

Cartografía de Peligrosidad Volcánica de la isla de Tenerife

Instituto Geológico y Minero de España
Ministerio de Educación y Ciencia

Abril de 2006

Presentación

La presente memoria sintetiza los resultados y métodos empleados para la elaboración de la Cartografía de Peligrosidad Volcánica de la isla de Tenerife a escala 1:25.000.

Este proyecto se ha realizado en el marco del Plan Nacional de Riesgos Geológicos (PRIGEO) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), cuyo objetivo fundamental es la creación de una infraestructura cartográfica de conocimiento sobre riesgos geológicos. Las primeras actividades de este Plan corresponden al establecimiento de la normativa cartográfica y a la validación de metodologías mediante modelos concretos de mapas.

Tanto los métodos utilizados como los resultados obtenidos en este estudio están condicionados por los objetivos y finalidad del mismo y por la escala de representación final considerada (1:25.000). Por este motivo, el uso que se derive de la información aquí recogida para otras finalidades u otras escalas de trabajo debe considerar las limitaciones propias de la extrapolación o interpolación de resultados.

El documento de memoria consta de cuatro grandes apartados:

- Presentación del proyecto, en el que se encuadra el contexto de su desarrollo tanto en los aspectos que justifican su ejecución como en lo que se refiere al marco científico y geográfico del mismo.
- El análisis de la peligrosidad volcánica, destinado a presentar una los conceptos básicos necesarios para comprender los trabajos ejecutados y el marco conceptual sobre el que se ha realizado la cartografía.
- Desarrollo metodológico, en el que se analiza en detalle cada uno de los procesos que han intervenido en la realización de la cartografía de peligrosidad y
- Cartografía de peligrosidad volcánica, que presenta los resultados del proyecto.

La memoria se completa con referencias bibliográficas y anexos cartográficos. Tanto los mapas como la memoria deben examinarse siempre en conjunto, siendo ambos interdependientes.

Relación de Autores

Director de proyecto: Luís LAÍN HUERTAS

Centro: Instituto Geológico y Minero de España

Dirección: C/ Ríos Rosas 23 – CP 28003, MADRID

Teléfono: (+34) 91 349 57 81

Correo electrónico: l.lain@igme.es

<http://www.igme.es>

Fernando PÉREZ CERDAN

Centro: Instituto Geológico y Minero de España

Dirección: C/ Ríos Rosas 23 – CP 28003, MADRID

Teléfono: (+34) 91 349 57 66

Correo electrónico: f.perez@igme.es

María Jesús MANCEBO MANCEBO

Centro: Instituto Geológico y Minero de España

Dirección: C/ Ríos Rosas 23 – CP 28003, MADRID

Teléfono: (+34) 91 349 57 53

Correo electrónico: mj.mancebo@igme.es

Félix BELLIDO MULAS

Centro: Instituto Geológico y Minero de España

Dirección: C/ La Calera 1 – CP 28760, Tres Cantos, MADRID

Teléfono: (+34) 91 349 72 53

Correo electrónico: f.bellido@igme.es

Inés GALINDO JIMÉNEZ

Centro: Instituto Geológico y Minero de España

Dirección: C/ Alonso Alvarado 43 2ª – 35003, LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Teléfono: (+34) 928 36 6575 / 6016

Correo electrónico: i.galindo@igme.es

Jefe de proyecto: Francisca GÓMEZ FERNÁNDEZ

Centro: COTESA

Dirección: C/ Santa Engracia 151, 2-1 – CP 28003, MADRID

Teléfono: (+34) 91 4560428

Correo electrónico: franciscagomez@grupotecopy.es

<http://www.grupotecopy.es/cotesa>

Jefe de proyecto: Federico REAL SERRANO

Centro: COTESA

Dirección: C/ Santa Engracia 151, 2-1 – CP 28003, MADRID

Teléfono: (+34) 91 4560428

Correo electrónico: federicoreal@grupotecopy.es

COLABORADORES

Pedro José RODRÍGUEZ POMARES

Centro: Cabildo de Tenerife

Área de Planificación y Cooperación

Servicio Técnico de Planes Insulares

Dirección: Plaza de España s/n, 38003 – SANTA CRUZ DE TENERIFE

Teléfono: (+34) 901501901

José Luis TENDILLO CORTIJO

Centro: Cabildo de Tenerife

Área de Planificación y Cooperación

Servicio Técnico de Planes Insulares

Dirección: Plaza de España s/n, 38003 – SANTA CRUZ DE TENERIFE

Teléfono: (+34) 901501901

Nemesio PÉREZ RODRÍGUEZ

Centro: Instituto Tecnológico y de Energías Renovables

Dirección: Polígono Industrial de Granadilla, s/n – 38611, Granadilla de Abona, SANTA CRUZ DE TENERIFE

Teléfono: (+34) 922 39 10 00

Rayco MARRERO SOSA

Centro: Instituto Tecnológico y de Energías Renovables

Dirección: Polígono Industrial de Granadilla, s/n – 38611, Granadilla de Abona, SANTA CRUZ DE TENERIFE

Teléfono: (+34) 922 39 10 00

Joan MARTI MOLIST

Centro: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera

Dirección: Luis Sole I Sabaris, S/N, 08028-BARCELONA

Teléfono: (+34) 93 4095410

Alicia FELPETO RIELO

Centro: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera

Dirección: Luis Sole I Sabaris, S/N, 08028-BARCELONA

Teléfono: (+34) 93 4095410

<i>Presentación del proyecto</i>	1
Introducción.....	1
Antecedentes.....	5
Ámbito territorial	9
Encuadre geodinámico del volcanismo canario	9
Estratigrafía y cronología de Tenerife	12
<i>El análisis de la peligrosidad volcánica</i>	33
Riesgo y Peligrosidad Volcánicos	33
Cartografía de Peligrosidad Volcánica	34
Alternativas metodológicas al estudio de la peligrosidad volcánica	37
Marco de elaboración de la cartografía de peligrosidad.....	41
Diseño conceptual del modelo de cálculo	43
Condiciones de modelización de la peligrosidad.....	46
Escenarios para la simulación de piroclastos de caída	48
Definición de escenarios de peligrosidad.....	49
<i>Desarrollo metodológico</i>	53
Inventario de datos.....	53
Cartografía geológica.....	53
Centros de emisión	55
Datos estructurales	56
Datos geocronológicos.....	57
Datos geoquímicos	60
Datos para la simulación de erupciones	61
Datos para la representación cartográfica	67
Modelo de fuente.....	69
Definición de evento.....	69
Metodología para el cálculo de la probabilidad espacial	75
Desarrollo del modelo de fuente	77
Modelo de recurrencia	83
Metodología de análisis	83
Preparación y tratamiento de datos: hipótesis de trabajo	85
Desarrollo del modelo de recurrencia	87
Modelo de peligros.....	93
Distribuciones de probabilidad.....	97
Modelos físicos de simulación.....	99
Criterios para la selección de modelos de simulación.....	101
Modelización de erupciones efusivas.....	103
Modelización de erupciones explosivas	112

Modelización de erupciones efusivas.....	117
Modelización de erupciones efusivas.....	125
<i>Cartografía de peligrosidad volcánica</i>	<i>133</i>
Mapa de peligrosidad frente a coladas lávicas	133
Generación de la base de datos de eventos	133
Generación de estadísticas por celda de malla	134
Obtención de parámetros para distribuciones Pareto.....	136
Generación del mapa de peligrosidad volcánica	136
Susceptibilidad frente a la caída de cenizas	137
<i>Referencias bibliográficas.....</i>	<i>141</i>
<i>Anexo 1. Esquema del modelo de calculo de la peligrosidad para erupciones efusivas.....</i>	<i>152</i>

Presentación del proyecto

Introducción

De acuerdo con los datos de Programa Global de Volcanismo (GVP, Smithsonian Institution), en la actualidad existen aproximadamente unos 1.500 volcanes que se cree han desarrollado algún tipo de actividad durante el periodo Holoceno (últimos 10.000 años). Este es el margen de tiempo que se utiliza en general para estimar que un área volcánica es potencialmente activa y que marca la necesidad de determinar el tipo de fenómenos que se pueden desencadenar y sus potenciales efectos sobre las áreas circundantes.

Exceptuando el fondo de los océanos (el volcanismo submarino se estima que supone aprox. el 83% del total de la actividad volcánica del planeta), la mayor parte de los volcanes conocidos activos y extintos se disponen en relación con márgenes de placa convergentes y en menor proporción en márgenes divergentes subaéreos (ej. Islandia, Rift Valley) o zonas intraplaca.

Existe una proporción importante de asentamientos humanos situados en las proximidades de estas áreas volcánicas activas. Estos son preferentemente los que se encuentran en el “cinturón de fuego” del Pacífico, pero también en algunas áreas de subducción aisladas (ej. Italia, Grecia) y en numerosas islas oceánicas (Small & Naumann, 2001). Este hecho es importante ya que muy especialmente desde la segunda mitad del siglo XX la población y los bienes expuestos a los fenómenos volcánicos se han multiplicado, con lo que el potencial de daños derivados de las erupciones volcánicas se ha incrementado notoriamente.

La causa inicial y principal de la proliferación de núcleos de poblamiento en el entorno de las áreas volcánicas se encuentra en la riqueza de sus suelos, lo que ha favorecido, especialmente en las regiones de clima tropical y templado (SE de Asia, Latinoamérica), el desarrollo de explotaciones agrícolas y forestales de tipo intensivo en las faldas de los edificios volcánicos, en ocasiones hasta en áreas muy próximas a las bocas eruptivas.

En la actualidad, a este hecho se añade el aumento de la localización de la población en centros urbanos y la expansión indiscriminada del tejido urbano e industrial, unidos a la falta en muchos casos de figuras de protección o de planeamiento adecuadas. Esto ha dado lugar a que un número cada vez mayor de grandes urbes se encuentren localizadas en las inmediaciones o directamente sobre áreas volcánicas activas (ej. Nápoles, México DF, Jogyakarta, Auckland).

Si además se considera el interés paisajístico de las áreas volcánicas activas y la curiosidad que despiertan en el público general los fenómenos volcánicos y asociados (ej. géiseres, fumarolas, calderas...), nos encontramos con que muchas zonas volcánicas se han convertido en focos de atención para ciertos sectores turísticos, con el consiguiente desarrollo de infraestructuras de todo tipo. Este interés se acrecienta cuando, como ocurre en muchos casos, sus características peculiares han dado lugar a la proclamación de éstas

áreas como Parques Nacionales (Yellowstone, Teide) o incluso Reservas de la Biosfera (Islas Galápagos, Garajonay).

Aparte de la necesidad creciente de espacio urbano y de aprovechamientos agrícolas, uno de los motivos principales por los que se ocupan indiscriminadamente las áreas volcánicas activas es la percepción temporal que las poblaciones de estas zonas tienen del riesgo. Los largos periodos de reposo entre erupciones que experimentan muchos volcanes (en general, a mayor grado de explosividad, mayor suelen ser éstos), algunos de cientos e incluso miles de años, da lugar a que no exista una “conciencia de riesgo” entre la población, por lo que se tienden a ocupar estos terrenos con la suposición de que como no hay noticias de actividad en un largo periodo, el volcán se encuentra extinto. Este fue el caso de volcanes como El Chichón (1982), Pinatubo (1991) o La Soufriere-Montserrat (1995).

En general se puede afirmar que el cambio radical experimentado en la relación del hombre con el medio físico a lo largo del siglo pasado ha contribuido a incrementar la vulnerabilidad de ambos frente a los fenómenos volcánicos de forma sustancial. Este hecho se ha visto reflejado en el incremento progresivo de las pérdidas económicas y de los costes sociales derivados de los efectos del volcanismo a nivel global, tendencia que es común al resto de los peligros naturales (terremotos, tsunamis, huracanes, inundaciones...). Sin embargo, en comparación con otros "desastres" naturales o inducidos por el hombre, desde un punto de vista global, los causados por los fenómenos volcánicos y asociados son bastante infrecuentes, afectan a un entorno por lo general bastante localizado y causan menores pérdidas en vidas humanas. La erupción más destructiva de la historia (Tambora, Indonesia, 1815) acabó con la vida de 92.000 personas, frente a las 500.000 víctimas que produjo el huracán del Delta del Ganges en 1970 (Tilling, 1989), que es el más destructivo registrado hasta la fecha.

Aunque comparativamente la pérdida global de vidas humanas causadas por efecto de la actividad volcánica no es dramática, sus efectos sobre el entorno ambiental y socioeconómico suelen ser más graves a posteriori que las derivadas de otros fenómenos naturales, debido al nivel de destrucción que generan las erupciones y a la irreversibilidad de muchos de los daños que producen. Por este motivo, en áreas volcánicas activas resulta imprescindible incorporar el estudio de los efectos potenciales de la actividad que se pueda desarrollar en el futuro a los planes de desarrollo y de gestión del territorio.

En España, la Ley 2/1985, de 21 de enero, sobre Protección Civil, establece el marco institucional que pone en funcionamiento el sistema de Protección Civil en España y reconoce la necesidad de disponer de una serie de Planes capaces de hacer frente a riesgos genéricos así como, de acuerdo con el proceso actualmente vigente en la UE, Planes para riesgos específicos.

El 21 de febrero de 1996, la Secretaría de Estado de Interior dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo

Volcánico. Entre las funciones básicas del Plan de Comunidad Autónoma se señala, en su apartado 4.3.2., la zonificación del territorio en función de la peligrosidad volcánica.

La cartografía de peligrosidad volcánica se reconoce por tanto como la herramienta básica sobre la que elaborar los Planes de Prevención y Planificación de Protección Civil, y se constituye además como un elemento básico a tener en cuenta en la ordenación de Territorio, en la medida en la que los Planes de Ordenación deberán tener en cuenta la zonificación de los peligros que puedan afectar su territorio.

En España, la única zona del territorio afectada por volcanismo activo y que, por tanto, con necesidad de generar cartografía de peligrosidad, comprende el Archipiélago Canario, en donde, desde hace varias décadas se han llevado a cabo numerosos estudios para caracterizar el entorno geológico y geodinámico en el que se ha desarrollado la actividad volcánica con el fin de determinar su posible evolución futura.

Las islas del archipiélago con un mayor volumen de actividad en tiempos históricos y aquellas en las que eventos futuros pudieran suponer una mayor peligrosidad son sobre las que se ha centrado la realización de trabajos. En particular la isla de Tenerife, con presencia de un volcanismo de tipo central con elevada explosividad potencial, ha concentrado la atención de la comunidad científica a nivel internacional.

La ocurrencia, a lo largo del año 2004, de una crisis volcánica en la isla de Tenerife, ha puesto de manifiesto la necesidad de disponer de un documento de trabajo sobre el que sea posible hacer frente a una eventual erupción volcánica. Las dificultades que suponen el manejo de una crisis volcánica se han visto agravadas en este caso por la carencia de medios suficientes de valoración, incluyendo a otros tantos una cartografía de peligrosidad volcánica oficial que se haya podido utilizar como base para la toma de decisiones.

Por este motivo, el IGME se ha planteado la necesidad de realizar los trabajos necesarios que permitan unificar y analizar el gran volumen de información disponible sobre las características volcanológicas de Tenerife y generar a partir de ellos una primera cartografía de peligrosidad volcánica que podrá ser utilizada para la puesta en marcha de medidas preventivas y de documento de referencia en el caso de que en el futuro se produjeran situaciones similares a la ocurrida en 2004.

Por otro lado, en marzo de 2005, el IGME ha aprobado el Plan PRIGEO, cuyo objetivo fundamental es la creación de una infraestructura cartográfica de conocimiento sobre riesgos geológicos, así como la planificación de los trabajos a realizar en este campo a corto y medio plazo, incluyendo el desarrollo de metodologías y normativas, para, de esta manera, unificar esfuerzos y orientarlos en la misma dirección, evitando la duplicidad de tareas y la dispersión de los trabajos. Todo ello permitirá alcanzar metas concretas, aumentando el rendimiento y la productividad.

