiempo seleccionado dicho punto se vea afectado por el peligro considerado.

La metodología propuesta en esta tesis doctoral se ha aplicado para generar mapas de peligrosidad volcánica a medio plazo de las islas canarias de Lanzarote y Tenerife. En ambos casos, dada la escasez de erupciones históricas, no es posible determinar de forma fiable los períodos de recurrencia y, por tanto, tampoco la probabilidad de ocurrencia de una futura erupción, por lo que la interpretación de los valores de probabilidad de los mapas finales obtenidos debe hacerse de forma relativa y no absoluta. Para obtener mapas de peligrosidad *stricto sensu* únicamente habría que multiplicar dichos mapas por un factor de escala igual a la probabilidad de ocurrencia, para un intervalo temporal determinado, de una erupción del tipo correspondiente.

La determinación de los peligros volcánicos esperables a medio plazo en ambas islas se ha llevado a cabo en función de la historia eruptiva reciente de ambas áreas. Así, las

coladas de lava representan el peligro esperable principal en las dos islas, mientras que en Tenerife también es esperable una erupción explosiva asociada al complejo central de la isla (en este caso sólo se han elaborado mapas de peligrosidad para caída de cenizas, aunque dichas erupciones también podrían producir flujos piroclásticos). En ambos casos se ha discutido la posibilidad de la interacción agua-magma que daría lugar a erupciones hidromagmáticas que podrían producir oleadas piroclásticas. Puesto que las zonas en las que puede ser esperable este tipo de interacción son fundamentalmente las costeras, el efecto esperable en el mapa de peligrosidad se limitaría a una banda de escasos kilómetros de ancho orlando la línea de costa que forma parte de las áreas fuente consideradas.

La selección de las áreas fuente para cada peligro se ha realizado, fundamentalmente, en función de la distribución de centros eruptivos pasados. Las simulaciones numéricas se han llevado a cabo con los modelos propuestos en esta memoria, optando, para la simulación de lavas, por el modelo probabilístico, dado el carácter regional de los estudios.

Lanzarote

El mapa de peligrosidad para invasión de lavas obtenido para Lanzarote (figura 1) muestran un área potencialmente afectada similar a la cubierta por las lavas en la erupción de 1730-36, resultado lógico, puesto que el área fuente considerada engloba los centros eruptivos de dicha erupción.