Las primeras actividades en el seno de este Plan corresponderán al establecimiento de la normativa cartográfica, a partir de la experiencia ya acumulada, y a la validación de estas metodologías cartográficas mediante modelos concretos de mapas. Evidentemente, surge de inmediato la conveniencia de aprovechar la necesidad mas arriba comentada de realizar la cartografía de peligrosidad volcánica de la isla de Tenerife

para la ejecución de unos de los primeros proyectos piloto del Plan PRIGEO sobre elaboración de la normativa de cartografía de peligrosidad volcánica y su validación con la ejecución de los mapas de la isla de Tenerife.

Antecedentes

En el Archipiélago Canario, se ha abordado el estudio de la peligrosidad y el riesgo volcánicos en las tres últimas décadas. De la totalidad del archipiélago, son las islas de Tenerife y Lanzarote sobre las que se reúne el mayor número de estudios. La presencia del Teide en Tenerife, único volcán central activo en el territorio insular, y la localización en Lanzarote de manifestaciones geotérmicas superficiales, residuos de la erupción histórica con mayor duración y emisión de materiales del archipiélago, son los principales motivos que han convertido a ambas islas en el foco de atención.

La situación en España a nivel de desarrollo de estudios de peligrosidad volcánica se puede decir que ha seguido durante la última década la tendencia global general (Chester et al., 2002).

Los estudios encaminados a analizar la peligrosidad volcánica llevados a cabo hasta la fecha en la isla de Tenerife se han caracterizado por tres rasgos fundamentales:

- Independientemente del fenómeno considerado, los estudios se han centrado en la elaboración de cartografías de susceptibilidad (aún cuando es posible encontrar algunos casos en los que se habla de cartografía de peligrosidad), ya que las metodologías aplicadas para la evaluación de las áreas con posibilidad de invasión de fenómenos se han definido atendiendo a criterios no probabilísticos, requisito básico a la hora de generar una cartografía de peligrosidad.
- Se han centrado en la valoración de la peligrosidad asociada fundamentalmente a los fenómenos efusivos y, en particular a las coladas lávicas, aunque existe alguna iniciativa destinada a la valoración de los efectos de las erupciones explosivas, pero con un impacto muy limitado, dada la escasez de datos disponibles a tal efecto.
- La inexistencia de una cartografía de síntesis generada teniendo en cuenta los diversos estilos eruptivos posibles en la isla y sus fenómenos asociados.

En lo que respecta a los métodos de generación de cartografía, se han aplicado desde enfoques geológicos clásicos o geomorfológicos a otros más sofisticados que incorporan la aplicación de modelos físicos de simulación de fenómenos eruptivos. La utilización de unos y otros no es excluyente, puesto que su limitación radica fundamentalmente en las fuentes de datos utilizadas y el propósito al que se pueden dedicar. El mayor problema es para muchos de ellos la escasez de datos utilizados para llevar a cabo el análisis, lo que limita la aplicabilidad de los resultados obtenidos.

Existe una gran cantidad de información aportada por las numerosas investigaciones dedicadas al análisis detallado del registro geológico, lo que ha permitido reconstruir con bastante fiabilidad la historia eruptiva del archipiélago (ej. Schmincke, 1982).

El desarrollo de nuevas investigaciones en el período 1993-1995 en el marco del Proyecto Teide (EV5V-CT93-0283, 1993-1995), ha ampliado los conocimientos adquiridos previamente (ej. Bryan, 1995; Martí et al., 1995), lo que ha permitido reconstruir con precisión el marco evolutivo del volcanismo en la isla de Tenerife y caracterizar su actividad eruptiva (ej. Araña et al., 1994; Martí et al., 1994a, 1994b; Ablay et al., 1995).

Las primeras evaluaciones realizadas se han centrado en la estimación cualitativa de los factores de peligro potencial y de sus posibles áreas de influencia basándose en los conocimientos existentes de las erupciones del registro histórico y geológico (ej. Bravo, 1980; Booth, 1984; Alonso, 1986; Tomblin, 1986; Carracedo, 1988; Martí et al., 1994b), habiendo sólo un escaso desarrollo de la cartografía de riesgos (ej. Araña, 1988; Carracedo et al., 1990).

Los datos recopilados por estos estudios resultan altamente valiosos para la evaluación adecuada de la peligrosidad y el riesgo volcánico. Sólo en Tenerife, las investigaciones dedicadas a recopilar datos sobre los aspectos más significativos del volcanismo de la isla cubren un amplio abanico (petrología, estratigrafía, geoquímica, geocronología, etc.). Como ejemplo, se pueden citar los trabajos de Alonso, 1989; Ancochea et al., 1989; Araña & Coello, 1989 y de la Nuez et al., 1993.

En cuanto al volcanismo histórico,- del que no existe un registro importante -, también ha sido objeto de amplio estudio en el archipiélago (ej. García Moral, 1989; Romero, 1991), proporcionando una base para el análisis de la vulnerabilidad del medio frente a los procesos eruptivos y del comportamiento de los fenómenos asociados.

Otra línea de trabajo desarrollada en el archipiélago, y de importante significación para la evaluación de peligrosidad y riesgo, la ha constituido el análisis sobre la localización de futuros centros eruptivos. Son pocos los estudios realizados (ej. Carracedo, 1993), si bien muchos autores mencionan la distribución de centros en torno a una serie de alineaciones con significado tectónico regional (ej. Coello & Bravo, 1989), aunque sólo algunas investigaciones profundizan más en el análisis objetivo de este tema (ej. Ancochea et al., 1995).

En cuanto al análisis de parámetros geofísicos y geodésicos, en la última década se han llevado a cabo una serie de investigaciones (ej. Mezcua et al., 1989; Vieira & Sevilla, 1989; Ortiz et al., 1995) centradas principalmente en Tenerife y Lanzarote, las cuales han permitido no sólo importantes avances en instalación de redes de vigilancia, sino también la evaluación de la estructura interna de las islas.

Durante los últimos diez años se ha dedicado además un importante esfuerzo a analizar aspectos específicos de la peligrosidad volcánica del archipiélago, mediante la realización de tesis doctorales y los trabajos de investigación derivados de las mismas (Ej. Felpeto, 2002; Zafrilla, 2001; Ablay, 1997; Gómez Fernández, 1997), los cuales proporcionan una base excelente sobre la que desarrollar estudios más sofisticados sobre la peligrosidad volcánica, como el que se hace frente en este estudio.

Este tipo de investigaciones, en conjunto, ha servido de base para llevar a cabo el análisis de la peligrosidad potencial de eventos futuros en las islas y estimar las características típicas de los fenómenos asociados. En todos estos casos, el análisis del riesgo se ha llevado a cabo desde una perspectiva científica, sin haberse realizado valoraciones formales desde el punto de vista de la Protección Civil o la Ordenación del Territorio. Una primera aproximación al análisis de la susceptibilidad volcánica de Tenerife está siendo abordado en el marco del Plan Territorial Especial de Prevención de Riesgos y Equipamientos de Protección Civil (PTEOPRE) del Cabildo de Tenerife, actualmente en fase de Avance.

Ámbito territorial

La isla de Tenerife está situada en la mitad occidental del archipiélago canario, entre los paralelos 28°N y 28°35'N y los meridianos 16°8'E y 16°46'E, frente al NW del continente africano y a 370 Km. de su costa. Con sus 2.058 Km² de superficie, es la isla más extensa del archipiélago. Su mayor altura es el Pico del Teide, que culmina a los 3.718 m sobre el nivel del mar (MAPA 1).

El análisis de la peligrosidad volcánica requiere un conocimiento riguroso de su encuadre geodinámico y geológico. Por este motivo nos hemos centrado en el análisis de una serie de aspectos que hemos considerado clave para la correcta evaluación de la misma y que nos han conducido a la caracterización de la realidad geológica.

El presente capítulo se estructura en dos apartados principales: el primero se dedica a presentar el encuadre geodinámico en el que se encuentra enclavado el volcanismo canario, cuyo análisis resulta fundamental a la hora de comprender y caracterizar el comportamiento eruptivo de la zona. Este primer apartado se ha extraído de la tesis doctoral de Gómez Fernández (1997), en el que se recoge una síntesis del conocimiento existente y de las diversas hipótesis formuladas en relación a la evolución de las Canarias.

El segundo apartado recoge la última revisión publicada sobre la estratigrafía y cronología de Tenerife y procede del capítulo 3 de la tesis doctoral de Galindo (2005b), con lo que constituye una revisión actual que incorpora los últimos conocimientos sobre la evolución subaérea de Tenerife y la relación que los diversos depósitos volcánicos presentan con los correspondientes episodios constructivos de la isla.

Encuadre geodinámico del volcanismo canario

La caracterización del comportamiento eruptivo de un área volcánica activa constituye un elemento básico para analizar los riesgos asociados. La causa última de este comportamiento está íntimamente ligada al ambiente geodinámico de la región, por lo que su conocimiento es fundamental para determinar el origen y los mecanismos de formación de magmas.

Aquí seguiremos la síntesis de Araña (1995), la cual resume otros trabajos donde se discuten las últimas teorías y se presenta y comenta la bibliografía existente al respecto (ej. Araña y Ortiz, 1986).

La mayor parte del Archipiélago Canario se encuentra situada en la zona de calma magnética del margen pasivo africano, por lo que se desconoce con exactitud la edad de la corteza bajo las islas. A la imprecisión que proporciona este hecho, se une la polémica que se ha venido desarrollando en las últimas décadas sobre la naturaleza de la corteza bajo las islas, la tectónica regional y los procesos que intervienen en la generación de magmas.

En cuanto a la caracterización de la corteza, tanto su profundidad como la del manto están peor definidas que bajo los fondos marinos próximos, aunque claramente pasa de tener unos 10 Km. en el límite occidental del archipiélago a más de 20 Km. en el oriental (en Araña, 1995). Parece evidente que, al menos bajo las Canarias orientales, existe un tipo de corteza "transicional" (entre oceánica y continental) que se extiende hasta el talud continental.

La idea más generalizada es que se trata de una corteza oceánica generada en el proto-Atlántico, durante un período de polaridad normal. Por ello, esta corteza coincide con casi toda la franja de calma magnética y es asimismo una zona de gran debilidad que ha experimentado una importante subsidencia (Araña & Ortiz, 1986).

Tanto el basamento de las islas como los edificios insulares están afectados por una red de fracturas (ver Coello, 1989) que los ha compartimentado en bloques. Estas fracturas se han detectado por procedimientos geofísicos, especialmente las de los fondos marinos interinsulares y las que afectan a los alrededores del archipiélago, o por procedimientos geológicos, cuando aparecen en superficie o en subsuelos profundos donde se han realizado sondeos. También pueden ser detectadas siguiendo métodos volcanológicos, a través de la observación de redes filonianas en los complejos basales y macizos antiguos o mediante el análisis de alineaciones de conos volcánicos en formaciones más modernas.

La red de fracturas que afecta al Archipiélago parece definida por dos sistemas principales. Uno de los sistemas (~E-W) podría estar asociado a la zona de fractura transcurrente Atlantis y tener una génesis por lo tanto relacionada con el proceso de expansión oceánica. El otro (~NE-SW), en el que se han detectado mecanismos de fallas inversas, estaría constituido por fracturas desarrolladas en el margen continental del NW africano, con el mismo rumbo que sus cuencas marginales, y reproduce las cicatrices hercínicas africanas a favor de las cuales se inició la apertura del Atlántico.

El análisis de los efectos que las fases sucesivas de apertura del Océano Atlántico han tenido sobre la evolución geodinámica de la zona constituye la base para establecer la relación entre la tectónica del área y la génesis y erupción de magmas. Araña y Ortiz (1986) reconocen tres etapas clave que han influido en el desarrollo de aspectos significativos del marco geodinámico canario (figura 1):

- 1) La primera etapa, correspondiente con la formación de un proto-atlántico, se inició en el límite Triásico-Jurásico y culminó hace poco más de 150 Ma. A finales de esta etapa se formó la corteza sobre la que se asienta el Archipiélago. En cuanto al NW africano, cuenta ya con una plataforma carbonática perfectamente desarrollada en el Jurásico.
- 2) La segunda etapa abarca prácticamente la totalidad del Cretácico y se caracteriza por la deriva hacia el Este del continente africano, provocada por la definitiva apertura del Atlántico, cuyo ritmo de expansión alcanza los valores máximos en este período.

En el NW de África no parecen intervenir otros esfuerzos que los derivados de la subsidencia y colmatación de sus cuencas marginales, donde llegan a depositarse más de 10 Km. de sedimentos. En consecuencia, se deforma su basamento, especialmente en el borde oceánico, donde una flexión pudo levantar una cresta paralela a la costa africana en la zona que posteriormente ocuparon las Canarias orientales.

- 3) La tercera y última etapa se puede hacer coincidir con todo el Terciario y su diferenciación se debe a la detección de un descenso en la velocidad de apertura del Atlántico (Larson & Pitman, 1972; Pitman & Talwani, 1972), que coincide con un cambio de dirección en el movimiento relativo entre Norteamérica y África (Sclater et al., 1977) debido a la colisión entre las placas africana y europea.

Los esfuerzos que se originan como resultado de este proceso dan lugar a un contexto geodinámico fuertemente compresivo en el NW de África, que afecta a la franja localizada aproximadamente entre Canarias, Cabo Verde y tierra firme.

La compresión generalizada en el NW de África induce al levantamiento de los bloques litosféricos que previamente habían sido individualizados por la conjunción de los sistemas de fracturas dominantes.

El levantamiento de los bloques insulares pudo comenzar en el Paleoceno, al frenarse la deriva de la placa y pudo alcanzar hasta 4-5 Km. sobre el fondo oceánico. Paralelamente, la corteza afectada por este levantamiento pudo experimentar un acortamiento de cuarenta o más kilómetros (Araña & Ortiz, 1986).

Este levantamiento provoca, bajo los bloques, una despresurización en zonas relativamente profundas del manto donde se induce una fusión parcial. Asimismo, la elevación de un bloque provoca un desequilibrio isostático regional que también puede compensarse disminuyendo la densidad mediante un proceso de fusión parcial en el manto.

Cuando, esporádicamente, se invierte o atenúa la situación compresiva (que es la dominante) debido a alteraciones en la expansión oceánica, se desencadenan fases distensivas a favor de los principales sistemas de fracturas. La erupción de mayores volúmenes de magmas en Canarias se realiza en conexión con estas fases y las islas se van construyendo sobre los bloques litosféricos elevados o en proceso de levantamiento.

Estratigrafía y cronología de Tenerife

En el presente capítulo, se ofrece una visión general de la estratigrafía y cronología de los depósitos volcánicos que afloran en la isla de Tenerife. En primer lugar se presenta una síntesis de la estratigrafía de los Macizos Basálticos Antiguos basada en estudios previos. A continuación se realiza una división estratigráfica para cada una de las dorsales de la isla siguiendo la sistemática propuesta por la Organización Internacional de Estratigrafía. Finalmente, se describe la estratigrafía y cronología del Edificio Cañadas y del Complejo Teide-Pico Viejo en base a datos bibliográficos.

Macizos Basálticos Antiguos

Los Macizos Basálticos Antiguos se localizan estratigráficamente en la base del edificio insular subaéreo y están cubiertos discordantemente por los depósitos de las dorsales y del Edificio Cañadas. Se describen en este apartado las divisiones estratigráficas realizadas por otros autores en cada uno de los Macizos Basálticos Antiguos: Anaga, Teno y Roque del Conde (Figura 1).

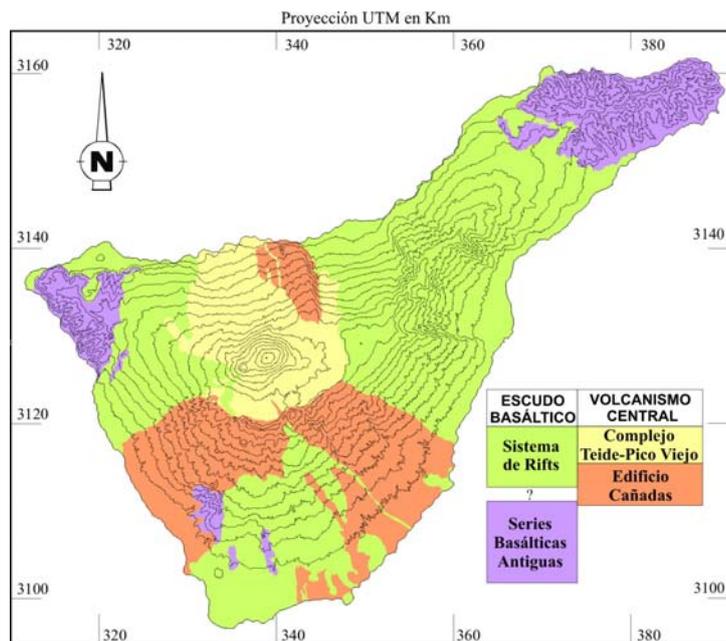


Figura 1. Localización de los Macizos Basálticos Antiguos de Tenerife. Se muestra también a localización de las Figs..3.2, 3.3 y 3.4.