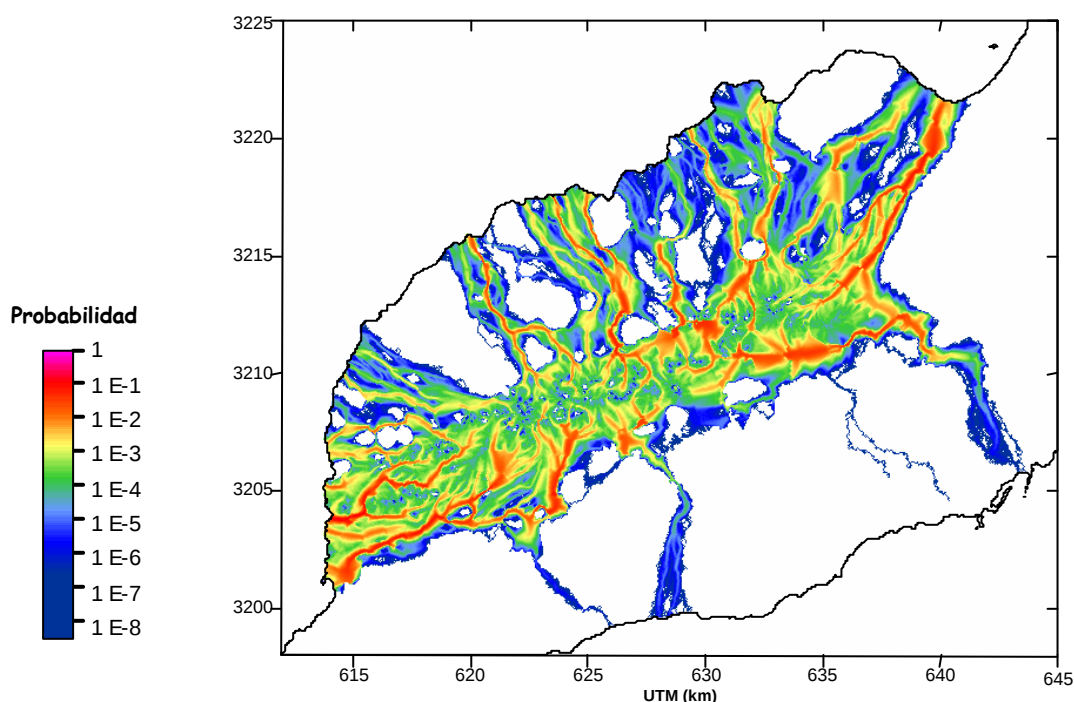


Figura 1.- Mapa de peligrosidad a plazo medio para coladas de lava en Lanzarote.

En el mapa se observa que la zona E de la isla y la mayor parte de la zona S de la misma están protegidas topográficamente frente a las lavas. Sin embargo, de los pocos posibles caminos que alcanzan la zona S de la isla, un grupo de ellos resulta especialmente importante en términos de riesgo, ya que se afectan a los alrededores de Arrecife, el mayor núcleo de población de la isla y que aglutina gran parte de las

infraestructuras de la misma. Por ello se ha llevado a cabo una simulación refinada, sobre un MDE de menor tamaño de celda, de dichos posibles caminos.

El mapa obtenido muestra que, aunque los flujos no afectarían a la totalidad del casco urbano, podrían dejar la ciudad prácticamente aislada y dejar inoperativos elementos tales como la planta potabilizadora, planta de energía, depósitos de combustible, puerto, aeropuerto, ... etc.

Tenerife

En Tenerife se han elaborado tres mapas de peligrosidad para invasión de lavas, partiendo de tres distribuciones de probabilidad diferentes en el área fuente (la figura 2 muestra uno de estos mapas). Aunque estos tres mapas muestran aspectos muy diferentes, el análisis conjunto de todos ellos ha permitido identificar los caminos de mayor probabilidad, independientemente de la distribución de probabilidad en el área fuente empleada.

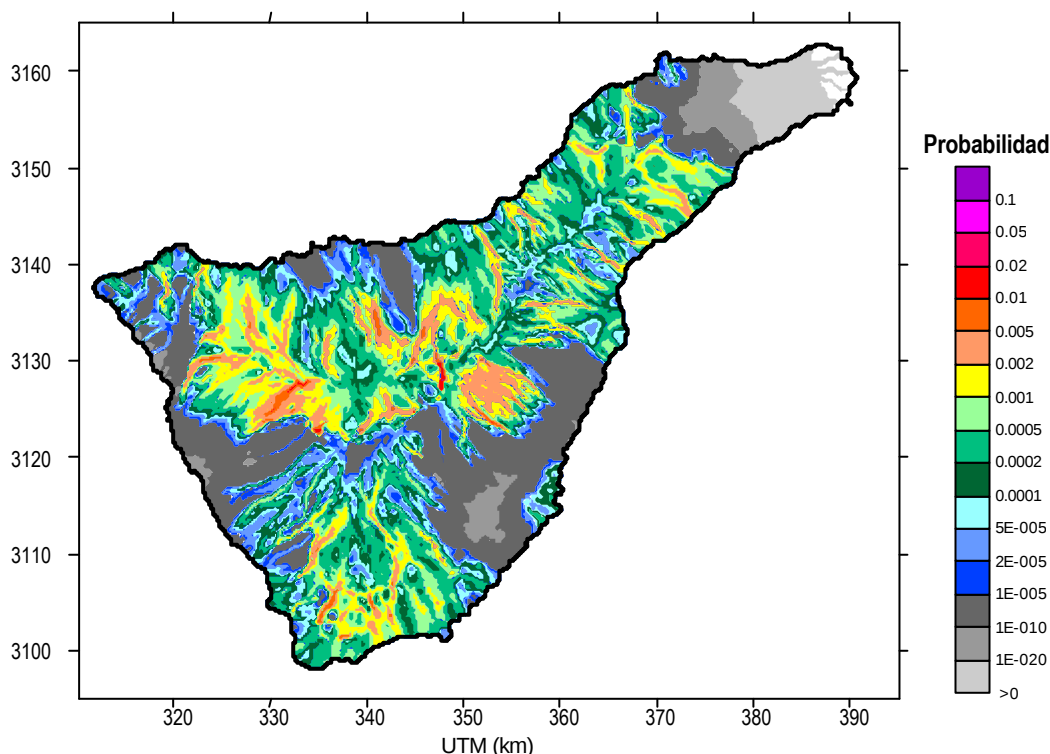


Figura 2.- Mapa de peligrosidad a plazo medio para coladas de lava en Tenerife, considerando una distribución de probabilidad en el área fuente calculada según el análisis bivariante de Cox.