Macizo de Anaga

El estudio más reciente sobre la estratigrafía del macizo de Anaga (Guillou et al., 2004) diferencia dos unidades en base a datos cronológicos, composicionales y de polaridad magnética (Figura 2): la Unidad Inferior (equivalente a la Serie I Inferior de Fúster et al., 1968) y la Unidad Superior (Serie I Media y Superior de Fúster et al., 1968).

Unidad Inferior

La Unidad Inferior aflora en el arco de Taganana (Figura 2), en algunos barrancos profundos de la zona este del Macizo y en las paredes de los valles de Tegueste y Bajamar (Guillou et al., 2004). En el Arco de Taganana (Figura 2) esta unidad está representada por ankaramitas masivas y brechificadas y brechas polimícticas con buzamientos hacia el sur, presenta polaridad normal y está densamente intruida por diques y pitones basálticos y fonolíticos (Hernández Pacheco y Rodríguez Losada, 1996). Tanto los diques como la roca encajante muestran procesos de cloritización, epidotización, formación de iddingsita y cristalización secundaria de carbonatos y zeolitas en vesículas, a favor de pequeñas fracturas y como pseudomorfo de otros minerales primarios (Rodríguez-Losada et al., 2000). El estudio de estas paragénesis minerales y los análisis isotópicos realizados por Rodríguez-Losada et al. (2000) sugieren que parte de la alteración hidrotermal en el Arco de Taganana está asociada a un ambiente submarino. Los estudios recientes sugieren una edad para la Unidad Inferior de 8,05 (Thirlwall et al., 2000) a 4,72 Ma (Guillou et al., 2004). Abdel-Monem et al. (1972) datan una roca del Arco de Taganana en 15,7 Ma sin embargo esta edad ha sido cuestionada posteriormente por otros autores (Hernández Pacheco y Rodríguez Losada, 1996) debido a la fuerte alteración que sufren los materiales datados (Ancochea et al., 1990).

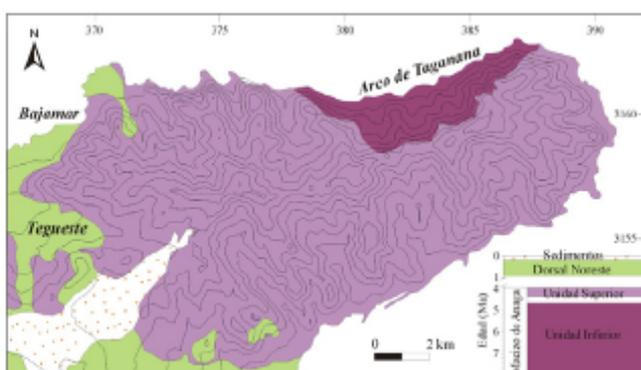


Figura 2. Mapa geológico (simplificado de Guillou et al., 2004) y columna cronoestratigráfica del Macizo de Anaga. Equidistancia entre curvas de nivel 100 m.

Unidad Superior

La Unidad Superior aflora en todo el Macizo de Anaga, a excepción de gran parte del Arco de Taganana (Figura 2) y está formada principalmente por coladas de lava y piroclastos basálticos con intercalaciones en las zonas superiores de coladas fonolíticas. Los depósitos de la Unidad Superior buzando hacia el mar, su polaridad magnética es principalmente inversa (Guillou et al., 2004) y están intruidos por diques de composición variable (basáltica-fonolítica) y pitones fonolíticos (Hernández Pacheco y Rodríguez Losada, 1996; Guillou et al., 2004). La Unidad Superior presenta una edad de 4,39 a 3,95 Ma (Guillou et al., 2004).

Macizo de Teno

Walter y Schmincke (2002) definen en el Macizo de Teno tres unidades limitadas por discordancias basándose en la existencia de dos deslizamientos, en datos radiométricos K/Ar en roca total (Abdel-Monem et al., 1972; Ancochea et al., 1990) y en la densidad de diques que intruyen los depósitos. Posteriormente,

Guillou et al. (2004) cuestionan el uso de diques para definir unidades estratigráficas debido a que en las cercanías de una zona de rift la concentración de diques está condicionada por la distancia al eje de dicho rift. Estos autores argumentan además que la precisión de las dataciones radiométricas K/Ar en roca total son poco precisas y establecen dos unidades estratigráficas basadas en dataciones K/Ar en mineral y en datos de polaridad magnética: Unidad Inferior y Unidad Superior (Figura 3). Esta división estratigráfica coincide con las unidades definidas previamente por Fúster et al. (1968), Carracedo (1979) y Ancochea et al. (1990).

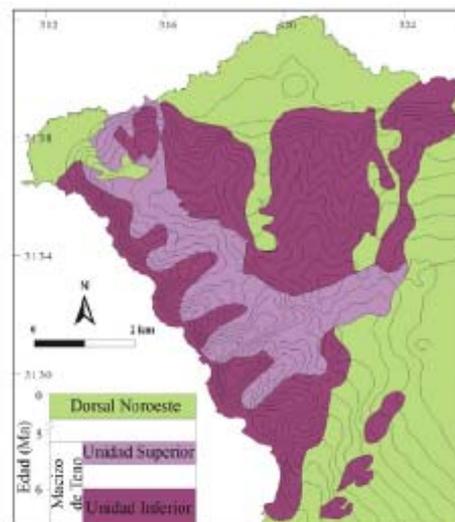
Unidad Inferior

La Unidad Inferior aflora en la zona más elevada del Macizo de Teno y en algunos barrancos profundos (Figura 3.3). Predominan los piroclastos sobre las lavas, ambos de composición máfica. Los depósitos buzanan radialmente hacia el mar unos 20-25° y están densamente intruidos por diques (Fúster et al., 1968; Carracedo, 1975; Ancochea et al., 1990). La polaridad de esta unidad es inversa (Guillou et al., 2004). La edad de la Unidad Inferior se ha estimado por métodos radiométricos entre 6,7 y 5,99 Ma (Abdel-Monem et al., 1972; Ancochea et al., 1990; Thirlwall et al., 2000; Guillou et al., 2004).

Unidad Superior

La Unidad Superior aflora en los flancos suroeste y noreste del macizo (Figura 3) y se dispone discordantemente sobre la Unidad Inferior. En esta Unidad predominan las coladas que buzanan de forma subhorizontal y que presentan polaridad normal (Fúster et al., 1968; Carracedo, 1975; Ancochea et al., 1990). La densidad intrusiva es menor que en la Unidad Inferior (Fúster et al., 1968). Esta Unidad ha sido datada entre 5,54 y 5,15 Ma (Guillou et al., 2004).

Figura 3. Mapa geológico (simplificado de Guillou et al. 2004) y columna cronoestratigráfica del Macizo de Teno. Equidistancia entre curvas de nivel 100 m.



Macizo del Roque del Conde

La litología del macizo del Roque del Conde consiste en un apilamiento de coladas basálticas y traquibasálticas, subhorizontales o buzando menos de 10° hacia el SO y OSO y de 0,5 a 3 m de potencia (Bellido et al., 1978a, 1978b; Fúster et al., 1978). Son comunes las intercalaciones de materiales piroclásticos basálticos muy alterados relacionados con centros de emisión estrombolianos. Toda la serie está intruida por diques. Las dataciones recientes (Thirlwall et al., 2000; Guillou et al., 2004) indican que las rocas que afloran en el Roque del Conde tienen una antigüedad de entre 11,86 y 8,95 Ma (Figura 4).

Guillou et al. (2004) diferencian cuatro magnetozonas (Figura 4). La más antigua, magnetozona N1, tiene polaridad normal, aflora en la zona más profunda del barranco del Infierno y está relacionada con lavas alteradas y densamente intruidas por diques. La magnetozona R1 es de polaridad inversa y aflora en las paredes altas del mismo barranco extendiéndose hacia la parte noreste del macizo. La magnetozona N2, de polaridad normal, constituye la parte central y sur del macizo. Finalmente, en la zona más alta del macizo en el Roque del Conde se observan lavas de polaridad inversa, incluidas en la magnetozona R2.

Dorsal Noreste

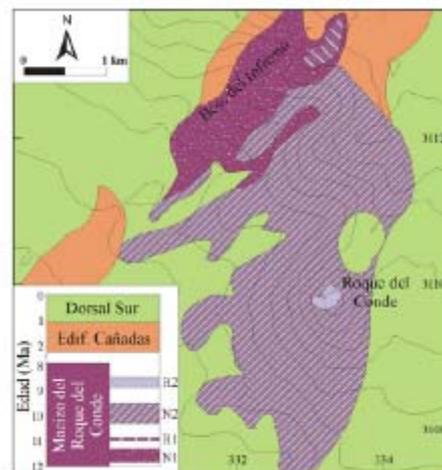
Los productos volcánicos de la Dorsal Noreste cubren una superficie aproximada de 600 Km² (Figura 5) y se observan discordantemente sobre los depósitos del Macizo de Anaga e interestratificados con los productos del Complejo Volcánico Central (Edificio Cañadas y Complejo Teide-Pico Viejo). Se trata principalmente de coladas de lava y piroclastos de caída de composición basáltica alcalina. En el presente trabajo se han revisado las cartografías previas de la Dorsal Noreste (Ancochea et al., 1978a, 1978b, 1978c; Araña et al., 1978a, 1978b, 1978c, 1978d, 1978e; Bellido et al., 1988a; Martín et al., 1984a, 1984b) y se ha realizado una nueva cartografía de la litología de esta dorsal a escala 1:25.000 (Figura 5).

Las unidades estratigráficas de la Dorsal Noreste se han definido siguiendo la sistemática propuesta por la Organización Internacional de Estratigrafía. Se han distinguido tres tipos de unidades: unidades litoestratigráficas, unidades limitadas por discordancias y unidades informales. Las unidades litoestratigráficas se definen en base a las propiedades litológicas de los cuerpos rocosos y sus principales unidades vienen dadas en orden jerárquico por los términos Grupo, Formación, Miembro, etc. Las unidades limitadas por discordancia representan a cuerpos de roca limitados por discontinuidades en la sucesión estratigráfica. Las unidades estratigráficas así definidas se denominan Sintemas.

En la Dorsal Noreste se han definido dos unidades litológicas, Fm. Dorsal Noreste y Fm. Pedro Gil (Figuras 5 y 6), con marcadas diferencias litológicas, composicionales y de estilo eruptivo.

Además de estas dos Formaciones, se han distinguido dos Sintemas, Sintema Gúimar y Sintema Esperanza (Figuras 6 y 7), en base a la existencia de una gran discordancia angular relacionada con la formación del valle de La Orotava. Previamente a este estudio, Hürlimann (1999) diferencia dos unidades dentro de la secuencia estratigráfica de la Dorsal Noreste, separadas por el deslizamiento de La Orotava (Figura 6).

Figura 4. Mapa geológico (simplificado de Guillou et al., 2004) y columna cronoestratigráfica del Macizo del Roque del Conde. N1, R1, N2 y R2: magnetozonas. Equidistancia entre curvas de nivel 100m.



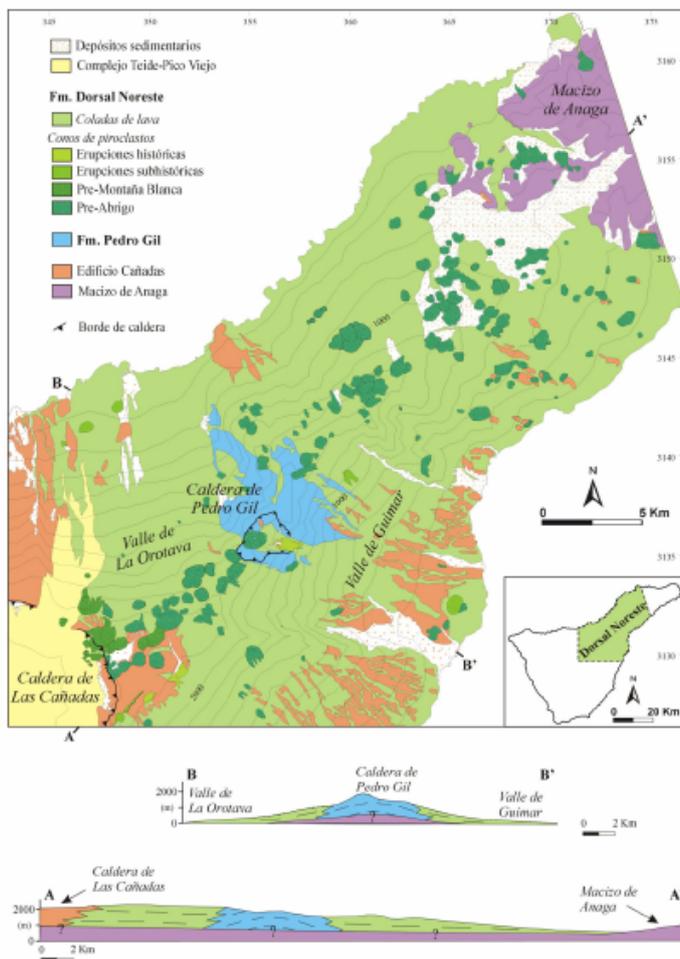


Figura 5. Mapa geológico de las unidades litoestratigráficas y cortes geológicos simplificados de la Dorsal Noreste. Se muestra también la localización del área de estudio.

Hürlimann (1999) no da el rango de Sintemas a estas unidades y las denomina Grupo Pre-Orotava y Grupo Post-Orotava (Figura 6)

Este autor sitúa el límite entre estas dos unidades en los 0,56 Ma (Figura 6). Sin embargo, Galindo (2005) sugiere unos límites para estos Sintemas distintos de los propuestos por Hürlimann (1999). Esto se debe, a que la edad del último deslizamiento ocurrido en La Orotava es más reciente de lo que anteriormente se pensaba.