Los mapas de peligrosidad para caída de cenizas obtenidos para Tenerife (ver ejemplo en figura 3), muestran la probabilidad de recubrimiento por dos valores de espesor de cenizas, teniendo en cuenta estadísticas de distribución de vientos en la isla y considerando una erupción similar a la de Montaña Blanca, en la que todo el volumen fuese emitido en una única columna de altura máxima igual a la altura máxima alcanzada en dicha erupción.

La mayor utilidad de los modelos de dispersión de cenizas volcánicas no es la elaboración de mapas de peligrosidad a medio y largo plazo, sino la generación de mapas de peligrosidad a muy corto plazo (del orden de días u horas) en situaciones de crisis, considerando como parámetros de entrada los mapas de pronóstico de vientos.

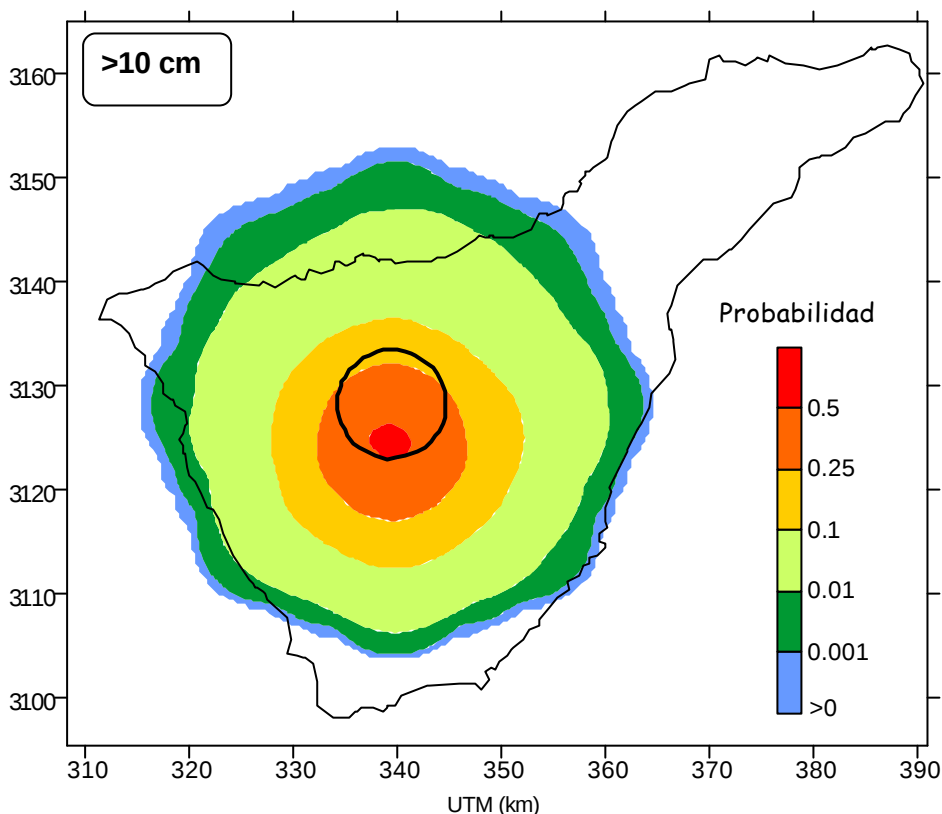


Figura 3.- Mapa de peligrosidad a plazo medio para recubrimiento por más de 10 cm de cenizas en Tenerife.

Todos los mapas de peligrosidad obtenidos en este trabajo muestran la gran utilidad de los modelos propuestos como herramientas para la generación de mapas de peligrosidad volcánica, así como la validez de la metodología propuesta para dicho fin. Mapas como los presentados en esta memoria pueden ser el punto de partida para análisis de riesgo volcánico en ambas islas. Futuros análisis de detalle en áreas específicas deberían ser un apoyo en la toma de decisiones acerca de la localización de futuras infraestructuras o en el diseño de estrategias para la mitigación del riesgo volcánico en las áreas estudiadas.