No se han definido otros Sintemas relacionados con la discordancia asociada al deslizamiento de Güimar debido a que la edad de este deslizamiento no está bien acotada, entre 0,8 y 0,3 Ma (Ancochea et al., 1990; Edgar et al., 2007). Los depósitos que afloran en la zona alta de la pared sur del valle de Güimar están cortados por los deslizamientos de Güimar y de La Orotava por lo que son anteriores al deslizamiento de La Orotava y pueden incluirse en el Sintema Güimar. La edad de los depósitos

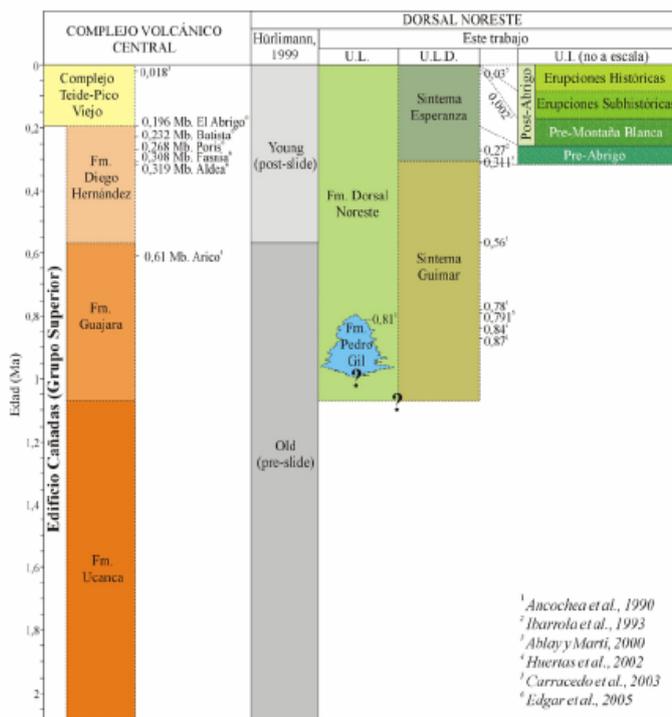


Figura 6. Cuadro cronoestratigráfico de la Dorsal Noreste. Se muestra también el cuadro cronoestratigráfico del Grupo Superior del Edificio Cañadas y del complejo Teide-Pico Viejo. U.L.: Unidades litoestratigráficas; U.L.D.: Unidades limitadas por discordancia; U.I.: Unidades informales

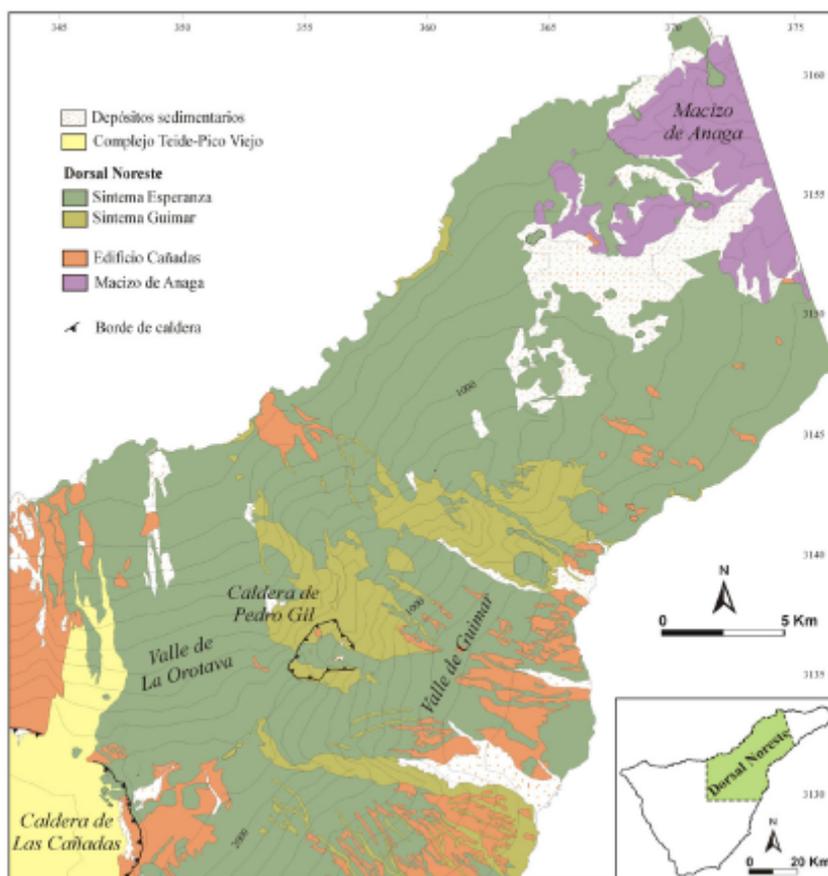


Figura 7. Mapa geológico de las unidades limitadas por discordancia de la Dorsal Noreste. Se muestra también la localización del área de estudio.

más antiguos del relleno del valle de Güímar no está bien acotada y algunos podrían ser anteriores al deslizamiento de La Orotava.

Sin embargo, como los depósitos datados del relleno del valle de Güímar y que afloran en superficie tienen una edad de unos 0,3 Ma han sido incluidos en el Sintema Esperanza. Los conos de piroclastos correspondientes a la Fm. Dorsal Noreste y pertenecientes al Sintema Esperanza han sido asociados a diferentes unidades informales en función de las edades relativas establecidas durante el presente trabajo (Figuras 5 y 6).

Formación Dorsal Noreste

La Fm. Dorsal Noreste aflora a lo largo de la mayor parte de la dorsal, excepto en las paredes y flancos de la caldera de Pedro Gil (Figura 5). Consiste en un apilamiento de coladas de lava generalmente de tipo “aa” con intercalaciones de niveles piroclásticos de caída formados por bombas, lapilli, cenizas y escoria de diverso tamaño. Son rocas de composición máfica, en las que se suelen observar fenocristales de olivino, piroxeno y/o plagioclasas. Las erupciones son predominantemente fisurales y de tipo estromboliano.

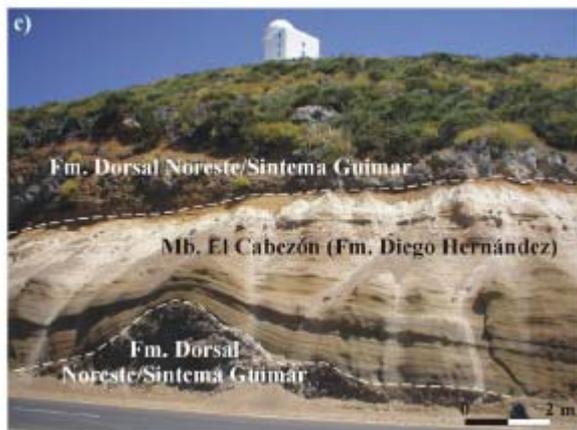


Figura 8. Coladas de lava basáltica de la Fm. Dorsal Noreste (Sintema Güimar) interestratificadas entre: a) depósitos fonolíticos de caída de las Fms. Uanca y Guajara; b) Depósitos piroclásticos de los Mbs. Las Eras y Arico de la Fm. Guajara; c) Piroclastos fonolíticos del Mb. Cabezón (Fm. Diego Hernández) interestratificados entre coladas de lava y, piroclastos de caída de la Fm. Dorsal Noreste (Sintema Güimar).

Se observan algunas coladas de lava de composición fonolítica a techo de la serie cuyos centros eruptivos no han podido ser identificados. La dirección de buzamiento de los depósitos de la Fm. Dorsal Noreste es desde el eje hacia el dorso, con inclinaciones de entre 8 y 25° en el eje y de unos 30° en el dorso. En las paredes y cabeceras de los valles de La Orotava y Güimar se observan numerosos diques que intruyen los depósitos de la Fm. Dorsal Noreste. La edad radiométrica más antigua de esta Formación es de 0,87 Ma (Ancochea et al., 1990).

Las relaciones cronoestratigráficas observadas en el campo indican que las coladas de lava de la Fm. Dorsal Noreste son posteriores a la Fm. Uanca y anteriores y/o sincrónicas a las Fms. Guajara y Diego Hernández (Figura 8). Los depósitos más recientes de la Fm. Dorsal Noreste son los correspondientes a la erupción histórica de Arafo, ocurrida en el año 1705 (Figura 9 d).

Formación Pedro Gil

Los materiales de la Fm. Pedro Gil afloran en la parte central del eje de la Dorsal Noreste, en la cabecera del valle de Güímar y en la ladera este y parte de la cabecera del valle de La Orotava (Figura 5). Esta Formación es sincrónica con parte de la Fm. Dorsal Noreste (Figura 6). La Fm. Pedro Gil está constituida por el apilamiento de lavas muy fluidas con estructuras cordadas (Figura 9 a) que presentan intercalaciones de depósitos de caída y brechas volcanogénicas y sedimentarias. Las lavas son de composición ankaramítica con grandes fenocristales de piroxeno, que ocasionalmente superan los 10 cm de tamaño (Figura 9 b), y fenocristales de olivino y plagioclasa de menor tamaño. Los niveles de piroclastos de caída intercalados son muy escasos en la base y más abundantes a techo, donde se observan desde niveles de piroclastos de caída tamaño ceniza y lapilli hasta estratos caracterizados por la concentración de bombas. Las brechas predominan en la zona inferior de la secuencia estratigráfica y son principalmente heterométricas y de composición máfica. El origen de estas brechas podría estar relacionado, como propone Hürlimann (1999), con procesos de resedimentación asociados al rápido crecimiento del edificio.

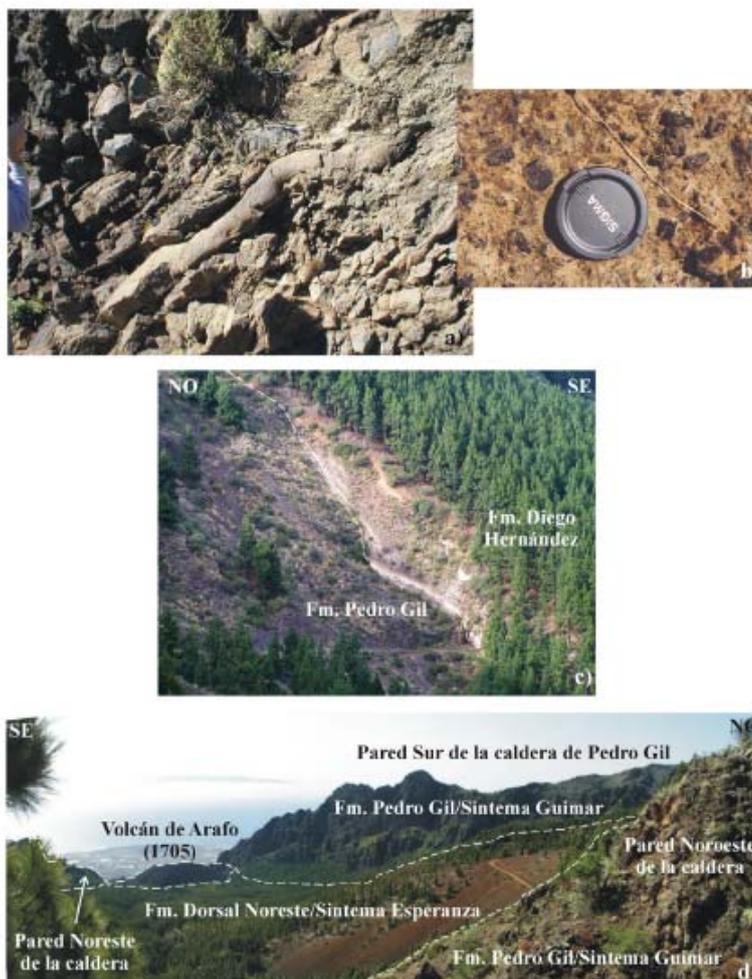


Figura 9. a) Estructura de flujo en lavas cordadas de la Fm. Pedro Gil; b) fenocristales de piroxeno observados en las lavas ankaramíticas de la Fm. Pedro Gil; c) depósitos de la Fm. Diego Hernández discordantes sobre los depósitos de la Fm. Pedro Gil; d) relaciones estratigráficas de la Fm. Pedro Gil (Sintema Güímar) con la Fm. Dorsal Noreste (Sintema Esperanza). En (d) se observa el cono de piroclastos de la erupción histórica de Arafo (1705), localizado en el interior de la caldera de Pedro Gil, y las paredes noreste, noroeste y sur de esta caldera.

Los depósitos de la Fm. Pedro Gil buzan radialmente con respecto al interior de la caldera de Pedro Gil con inclinaciones de entre 16 y 56° hacia el exterior de dicha caldera, indicando una morfología en cúpula (Figura 3.5 A-A', B-B'). Discordantemente sobre los depósitos de la Fm. Pedro Gil se observan piroclastos fonolíticos de caída de la Fm. Diego Hernández (Figura 9 c) y lavas traquibasálticas y fonolíticas de la Fm. Dorsal Noreste (Figura 3.5), incluyendo los productos de la erupción histórica de 1705 del volcán de Arafo (Figura 9 d). La única datación absoluta existente para los depósitos de la Fm. Pedro Gil muestra una edad de 0,81 Ma (Ancochea et al., 1990), que ha sido obtenida en uno de los depósitos estratigráficamente superiores de esta Formación.



Figura 10. Relaciones estratigráficas de los depósitos del Sintema Esperanza: a) discordantes sobre los depósitos del Mb. Cabezón (Fm. Diego Hernández) y del Sintema Güimar; b) intercalados entre depósitos de la Fm. Diego Hernández y depósitos detríticos rellenando el valle de Güimar; c) y d) con intercalaciones de piroclastos de caída fonolíticos de la Fm. Diego Hernández rellenando el valle de la Orotava.



Sintema Güimar

El Sintema Güimar incluye todos los materiales anteriores al deslizamiento de La Orotava. Aflora en las laderas del valle de Güimar, en la cabecera del valle de La Orotava, en el fondo de algunos barrancos profundos y en algunos acantilados (Figura 7). Estos depósitos se observan estratigráficamente sobre

depósitos piroclásticos fonolíticos de caída de la Fm. Ucanca (Figura 8 a) e interestratificados entre las ignimbritas del Mb. Las Eras y el Mb. Arico de la Fm. Guajara (Figura 8 b). En la cabecera del valle de La Orotava se han identificado depósitos fonolíticos interestratificados entre coladas y piroclastos del Sintema Güimar, que corresponden al Mb. Cabezón de la Fm. Diego Hernández (Figura 8 c). La edad del límite inferior del Sintema Güimar es mayor de 0,87 Ma, que es la edad de los depósitos más antiguos de la Fm. Dorsal Noreste (Figura 6). El límite superior del Sintema Güimar viene dado por la edad de los depósitos datados más recientes cortados por el deslizamiento de La Orotava, que son los depósitos fonolíticos del Mb. Cabezón (Fm. Diego Hernández). Estos depósitos no han sido datados directamente, pero ocupan una posición estratigráfica dentro de la Fm. Diego Hernández entre los Mbs. Aldea y Fasnía (Figura 6), datados en 319 y 309 Ka, respectivamente (Edgar et al., 2007). La edad de este Sintema se discute ampliamente en el capítulo siguiente al tratar la edad del valle de La Orotava.

Sintema Esperanza

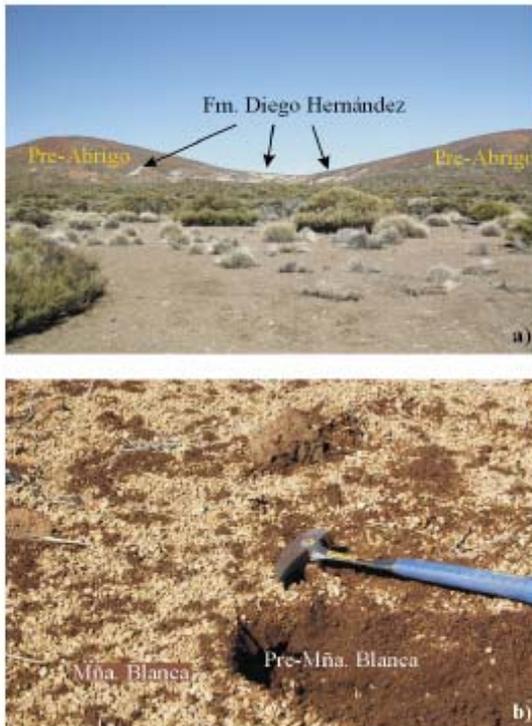
El Sintema Esperanza comprende los depósitos posteriores al deslizamiento de La Orotava (Figura 6). Estos depósitos se extienden desde el eje hacia los dorsos con buzamientos de hasta 30° y rellenan los valles de La Orotava y Güimar (Figuras 7 y 10). El Sintema Esperanza está discordante sobre los depósitos del Sintema Güimar e intercalado entre depósitos de la Fm. Diego Hernández (Edificio Cañadas) posteriores al Mb. Cabezón (Figuras 6 y 10). Los depósitos datados más antiguos que rellenan el valle de La Orotava corresponden al Mb. Fasnía (Edgar, 2003), datados por Edgar et al. (2007) en 309 Ka. Por lo tanto, la edad del Sintema Esperanza se extiende desde los 309 Ka hasta la actualidad.

Unidades Informales

Los depósitos correspondientes a la Fm. Dorsal Noreste y pertenecientes al Sintema Esperanza pueden dividirse en varias unidades informales en función de su posición estratigráfica (Figura 6). Estas unidades han sido definidas en base a las relaciones estratigráficas de los depósitos de la Fm. Dorsal Noreste/Sintema Esperanza con los materiales fonolíticos del Complejo Volcánico Central. En este trabajo se han distinguido dos unidades: Pre-Abrigo y Post-Abrigo (Figura 6).

La Unidad Pre-Abrigo comprende todos los productos volcánicos del Sintema Esperanza que están cubiertos por el Mb. El Abrigo de la Fm. Diego Hernández (Figura 11 a), datado en 196 Ka por Edgar et al. (2007). Esta Unidad incluye todos los materiales de edad posterior a 309 Ka y anterior a 196 Ka (Figura 6). La Unidad Post-Abrigo incluye los depósitos posteriores al Mb. El Abrigo y se subdivide en tres unidades según los depósitos correspondan a erupciones ocurridas previamente a la erupción de Mña. Blanca hace unos 2 Ka (Ablay y Martí, 2000), Pre-Mña. Blanca, a erupciones subhistóricas o a erupciones históricas (Figuras 5 y 6). Los materiales Pre-Mña. Blanca están cubiertos por depósitos fonolíticos de caída emitidos durante la erupción de Mña. Blanca (Figura 11 b). Los depósitos de caída de tres conos piroclásticos (Pre-Mña. Blanca), han sido datados en torno a los 30 Ka (Carracedo et al., 2003). Las erupciones subhistóricas

incluyen todos los productos volcánicos emitidos en la Dorsal Noreste que no están cubiertos por los piroclastos de la erupción de Mña. Blanca y que han ocurrido previamente al periodo histórico en Tenerife. Se localizan en la mitad suroeste del eje de la dorsal y en las zonas costeras de los valles de Güímar y La Orotava (Figura 5).



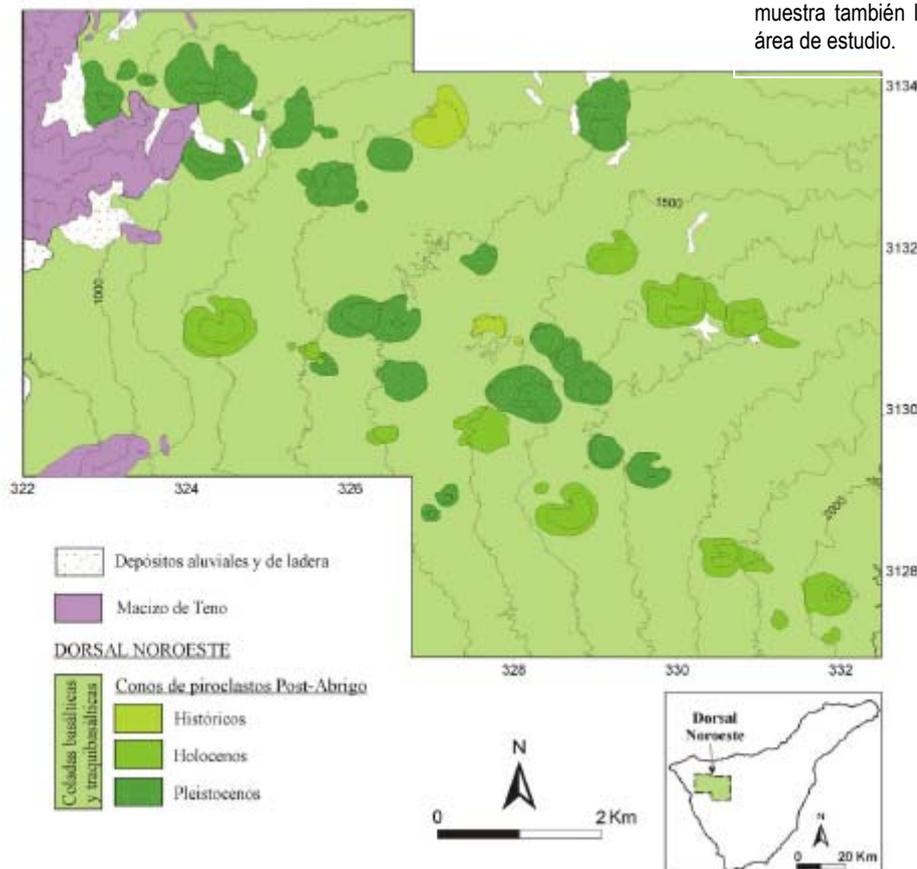
Las erupciones históricas que han ocurrido en la Dorsal Noreste se localizan en el eje y forman parte de una triple erupción ocurrida entre el 31 de diciembre de 1704 y el 24 de febrero de 1705 (Romero, 1990, 1992). Estas erupciones tuvieron lugar a partir de fisuras eruptivas a lo largo de las cuales se formaron conos de piroclastos y se emitieron lavas de composición máfica, principalmente basáltica, que se desplazaron por los flancos de la Dorsal Noreste alcanzando distancias superiores a 8 km. El volumen total emitido y el área total ocupada por los productos de las erupciones históricas ocurridas en la Dorsal Noreste han sido estimados en unos 0,13 Km³ y 5,7 Km², respectivamente (Romero, 1992).

Dorsal Noroeste

La Dorsal Noroeste está formada por coladas de lava y piroclastos de composición máfica que se extienden a lo largo del sector Noroeste de Tenerife ocupando una superficie de unos 225 Km². Estos depósitos se disponen discordantemente sobre parte de los materiales del Macizo Antiguo de Teno (Figura 12), están intercalados con los productos del Edificio Cañadas y parcialmente cubiertos por coladas de lava procedentes del Complejo Teide-Pico Viejo. Con objeto de establecer la edad relativa de los depósitos de la Dorsal Noroeste se ha estudiado en detalle la intercalación de estos depósitos con los del Complejo Central y se ha revisado la cartografía del IGME a escala 1:25.000 (Esnaola et al., 1984; Martín et al., 1984a, 1984b;

Barrera et al., 1988; Bellido et al., 1988a, 1988b). Las unidades estratigráficas de la Dorsal Noroeste han sido definidas en base a las edades de los centros eruptivos establecidas por el IGME y a las relaciones cronoestratigráficas de los materiales de la dorsal con los productos del Complejo Volcánico Central (Figura 12).

Figura 12. Mapa estratigráfico de la Dorsal Noroeste de Tenerife. Se muestra también la localización del área de estudio.



En la Dorsal Noroeste no se han observado diferencias litológicas significativas tal y como ocurre en la Dorsal Noreste. Por esta razón se ha definido una única unidad litológica, la Fm. Dorsal Noroeste (Figura 13), que está formada por productos volcánicos de composición máfica. Se trata principalmente de coladas de lava de tipo "aa" y, ocasionalmente "pahoehoe", y piroclastos de caída de tamaño variable, desde ceniza hasta bloques. La actividad eruptiva que da lugar a los depósitos de esta Formación es de tipo estromboliano y fisural, igual que en la Fm. Dorsal Noreste. La relación estratigráfica de los productos de la Fm. Dorsal Noroeste con los productos del Edificio Cañadas permite distinguir dos unidades informales denominadas Pre-Abrigo y Post-Abrigo en función de su relación estratigráfica con los depósitos del Mb. El Abrigo de la Fm. Diego Hernández (Figura 12), datado en 196 Ka (Edgar et al., 2007).

Los depósitos de la Unidad Pre-Abrigo afloran fuera del área de estudio, donde los depósitos fonolíticos del Mb. El Abrigo se observan discordantes sobre algunos conos de piroclastos como el volcán de Taco (Edgar, 2003). Dentro del área de estudio, los depósitos del Mb. El Abrigo se observan únicamente en un

afloramiento, separando los materiales de la Unidad Pre-Abrigo de los de la Unidad Post-Abrigo (Figura 14 a). En los mapas del IGME se distinguen los depósitos de la Dorsal Noroeste según su edad en base al grado de alteración de los depósitos y a las relaciones estratigráficas entre ellos (Esnaola et al., 1984; Martín et al., 1984a, 1984b; Barrera et al., 1988; Bellido et al., 1988a, 1988b). Esta distinción se ajusta a las observaciones realizadas durante este trabajo, por lo que se han subdividido los depósitos de la Unidad Post-Abrigo en erupciones pleistocenas, holocenas e históricas (Figura 13). Los depósitos correspondientes a erupciones pleistocenas están bastante alterados y muestran suelos bien desarrollados que pueden alcanzar hasta un metro de potencia. En algunos casos estos paleosuelos se observan cubiertos por piroclastos de caída menos alterados procedentes de erupciones holocenas (Figura 14 b).

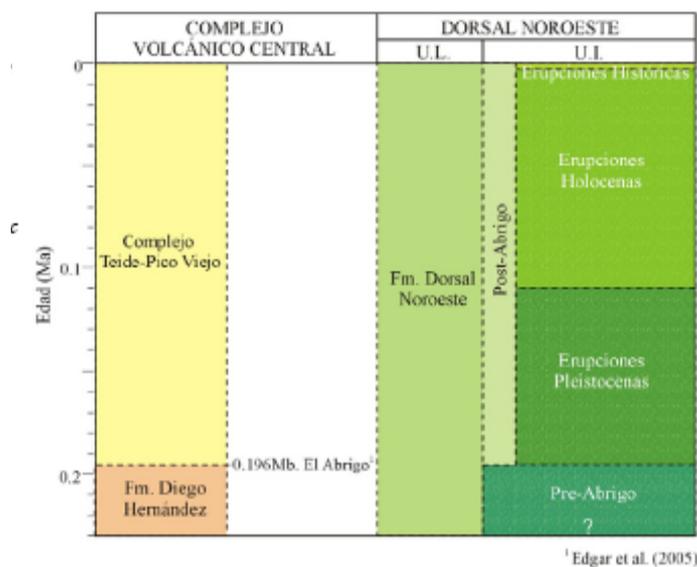
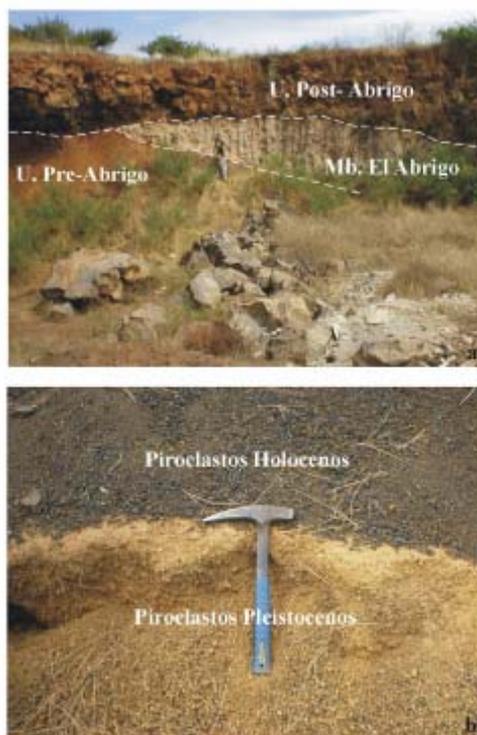


Figura 13. Cuadro cronoestratigráfico de la Dorsal Noroeste. Se muestra también parte del cuadro cronoestratigráfico del Complejo Volcánico Central. U.L.: Unidades litoestratigráficas; U.I.: Unidades informales.

Figura 14. (a) Brecha piroclática del Mb. El Abrigo (Fm. Diego Hernández, Edificio Cañadas) interestratificada entre depósitos máficos de la Dorsal Noroeste; (b) detalle del contacto entre los depósitos de caída máficos de edad Pleistocena y Holocena.

Las erupciones históricas ocurridas en la Dorsal Noroeste están localizadas en el eje de esta dorsal (Figura 12) y dieron lugar a los volcanes de Garachico en 1706 y Chinyero en 1909 (Romero, 1990 y 1992). Se trata, al igual que en la Dorsal Noreste, de erupciones fisurales con estilo eruptivo de tipo estromboliano. Los productos de estas erupciones son coladas de lava y piroclastos de caída de composición máfica. La erupción de Garachico se prolongó durante 40 días y, durante la misma, se emitieron aproximadamente 0,05 Km³ de magma, que cubrieron una superficie de casi 6,9 Km² (Romero, 1992). La última erupción ocurrida en Tenerife fue la del volcán Chinyero. Esta erupción duró 10 días, emitiendo



aproximadamente 0,02 Km³ de material magmático y cubriendo más de 2,3 Km² de superficie (Romero, 1992).

Dorsal Sur

Los productos de la Dorsal Sur cubren una superficie de unos 250 Km² en el sector sur de la isla (Figura 15), se disponen discordantemente sobre los materiales del Macizo Antiguo del Roque del Conde y están interestratificados entre las lavas y piroclastos del Edificio Cañadas. Todos los depósitos de la Dorsal Sur muestran las mismas características litológicas y eruptivas (depósitos máficos emitidos durante erupciones

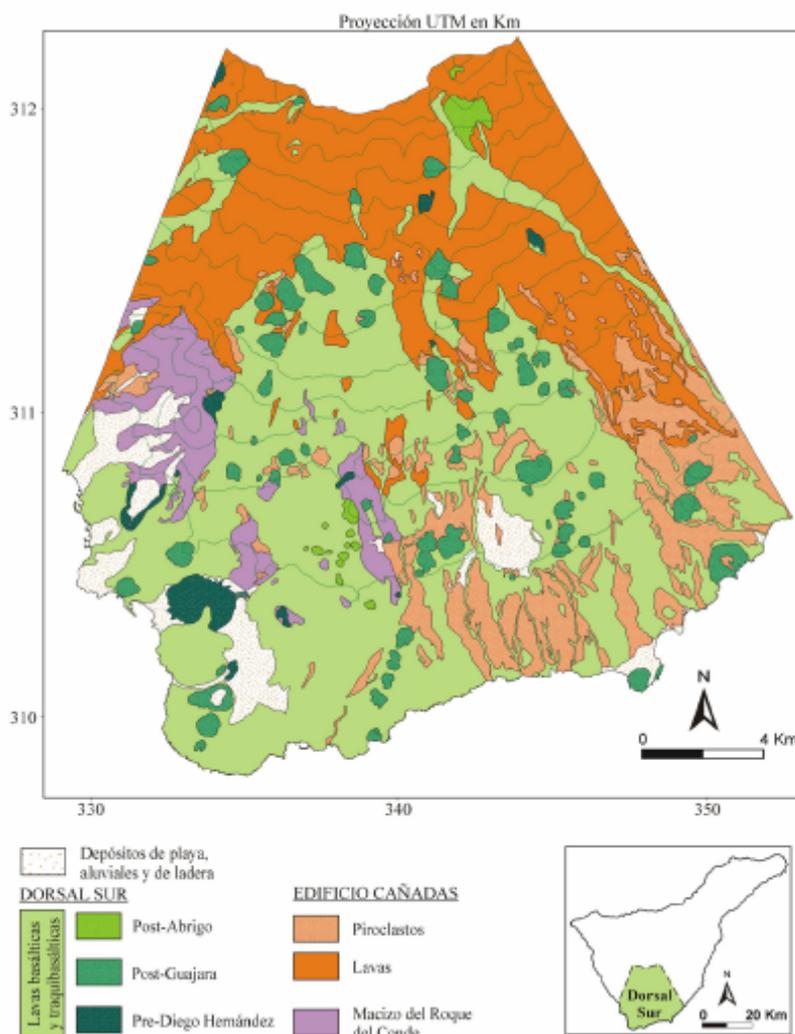


Figura 15. Mapa geológico de la Dorsal Sur de Tenerife. Se muestra también la localización del área de estudio.

estrombolianas) por lo que se han incluido dentro de la unidad litológica denominada Fm. Dorsal Sur (Figura 16). Siguiendo los mismos criterios que en las otras dorsales, se han distinguido además las unidades informales Pre-Abrigo y Post-Abrigo (Figuras 15 y 16).