INTERÉS DE LA TESIS PARA PROTECCIÓN CIVIL

Ya en el año 1990, la IAVCEI (*International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior*) dentro de su documento *Reducing Volcanic Disasters in the 1990's* hacía hincapié en que un mapa de peligrosidad volcánica debe incluir "...Peligros volcánicos directos, incluyendo descripción detallada de cada uno de ellos, especialmente alcances, velocidades y su impacto en el hombre y el medio ... Peligros volcánicos secundarios o inducidos ... Áreas afectadas para cada evento aislado y combinación de eventos".

Sin embargo, la extrema complejidad del riesgo volcánico hace que hoy en día no exista una metodología estándar internacional para la elaboración de mapas de peligrosidad volcánica, por lo que existe una gran heterogeneidad en el tipo de información incluida en los mapas publicados como “mapas de peligrosidad” en los distintos volcanes del mundo.

Los grandes avances que han tenido lugar en los últimos años en el campo de la informática y, más específicamente, en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica, han traído consigo cambios fundamentales en la gestión del riesgo volcánico. Este hecho, unido a los grandes progresos realizados en la modelización física y la simulación numérica de los procesos volcánicos, ha desembocado en nuevos planteamientos de los mapas de riesgo y peligrosidad. Así, se ha pasado de mapas de peligrosidad básicamente cualitativos, basados principalmente en el estudio de los productos de erupciones pasadas, a mapas de peligrosidad obtenidos a partir de simulaciones numéricas de los efectos de posibles erupciones, y de mapas de riesgo “sobre papel” a mapas de riesgo “dinámicos”, que son actualizados continuamente en función de cambios en la estructura socio-económica o, en caso de una situación de crisis, en la evolución del proceso volcánico. Los SIGs constituyen, no sólo el entorno natural para esta nueva concepción de mapas de riesgo y peligrosidad, sino que aportan herramientas que automatizan en gran medida la actualización y generación de dichos mapas.

La estructura de la metodología propuesta hace que pueda ser integrada de forma eficiente en un entorno de SIG (integración que ha sido realizada con posterioridad a la defensa de esta tesis doctoral). Esta integración permite automatizar en gran medida la generación de mapas de peligrosidad volcánica, y, por tanto, automatizar también la actualización de los mapas de riesgo basados en los mapas de peligrosidad. De este modo, los mapas obtenidos con la metodología propuesta constituyen una herramienta útil en el diseño y ensayo de estrategias mitigadoras del riesgo volcánico.

Obviamente, la utilidad de la metodología y los modelos propuestos dentro del ámbito de la reducción del riesgo es muy diferente según se trate de mapas a medio/largo plazo o a corto plazo (escala desde horas a meses). En el primer caso, mapas de peligrosidad como los elaborados en esta tesis constituyen un punto de partida fundamental en el ámbito de la planificación territorial, especialmente en la ubicación de nuevas infraestructuras tales como hospitales o aeropuertos.

Pero es en caso del corto plazo donde su aportación a la reducción del riesgo volcánico es más importante. Así, la generación de escenarios eruptivos con los modelos numéricos propuestos permite el ensayo de estrategias de evacuación e incluso el diseño de medidas de intervención directa sobre el fenómeno (como, por ejemplo, la construcción de barreras para desviar o contener coladas de lava). En situación de crisis volcánica, la metodología y los modelos numéricos propuestos integrados en un SIG, permitirían evaluar los escenarios esperables en función del desarrollo de la crisis. Así, por ejemplo, disponiendo de los datos de pronóstico meteorológico a corto plazo, se podría elaborar periódicamente el escenario esperable para caída de cenizas (que depende críticamente del campo de vientos). Incluso una vez iniciada la erupción, en el caso de coladas de lava, podría actualizarse también de forma periódica el pronóstico del área afectada por las coladas en función del tiempo. El análisis del riesgo asociado a estos escenarios (que también puede automatizarse en un entorno SIG) constituye una herramienta fundamental para la organización de evacuaciones y por tanto, para la mitigación del riesgo volcánico.