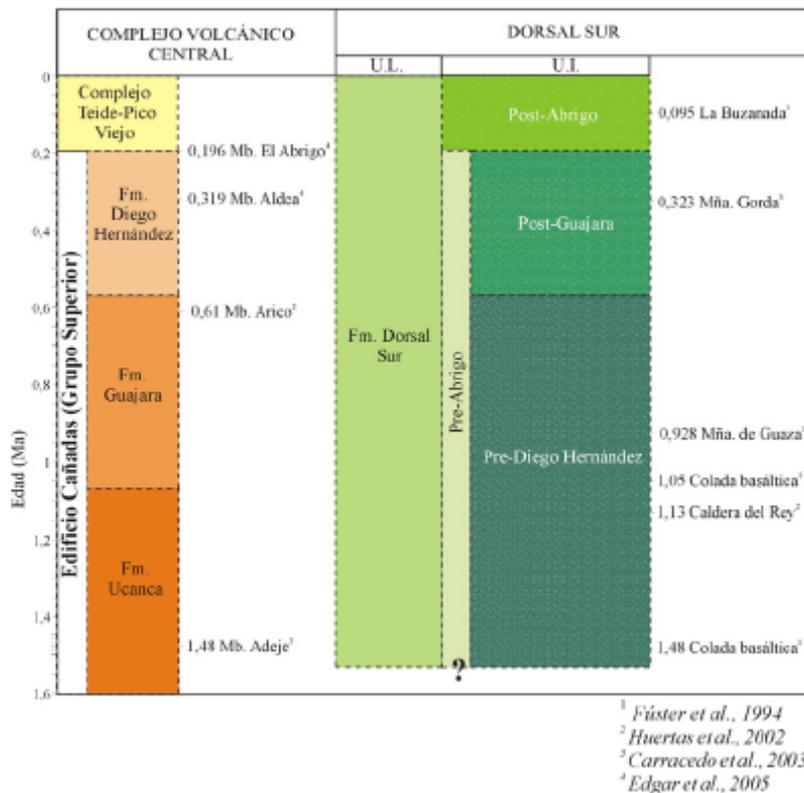


Figura 16. Cuadro cronoestratigráfico de la Dorsal Sur. Se muestra también el cuadro cronoestratigráfico del Grupo Superior del Edificio Cañadas y del Complejo Teide-Pico Viejo. U.L.: Unidades litoestratigráficas; U.I.: Unidades informales.

Los materiales correspondientes a la Unidad Pre-Abrigo cubren la mayor parte de la Dorsal Sur (Figura 15) y son mayoritariamente de composición basáltica o traquibasáltica, aunque existen algunas erupciones de magmas traquítico-fonolíticos como las que originaron la Caldera del Rey y la Mña. de Guaza (Fúster et al., 1994). Dentro de la Unidad Pre-Abrigo se han diferenciado depósitos Pre-Diego Hernández y Post-Guajara (Figura 16).

Los productos Pre-Diego Hernández afloran intercalados entre depósitos de las Fms. Ucanca y Guajara. Un ejemplo de estas relaciones estratigráficas se muestra en la figura 17a, donde se observa una colada traquibasáltica interestratificada entre el Mb. Adeje (Fm. Ucanca) y el Mb. Arico (Fm. Guajara). Algunas de estas coladas y depósitos piroclásticos del Edificio Cañadas han sido datados entre 1,48 y 0,928 Ma (Fúster et al., 1994; Huertas et al., 2002; Carracedo et al., 2003).

Los materiales Post-Guajara son sincrónicos con la Fm. Diego Hernández y se intercalan entre sus productos fonolíticos (Figuras 16 y 17 b, c). La identificación y correlación de los miembros de la Fm. Diego Hernández es muy complicada en algunos casos en los que solo se observan depósitos de caída muy alterados. En otros casos, la correlación ha sido posible y se han identificado depósitos piroclásticos de los Mbs. Aldea (Figura 17 c) y El Abrigo (Edificio Cañadas), datados respectivamente en 319 y 196 Ka (Edgar et al., 2007). Carracedo et al. (2003) datan depósitos de la Fm Dorsal Sur, correspondientes a la Unidad Informal Post-Guajara obteniendo una edad de 323 Ka.

La Unidad Post-Abrigo aflora principalmente en la zona centro-sur de la Dorsal Sur y en el sector noreste de la misma (Figura 15) y sus depósitos se caracterizan por un bajo grado de alteración y erosión y por no estar

cubiertos por depósitos piroclásticos de la Fm. Diego Hernández (Figura 15). El campo volcánico de La Buzanada, localizado en la zona centro-sur de esta dorsal, ha sido datado en 95 Ka (Carracedo et al., 2003). En la Dorsal Sur no se han producido erupciones en tiempos históricos.



Figura 17. a) Colada de lava de la Fm. Dorsal Sur (U. Pre-Diego Hernández) interestratificada entre la ignimbrita de Adeje (Fm. Ucanca) y la ignimbrita de Arico (Fm. Guajara); b) depósitos de caída félsicos de la Fm. Diego Hernández interestratificados entre depósitos de caída máficos de la Fm. Dorsal Sur (U. Post-Guajara); c) ignimbrita del Mb. Aldea (Fm. Diego Hernández) rellenando el cráter de un cono piroclástico de la Fm. Dorsal Sur (U. Post-Guajara).

Edificio Cañadas

El Edificio Cañadas se localiza en la zona central de Tenerife discordantemente sobre los productos del Escudo Basáltico (Coello, 1973; Ancochea et al., 1990). Está parcialmente cubierto por los materiales del Complejo Teide-Pico Viejo y sus productos se intercalan con los productos de las dorsales de la isla. Existen dos divisiones cronoestratigráficas propuestas para el Edificio Cañadas: Martí et al. (1994a) y Ancochea et al. (1995b). Durante el presente trabajo se ha realizado una cartografía litológica y estructural de varios sectores de la pared de la caldera de Las Cañadas a escala 1:5.000 con el fin de estudiar la estructura y el sistema subvolcánico del Edificio Cañadas. Tras esta cartografía se ha optado por utilizar la cronoestratigrafía de Martí et al. (1994a) por ajustarse mejor a las observaciones realizadas y porque esta división cronoestratigráfica está basada en series estratigráficas realizadas a lo largo de la pared y correlacionadas entre ellas.

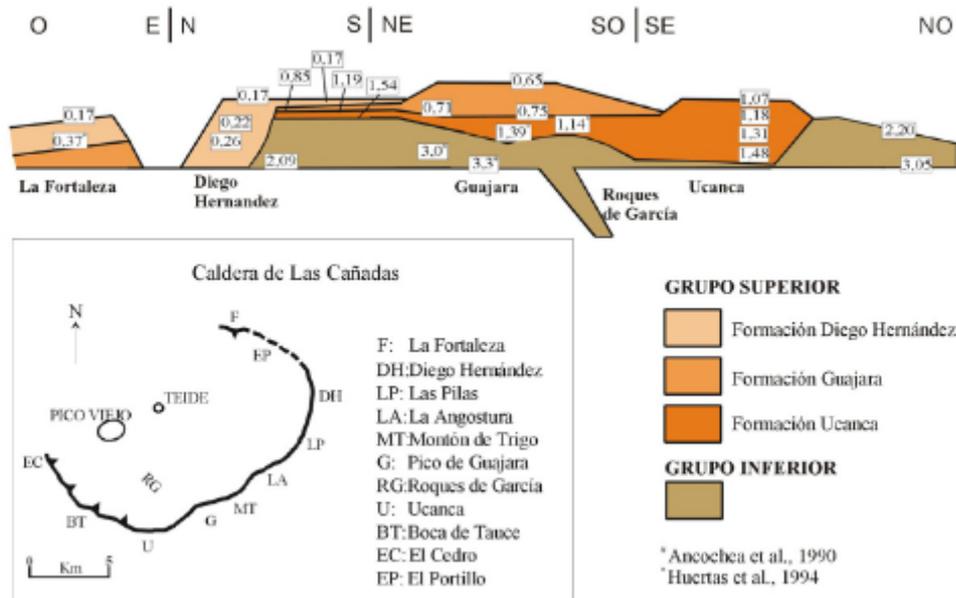


Figura 18. Esquema simplificado de la estratigrafía de la pared de la caldera de Las Cañadas. Según Martí et al. (1994).

Martí et al. (1994a) dividen los depósitos del edificio Cañadas en Grupo Inferior y Grupo Superior (Figuras 18 y 19). El Grupo Inferior aflora discontinuamente a lo largo de la pared de la caldera y en las laderas externas de la misma; en el flanco oeste y en barrancos profundos del flanco sureste. Los depósitos más antiguos del Grupo Inferior han sido datados en 3,3 Ma (Huertas et al., 1994) y los más recientes en 2,1 Ma (Martí et al., 1994a). El Grupo Superior se caracteriza por ciclos de volcanismo explosivo y destrucción parcial del edificio (Martí et al., 1994a), afloran en la parte superior de la pared de la caldera de forma discordante sobre los depósitos del Grupo Inferior y han sido datados entre 1,54 Ma y 196 Ka (Martí et al, 1994; Edgar et al., 2007).

Grupo Inferior

Martí et al. (1994a) subdividen los depósitos del Grupo Inferior en seis secuencias en base a la existencia de paleosuelos y discordancias angulares. De oeste a este de la pared de la caldera afloran las secuencias de El Cedro, Boca de Tauce, Roques de García, Montón de Trigo, Las Angosturas y Las Pilas. Las rocas que constituyen el Grupo Inferior son principalmente lavas basálticas y fonolíticas, con alternancias de rocas piroclásticas. La complejidad estratigráfica de este grupo ha sido atribuida a la existencia de numerosos centros eruptivos solapados y no a un sistema volcánico central (Martí et al., 1994a).

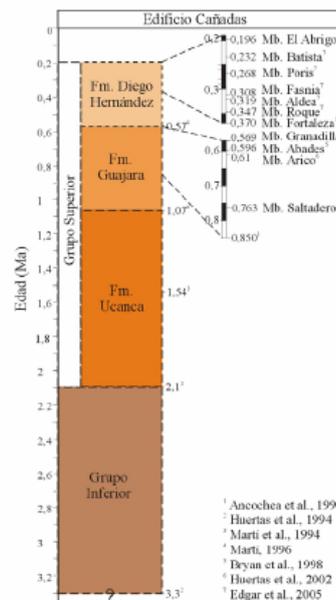


Figura 19. Cuadro cronoestratigráfico del Edificio Cañadas.

Grupo Superior

Dentro del Grupo Superior, Martí et al. (1994a) distinguen tres unidades: Fm. Ucanca, Fm. Guajara y Fm. Diego Hernández (Figuras 18 y 19). Estas tres formaciones están constituidas mayoritariamente por rocas fonolíticas con algunas intercalaciones de coladas basálticas y se relacionan con tres ciclos diferentes de volcanismo fonolítico explosivo (Martí et al., 1994a).

Formación Ucanca

Las rocas de la Fm. Ucanca son las más antiguas del Grupo Superior que afloran en la pared de la caldera con un rango de edad de entre 1,54 y 1,07 Ma (Martí et al., 1994a; Martí, 1996). Los depósitos proximales afloran principalmente en el sector oeste de la pared de la caldera y los distales en los flancos suroeste, sur y norte de la isla (Martí et al., 1994a; Fúster et al., 1994; Huertas et al., 2002; Edgar, 2003). Están representados principalmente por coladas de lava y rocas piroclásticas soldadas y no soldadas en la zona proximal (Martí et al., 1994a) y por ignimbritas no soldadas y depósitos de caída en la zona distal (Fúster et al., 1994; Huertas et al., 2002; Edgar, 2003).

Formación Guajara

Los depósitos de la Fm. Guajara han sido datados entre 0,85 y 0,57 Ma (Martí et al., 1994a; Martí, 1996). Se extienden a lo largo del sector sureste de la pared de la caldera, superpuesto sobre las rocas de la Fm. Ucanca aflorando también en el flanco sureste de la isla y en el Macizo de Tigaiga (Ibarrola et al., 1993; Martí et al., 1994a; Bryan et al., 1998; Bryan et al., 2000; Edgar, 2003). El tipo de depósitos es similar a los de la Fm. Ucanca, predominando los depósitos piroclásticos soldados (Martí et al., 1994a). Se han diferenciado cuatro Miembros dentro de esta Formación: Mb. Saltadero, Mb. Arico, Mb. Abades y Mb. Granadilla (Figura 19) datados respectivamente en 0,763, 0,61, 0,596 y 0,569 Ma (Bryan et al., 2000; Huertas et al., 2002).

Formación Diego Hernández

La edad de los depósitos de la Fm. Diego Hernández se extiende desde los 370 Ka (Ancochea et al., 1990) hasta los 196 Ka (Edgar et al., 2007). Su afloramiento en la pared de la caldera está restringido al extremo este de la caldera, pero sus depósitos distales cubren gran parte de la isla. La litología de esta formación consiste principalmente en ignimbritas no soldadas y depósitos de caída (Martí et al., 1990, 1994a). Edgar (2003) estudia en detalle los depósitos distales de esta Formación distinguiendo hasta 22 miembros de los cuales 7 han sido datados (Figura 19): Mb. Fortaleza en 0,37 Ma, Mb. Roque en 0,347 Ma, Mb. Aldea en 0,319 Ma, Mb. Fasnía en 0,309 Ma, Mb. París en 0,268 Ma, Mb. Batista en 0,234 Ma y Mb. El Abrigo en 0,196 Ma (Ancochea et al., 1990; Edgar et al., 2007).

Complejo Teide – Pico Viejo

En el Complejo Teide-Pico Viejo predominan los depósitos intermedios, mientras que en los conos satélite distribuidos a lo largo de sus flancos predominan los depósitos fonolíticos, que cubren la mayor parte de la

zona central y este de la caldera de Las Cañadas (Ablay y Martí, 2000). La cartografía geológica más reciente de los depósitos del Complejo Teide-Pico Viejo es la realizada por Ablay y Martí (2000), que está basada en datos volcanológicos, petrológicos y en las relaciones de corte observadas en el campo. Las unidades estratigráficas definidas por estos autores incluyen una sola formación, la Fm. Teide-Pico Viejo, subdividida en varios miembros y submiembros. La edad de los productos de la Fm. Teide-Pico Viejo es anterior a 18 Ka (Ablay y Martí, 2000; Carracedo et al., 2003), habiendo ocurrido la última erupción en 1798 en el flanco suroeste de Pico Viejo (Romero, 1990, 1992).

Conclusiones

El presente estudio estratigráfico y cronológico de las series volcánicas de Tenerife ha permitido definir nuevas unidades estratigráficas para las dorsales de Tenerife siguiendo la sistemática propuesta por la Organización Internacional de Estratigrafía. Las Dorsales Noroeste y Sur no presentan diferencias litológicas significativas por lo que se ha definido una única unidad litológica para cada una de ellas denominadas Fm. Dorsal Noroeste y Fm. Dorsal Sur, respectivamente (Figura 20). En la Dorsal Noreste, por el contrario, se ha identificado un edificio volcánico en la zona del eje con forma de cúpula y con una litología bien diferenciada de la del resto de esta dorsal. Por esta razón se han definido dos unidades litoestratigráficas: Fm. Dorsal Noreste y Fm. Pedro Gil (Figura 20). Además, en esta dorsal se han diferenciado en base a la existencia de una discordancia de gran escala que afecta a gran parte de la Dorsal Noreste y que corresponde al deslizamiento de La Orotava, dos unidades limitadas por discordancia: Sintema Güímar y Sintema Esperanza (Figura 20). Un conocimiento más detallado de la estratigrafía y cronología del valle de Güímar podría permitir definir en el futuro nuevos Sintemas con respecto a la discordancia asociada al deslizamiento que originó el valle de Güímar.

La revisión exhaustiva de nuevos afloramientos ha dado lugar a la identificación de numerosos depósitos piroclásticos fonolíticos procedentes del Complejo Volcánico Central interestratificados entre los productos volcánicos de las dorsales. Muchos de estos depósitos, datados previamente por otros autores, han sido de gran utilidad para acotar la edad relativa de las dorsales. Los depósitos más antiguos corresponden a la Dorsal Sur, donde se registra actividad volcánica desde hace más de 1,5 Ma, coincidiendo en el tiempo con la zona superior de la Fm. Ucanca del Grupo Superior (Figura 20). En la Dorsal Noreste los depósitos más antiguos observados son posteriores a la Fm. Ucanca y más antiguos de 0,87 Ma (Figura 20). En relación con las otras dos dorsales, la Dorsal Noroeste es la más reciente, ya que los materiales más antiguos observados en ella son sincrónicos con la parte superior de la Fm. Diego Hernández del Grupo Superior (Figura 20).

Las nuevas unidades estratigráficas definidas han sido incluidas en el cuadro cronoestratigráfico de Tenerife (Figura 20). Se observa que existe un hiato entre los materiales de las Series Basálticas Antiguas y los productos de las dorsales. Sin embargo, esto puede deberse a la falta de dataciones o a que los materiales

más antiguos de las dorsales están cubiertos por depósitos posteriores. Futuros trabajos geocronológicos y estratigráficos podrían realizarse en las dorsales de Tenerife para acotar con más precisión su periodo de actividad. Además, sería recomendable establecer una sistemática común para la definición de nuevas

unidades estratigráficas y la integración de otras unidades ya descritas en trabajos anteriores.

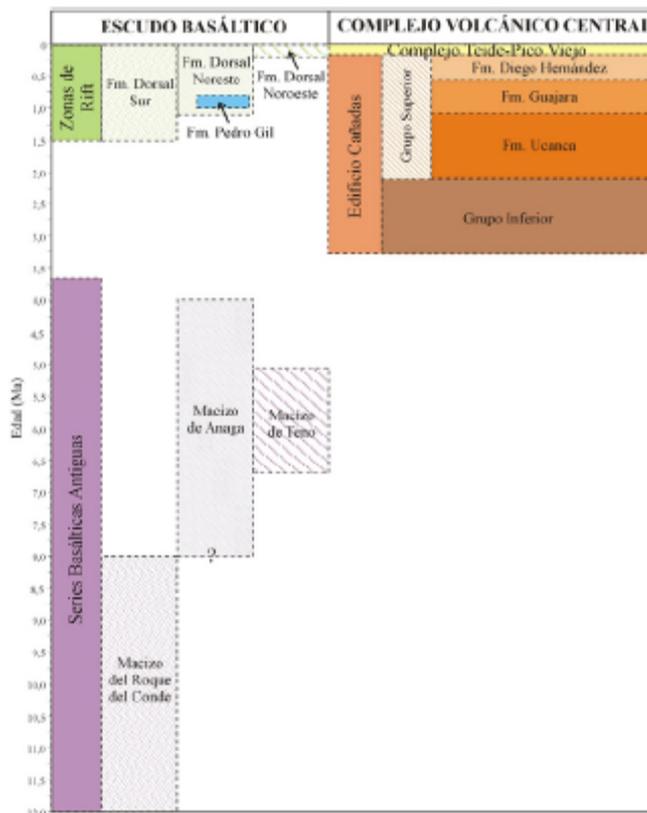


Figura 20. Cuadro cronostratigráfico de Tenerife.

El análisis de la peligrosidad volcánica

El objetivo principal del presente proyecto es la realización de una cartografía de peligrosidad volcánica para la isla de Tenerife, a escala 1:25.000. Este objetivo ha requerido la realización de las siguientes tareas:

- Identificación de los estilos eruptivos y fenómenos asociados que pueden tener lugar en la isla y caracterización de los mismos.
- Evaluación de cada uno de los factores que intervienen en la peligrosidad volcánica: periodos de retorno, probabilidades de ocurrencia espacial, etc.
- Desarrollo de una metodología para la evaluación de la peligrosidad volcánica que considere todas las variables implicadas en la misma y las características específicas de la isla.
- Diseño y desarrollo de los métodos y herramientas necesarios para llevar a cabo el cálculo de la peligrosidad sobre la base de los datos recopilados.
- Generación de la cartografía de peligrosidad de síntesis para la isla de Tenerife y de la memoria técnica asociada a la misma.

El objeto último del presente proyecto es el de superar todas las limitaciones que presentan los estudios realizados hasta la fecha (y que se han identificado en el capítulo anterior), aprovechando los aspectos más adecuados de cada uno de ellos e integrándolos convenientemente. Se han aplicado técnicas de última generación que combinan los Sistemas de Información Geográfica con la simulación de eventos eruptivos, con el objeto de generar una base cartográfica fácilmente integrable con otras fuentes de información, dinámica y en la que la trazabilidad de los procedimientos utilizados permite identificar fácilmente las posibles fuentes de error.

Riesgo y Peligrosidad Volcánicos

La naturaleza y el impacto potencial de un peligro natural como el volcanismo dependen de la relación que existe entre éste y la población o los bienes que se encuentran expuestos al mismo. Por tanto las consecuencias de una erupción volcánica dependen en primer lugar de los fenómenos físicos que se desarrollan durante la misma (ej. coladas piroclásticas, caída de cenizas) y de la magnitud y distribución que éstos alcanzan (*peligrosidad*) y en segundo lugar de la *vulnerabilidad* de las personas y los bienes frente a estos fenómenos. Es decir, el concepto de riesgo está inherentemente relacionado con el de habitación u ocupación humana. Por lo que en aquellas zonas del planeta donde no existan asentamientos o

infraestructuras, aunque el potencial destructivo de los volcanes sea importante, no habrá riesgo, aunque sí peligrosidad.

Aunque conceptualmente resulta simple entender cuáles son los componentes del riesgo, a efectos prácticos su estimación resulta bastante compleja, porque en sentido estricto el riesgo representa la *probabilidad de pérdida debida a la ocurrencia de un fenómeno volcánico en un intervalo de tiempo determinado*, es decir requiere la realización de un estudio de tipo estadístico. Y siendo el riesgo función de los valores que la peligrosidad y la vulnerabilidad adquieran en el área de trabajo (considerando que el valor expuesto se mantiene constante), esto significa que ambos también se expresan en términos probabilísticos. La peligrosidad entonces se entiende como la *probabilidad de que un área se vea afectada por los productos del fenómeno volcánico considerado en un intervalo de tiempo dado*, mientras que la vulnerabilidad se entiende como la *probabilidad de daño derivada de los efectos de ese fenómeno en el intervalo de tiempo considerado*.

Hay una serie de preceptos básicos que se deben de aplicar en la evaluación y análisis de la peligrosidad y el riesgo volcánicos si queremos que los resultados que se obtengan en los estudios se ajusten verdaderamente a estos conceptos:

- Por definición, el estudio de la peligrosidad y el riesgo concierne a un único fenómeno. Actualmente no hay procedimientos lo suficientemente sofisticados como para analizar más de un fenómeno en conjunto y mucho menos representarlos de forma adecuada, debido a la variedad de escalas espaciales y temporales en los que éstos tienen lugar. Sin embargo, en la actualidad existen ya comisiones internacionales que se están ocupando de poner en marcha iniciativas dedicadas a proponer soluciones específicas para este problema.
- Los estudios de peligrosidad y riesgo tienen como objetivo establecer el comportamiento de un fenómeno a medio o largo plazo, con lo que el intervalo de tiempo que esto suponga variará dependiendo del fenómeno considerado y sus características.
- El resultado de un análisis debe incorporar y representar todos los escenarios posibles que puedan tener lugar en la zona de trabajo en el intervalo de tiempo considerado y reproducir de la forma más fidedigna posible el comportamiento del fenómeno considerado.

Cartografía de Peligrosidad Volcánica

La descripción de la amenaza volcánica o el peligro derivado de las erupciones volcánicas se ha venido realizando desde tiempos históricos (ej. Plinio el Joven describiendo la erupción del Vesuvio en el 79 dC. o

tantas otras crónicas históricas) y son frecuentes las cartografías antiguas que recogen los efectos y el recorrido de los productos de las erupciones volcánicas.

A principios del siglo XX se realizaron ya las primeras cartografías de peligrosidad volcánica (como por ej. en Indonesia donde los primeros mapas publicados datan de los años 20 y 30) y las referencias en la literatura son cada vez más frecuentes a medida que nos acercamos a la actualidad. Sin embargo, en las últimas tres décadas evoluciona exponencialmente el nivel de conocimientos volcanológicos, lo que unido al desarrollo de la informática y de las nuevas tecnologías ha facilitado la introducción de nuevas técnicas para llevar a cabo el estudio de la peligrosidad.

Por lo que se refiere a la generación de cartografía de peligrosidad, el tipo de estudios más frecuente y de menor complejidad está dedicado a la generación de escenarios de peligrosidad. La cartografía de escenarios supone una primera aproximación a la evaluación de la peligrosidad que se hace necesaria en aquellas áreas en las que se carece de información suficiente sobre la probabilidad de recurrencia y la magnitud de los eventos que pudieran tener lugar en el futuro. Se basa en la selección de uno o más eventos característicos en función del criterio que se quiera representar en los mapas (ej. máxima magnitud, erupción más reciente, más frecuente) y su reproducción mediante la utilización de la información geológica disponible, de modelos físicos de simulación o de la reconstrucción a partir de datos empíricos (figura 21). Hoy en día es frecuente que los resultados obtenidos se integren en un marco geográfico general de referencia mediante la utilización de herramientas como los GIS.

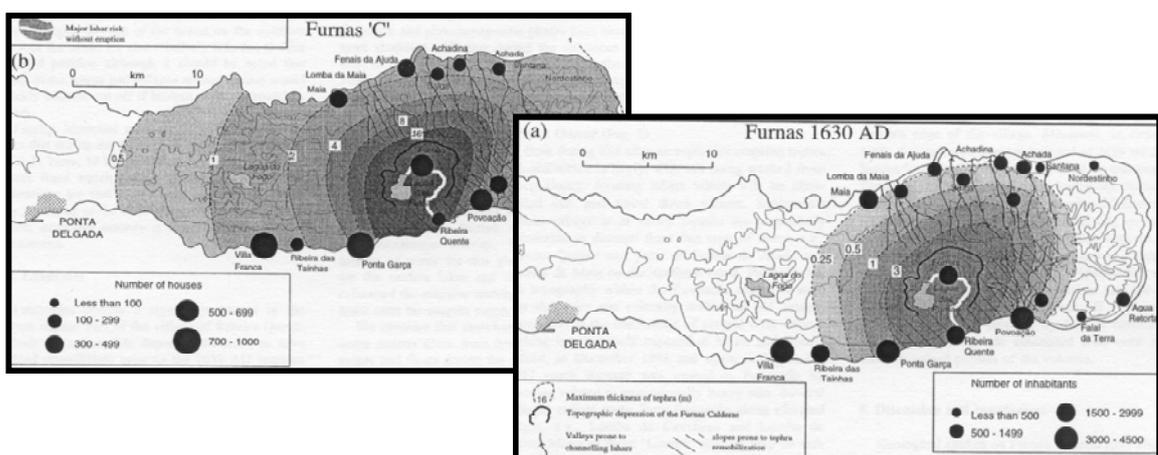


Figura 21. Distribución de los productos resultantes de la reproducción de dos de los escenarios eruptivos que se consideran más probables en futuras erupciones del Furnas (Azores, Portugal). En la parte superior reproducción del evento explosivo que tuvo lugar durante la erupción de 1630 y en el inferior de un evento denominado Furnas "C", extraído a partir del estudio del registro geológico (Cole et al, 1999).

Con este tipo de estudios generalmente se obtiene sólo una primera aproximación al problema de la peligrosidad volcánica de la zona, pero con ellos se sienta una primera base sobre la que definir los objetivos para los trabajos futuros que permitan realizar estudios más sofisticados de peligrosidad. Proporcionan

además una herramienta útil para obtener información sobre los posibles efectos que eventos de particular relevancia tendrían en la zona de trabajo si se repitiesen en nuestros días.

En un nivel de complejidad superior se encuentran aquellos estudios que utilizan aproximaciones estadísticas al estudio de la peligrosidad analizando los depósitos de eventos del registro histórico y geológico, para generar zonificaciones de peligros.

Hoy en día, los estudios de zonificación de peligros aplican comúnmente los recursos que aporta la simulación numérica de erupciones para identificar aquellas áreas que podrían verse afectadas por los productos de una erupción específica (figura 22), en las condiciones actuales de propagación de productos. Es decir, para identificar el área de dispersión se mantiene constante el escenario eruptivo (condiciones intrínsecas), pero varían los factores externos de dispersión (ej. régimen de vientos). La simulación se lleva a cabo aplicando algoritmos de Monte Carlo.

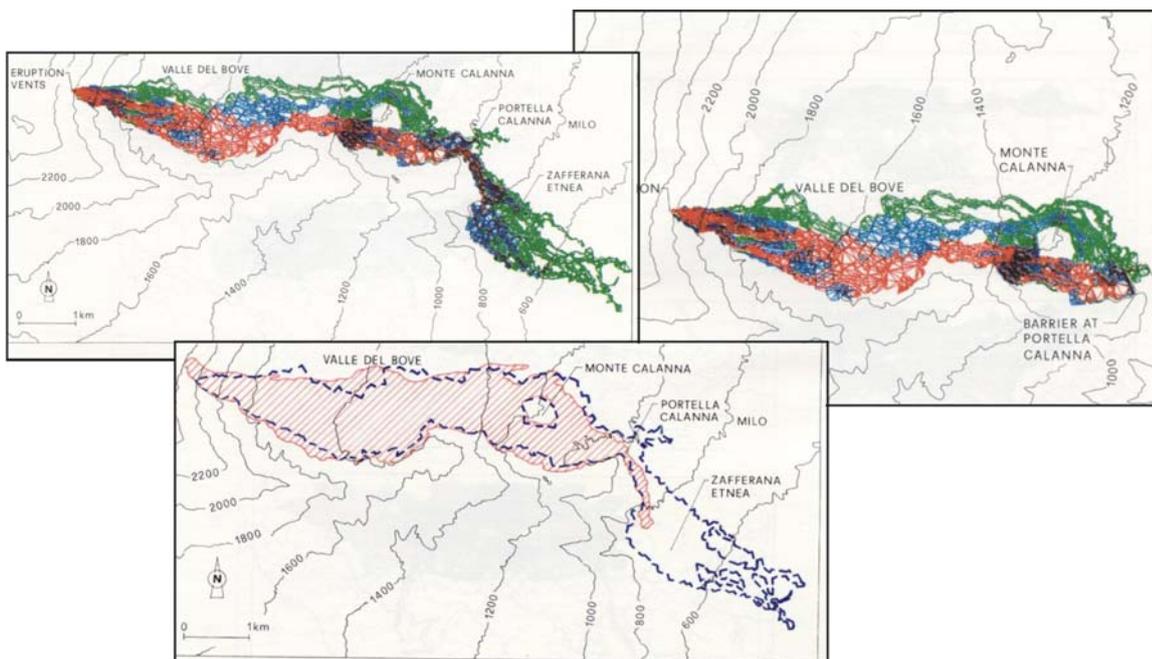


Figura 22. Arriba a la izquierda, simulación del recorrido probable de las coladas de lava en el Valle del Bove, ejecutada en diciembre de 1991 para la erupción del Etna de 1991-93. El color rojo indica alta probabilidad, el azul intermedia y el verde baja probabilidad. A la derecha, simulación del recorrido probable de las coladas si se situase una barrera de 20 metros de altura en Porta Calanna. Debajo, comparación entre el recorrido predicho y los datos de campo, sombreados en rojo (Dobran & Macedonio, 1992).

Mediante la aplicación de los métodos de simulación por Monte Carlo se obtiene como resultado un mapa de zonificación de peligros específico que se denomina mapa de susceptibilidad. Sin embargo, es frecuente que los mapas obtenidos por estos medios se denominen erróneamente “mapas de peligrosidad” en la literatura volcanológica, ya que lo que representan no es la peligrosidad en sentido estricto, sino la probabilidad de invasión o distribución de los productos de un evento o escenario específico, en el que se

han preestablecido las hipótesis que determinan el comportamiento del fenómeno que se estudia, por lo que no se tiene en cuenta la variabilidad que éste pueda experimentar a lo largo del espacio ni del tiempo.

Gráficamente, si se hace una aproximación geométrica a lo que representan el mapa de peligrosidad y el de susceptibilidad, se puede entender que la totalidad de escenarios eruptivos del primero se encuentra representada por un cubo en el que los vértices vendrán determinados por el rango de valores de cada una de las variables que intervienen en el cálculo. En contraste, los escenarios que se utilizan para generar un mapa de susceptibilidad representan tan sólo un plano dentro de este cubo. Esta diferencia entre ambos mapas es muy importante, puesto que queda claro que los resultados que proporcionan no son comparables, ni se puede convertir uno en el otro debido a que para generar cada uno de ellos se aplican hipótesis de partida, planteamientos y métodos de análisis diversos.

Los mapas de susceptibilidad presentan por tanto limitaciones para el estudio de la peligrosidad, aunque sí han demostrado su utilidad para el apoyo en la toma de decisiones en el transcurso de crisis volcánicas o para identificar aquellas zonas que pueden ser más vulnerables frente a la invasión de los productos (Gómez Fernández, 2000b), con lo que aportan una información complementaria a la que se obtiene por los métodos convencionales de cartografía de escenarios.

A pesar de los esfuerzos dedicados a analizar los fenómenos volcánicos en las últimas décadas, hasta la fecha no se dispone de mapas de peligrosidad publicados para ninguna región volcánica activa a pesar de que, como se ha visto, existe una base metodológica suficiente para llevar a cabo este tipo de estudios, la cual se ha aplicado ya ampliamente para analizar otros peligros naturales. El motivo fundamental que ha dado lugar a esta situación es la complejidad que reviste el análisis del fenómeno volcánico en comparación con otros peligros y la escasez de datos de que se dispone en muchas ocasiones, lo que dificulta la construcción de los modelos de datos.

Alternativas metodológicas al estudio de la peligrosidad volcánica

Son numerosas las formulaciones existentes que hoy en día se pueden encontrar como propuestas para llevar a cabo el análisis y la evaluación de la peligrosidad, dependiendo su selección principalmente del enfoque que se desee aplicar, el volumen de datos e información disponible sobre los fenómenos a analizar, la tipología de los mismos y el uso al que se destinen los resultados. Por este motivo, se hace necesario establecer un planteamiento que se adapte a las circunstancias específicas del área objeto de estudio con anterioridad a la realización de cualquier análisis.

En la actualidad se han propuesto dos metodologías complementarias para estudiar la peligrosidad. Por una parte Newhall & Hobblit (2002) han propuesto recientemente una metodología basada en la utilización de

árboles de probabilidad desarrollada sobre la experiencia adquirida durante crisis volcánicas. Y por otra parte, existe una línea de trabajo dedicada al desarrollo de una metodología para generar cartografía cuantitativa de peligrosidad (Gómez-Fernández, 1997, 1998, 2000a). Es esta segunda línea de trabajo la que se ha aplicado para el desarrollo de la Cartografía de Peligrosidad Volcánica de Tenerife.

Hoy en día, el análisis probabilístico se basa principalmente en la aplicación de un tipo específico de técnicas de simulación numérica que se denominan algoritmos de Monte Carlo, que tienen como objeto determinar las distribuciones de frecuencia y severidad de los eventos que pueden tener lugar en un área para un intervalo de tiempo determinado (figura 23).

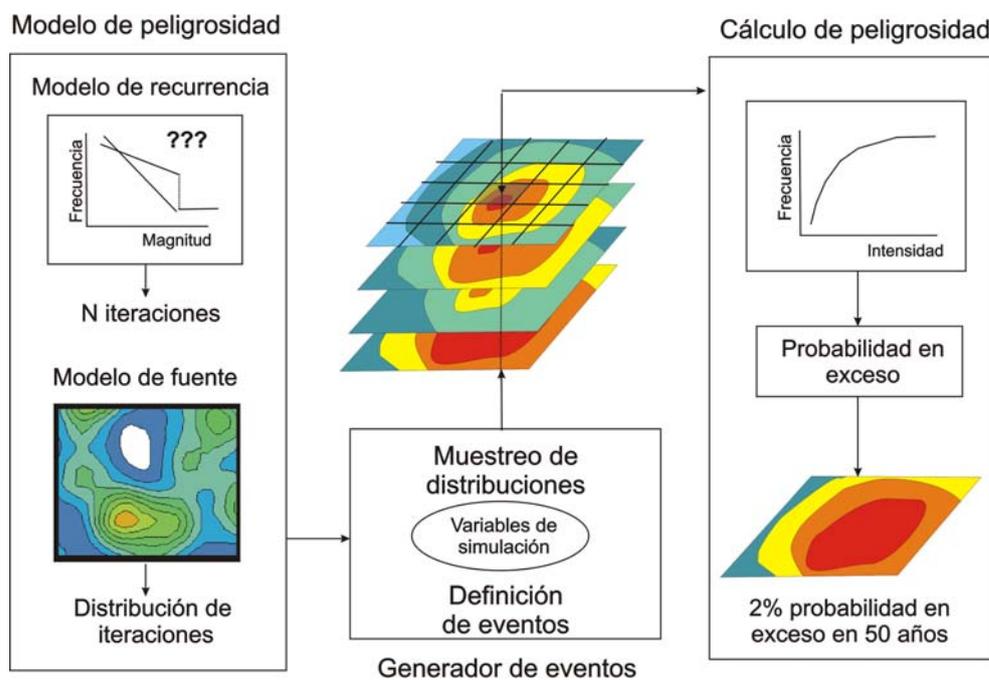


Figura 23. Representación esquemática de las variables y los procedimientos que intervienen en el cálculo de la peligrosidad volcánica. Mediante la aplicación de técnicas de simulación de Monte Carlo se lleva a cabo un número preestablecido de simulaciones, cada una de las cuales representa un posible escenario eruptivo futuro. Cada escenario se define en función del rango de valores que presentan las variables que definen el fenómeno eruptivo estudiado. La peligrosidad se obtiene analizando la distribución de intensidades que presenta el fenómeno en cada punto, con lo que se obtiene la I que cabe esperar que alcance el fenómeno en el periodo de retorno que analiza el estudio y con un porcentaje específico de fiabilidad (Gómez-Fernández, en prep.).

Las técnicas de simulación por Monte Carlo surgen en los años 40 en el marco del proyecto Manhattan (bomba atómica) y sus primeras aplicaciones en áreas distintas a la financiera no se realizaron hasta principios de los años 70, cuando la Environment Protection Agency (USA), las incorporó para desarrollar estudios relacionados con los riesgos para la salud (epidemias, control de plagas). El estado del arte en lo que se refiere a simulación y construcción de modelos de análisis de la peligrosidad en riesgos naturales se recoge en el libro de Woo (1999), que constituye la referencia más aplicada en estos estudios, incluidos los volcanológicos (véase Newhall & Hobblit, 2002).

Los modelos basados en simulaciones de Monte Carlo intentan reproducir el comportamiento del fenómeno que nos ocupa a lo largo del tiempo, muestreando las variables que lo definen de forma aleatoria un número muy elevado de veces (*iteraciones*), cada una de las cuales representaría en el caso del volcanismo, un posible escenario eruptivo.

La evaluación probabilística de la peligrosidad volcánica se ha enfrentado hasta ahora con muchas dificultades, debido a la escasez de datos de que se dispone en muchas áreas y a la falta de procedimientos automáticos para la generación de eventos (simuladores). El presente estudio pretende superar estas dificultades mediante la construcción de un simulador de eventos que sea capaz de generar el elevado número de escenarios necesarios para generar la cartografía de peligrosidad de Tenerife. El alcance de los resultados depende en cualquier caso del volumen y calidad de los datos de que se dispone para la realización del estudio.

Marco de elaboración de la cartografía de peligrosidad

Como se ha visto en los apartados anteriores, la realidad geológica de la isla de Tenerife la hace especialmente vulnerable a la ocurrencia de erupciones volcánicas. La isla se caracteriza por la coexistencia a lo largo de su evolución de dos estructuras volcánicas a lo largo del tiempo y del espacio: un complejo volcánico central y un sistema de rifts. Esta naturaleza compleja da lugar a que el rango de fenómenos que pueden tener lugar a lo largo del tiempo sea muy variado: desde erupciones efusivas básicas a volcanismo de tipo central con erupciones de tipo efusivo, sub-pliniano, pliniano, erupciones freatomagmáticas, etc.

De la gran variedad de escenarios posibles, se acepta de manera generalizada que la actividad efusiva básica es la que tiene un mayor grado de probabilidad de tener lugar en el futuro inmediato, si se tienen en cuenta la evolución reciente de la isla y la tipología asociada al volcanismo histórico a lo largo del archipiélago. Por ello, la atención del cálculo de la peligrosidad se ha centrado en principio en la determinación de aquellas zonas que podrían llegar a verse afectadas por la ocurrencia de dicho tipo de eventos y de los fenómenos asociados (fundamentalmente coladas lávicas y piroclastos de caída y de proyección balística). Existe también una proporción importante de eventos efusivos asociados al volcanismo central relacionados con la construcción del complejo Teide – Pico Viejo, por lo que no se debe descartar la posibilidad de que se repitan eventos similares en el futuro, pese a que no hayan tenido lugar en la historia reciente de la isla.

Por tanto, las erupciones de tipo efusivo han tenido lugar tanto en relación con el volcanismo de tipo monogenético, de composición básica a intermedia, como al volcanismo central, con composiciones predominantemente ácidas. Las características de los eventos efusivos asociados con cada una de estas dos tipologías dominantes difieren (volumen de materiales, espesores de coladas, fenómenos asociados, etc.), por lo que cualquier modelo de cálculo de la peligrosidad deberá tener en cuenta esta variabilidad si se desea obtener una cartografía coherente con el entorno geológico en el que tienen lugar los fenómenos eruptivos.

En general el volumen de datos de que se dispone para llevar a cabo la evaluación de la peligrosidad asociada a este tipo de fenómenos se considera que es suficiente como para poder establecer una base de cálculo de tipo probabilístico, puesto que se dispone de información tanto para la valoración de periodos de recurrencia, la probabilidad espacial de ocurrencia de fenómenos o la estimación de parámetros físicos de las lavas, lo cual constituye la base para llevar a cabo la simulación. Sin embargo, existe un cierto número de parámetros para los que no se dispone de información suficiente como para caracterizarlos en detalle o de manera estadística, tales como la tasa de emisión de los materiales, la dirección y longitud de las fisuras eruptivas en los distintos sectores estructurales de la isla, etc., por lo que se ha recurrido en estos casos a la asignación de rangos de valores sobre la base de criterios expertos y de la interpretación y adaptación de la información histórica disponible así como la procedente de otras áreas volcánicas.

Más escasos son los datos disponibles para la modelización de fenómenos asociados con estos eventos, como la emisión de proyectiles balísticos o la ocurrencia de erupciones freáticas, por lo que la cartografía que se ha generado en relación con éstos presenta mayores limitaciones que para las coladas. Sin embargo, sí que se ha tenido en cuenta la ubicación de cada uno de los eventos simulados, con el fin de al menos poder identificar las áreas en las que existe una mayor probabilidad de concentración de eventos situados en las inmediaciones de la línea de costa (hasta 2 Km. hacia el interior de la misma y en la plataforma continental), que es el área en la que se prevé que pudieran tener lugar preferentemente las erupciones de tipo freatomagmático.

Las erupciones de tipo explosivo (no se incluye en esta categoría las explosiones freáticas relacionadas con el volcanismo fisural o monogenético básico) han tenido lugar a lo largo de la historia asociadas con el volcanismo central. En el último periodo constructivo de la isla tan sólo se tiene constancia de la ocurrencia de erupciones ligeramente explosivas relacionadas con la generación de columnas subplinianas (erupción de Montaña Blanca, hace aprox. 8 Ka), por lo que se deduce que no existe un gran desarrollo de fenómenos eruptivos explosivos relacionados con la formación del complejo Teide – Pico Viejo (desde aprox. 170 Ka).

Sí se tiene constancia de la ocurrencia de erupciones de alta explosividad durante las diversas fases de formación del edificio Cañadas, durante las que se han generado depósitos tanto de caída como ignimbríticos o de surge con potencias de hasta varias decenas de metros. Sin embargo, aunque se ha hecho un importante esfuerzo de caracterización de estos depósitos desde el punto de vista geológico, existen todavía pocos datos para determinar las características dinámicas de los fenómenos que los generaron.

A pesar de que en la histórica geológica reciente no se hayan producido grandes eventos explosivos, esto no significa sin embargo que no sea posible que en el futuro se puedan producir eventos similares a los del periodo de formación del edificio Cañadas, pero la carencia de datos detallados sobre este tipo de eventos supone un grave inconveniente a la hora de valorar los posibles escenarios eruptivos que podrían tener lugar en el futuro en relación con este tipo de volcanismo y además corrobora el hecho de que resulta imposible el poder llevar a cabo la modelización probabilística de este tipo de erupciones.

Con el fin de que al menos este tipo de fenómenos pueda ser tenido en cuenta a la hora de valorar los posibles efectos potenciales de erupciones de tipo explosivo similares a las que han tenido lugar a lo largo del último periodo constructivo de la isla, se ha planteado la posibilidad de al menos llevar a cabo la simulación de varios escenarios relacionados con la formación de columnas plinianas, con generación de piroclastos de caída. La simulación de otro tipo de fenómenos, tales como la ocurrencia de coladas piroclásticas u oleadas piroclásticas se encuentra en principio fuera del alcance del presente proyecto, tanto por la escala temporal de ejecución del mismo como por la escasez de datos de que se dispone para la modelización de tales fenómenos.

No se ha tenido en cuenta en ningún caso la modelización de erupciones submarinas, ya que, pese a que se tiene constancia de la ocurrencia de tales eventos en la historia de Tenerife, se carece de información suficiente y de modelos físicos adecuados para llevar a cabo la simulación de los mismos, lo cual no excluye que puedan tener lugar en el futuro, de la misma manera que lo han hecho en el pasado.

Diseño conceptual del modelo de cálculo

El diseño conceptual del modelo de cálculo de la peligrosidad para la isla de Tenerife debe tener en cuenta las características geológicas del volcanismo y reflejar adecuadamente éstas con el fin de que incorpore de la forma más fiable posible los posibles escenarios eruptivos que podrán tener lugar en el futuro.

Dado el marco de desarrollo del modelo presentado en el apartado anterior, éste ha contemplado exclusivamente el análisis de las erupciones de tipo efusivo, quedando excluidos del mismo los fenómenos relacionados con la ocurrencia de erupciones explosivas, debido a la carencia de datos suficientes para poder llevar a cabo un análisis de tipo probabilístico.

En el Anexo I se representa el esquema del modelo de cálculo de la peligrosidad que se ha seguido para la elaboración de la cartografía, el cual es el resultado de tener en cuenta los criterios básicos que ha de cumplir la cartografía con el fin de que sea válida en términos probabilísticos y las condiciones y características geológicas de la isla de Tenerife. El modelo se compone de una serie de elementos interrelacionados mediante una serie de operaciones que siguen un flujo lógico y que conducen, en última instancia, a la generación de un mapa de peligrosidad frente a la ocurrencia de fenómenos efusivos. En los siguientes párrafos se describe cada uno de los componentes del modelo y las relaciones que existen entre ellos. La descripción detallada de cada uno de los componentes y del procedimiento seguido para generarlos se realiza en los correspondientes informes de tareas a las que pertenecen.

El análisis probabilístico de la peligrosidad frente a erupciones efusivas mediante algoritmos de Monte Carlo parte de la idea de que es necesario determinar cuál es el comportamiento que cabe esperar que tenga el volcanismo en la isla de Tenerife en el futuro. Para ello, en primer lugar se hace necesario averiguar de qué forma se han distribuido los eventos que han sucedido en la isla hasta la fecha, si han seguido algún tipo de patrón y extrapolar este comportamiento al futuro. La base que permite realizar este tipo de análisis estadístico son los datos de las erupciones ocurridas tanto en el periodo histórico como en el registro geológico, por lo que es necesario disponer de un catálogo o base de datos geocronológica lo más amplia posible, una clara idea sobre la evolución de la isla (reflejada en la distribución estratigráfica de las unidades eruptivas que se hayan identificado) y una base de datos en la que se representen los centros emisores. Estas tres bases de datos deben tener claras relaciones establecidas entre ellas, puesto que es necesario tener en cuenta todas estas variables a la hora de realizar los análisis. En conjunto, estas tres bases de datos constituyen el catálogo de eventos.

El análisis del catálogo de eventos permite establecer un modelo de recurrencia para las erupciones en la isla. Los estudios realizados en otras áreas volcánicas del planeta permiten anticipar que lo más probable es que el modelo de comportamiento eruptivo en el tiempo se asimile bien a una distribución de Poisson o a una distribución Binomial negativa, por lo que es el estudio estadístico detallado de los datos de edades de eventos lo que permite establecer cuál es la más adecuada para describir la ocurrencia en el tiempo de los fenómenos. Una vez determinada la distribución que mejor representa el comportamiento eruptivo en el tiempo (si es que existe), se puede generar una función de probabilidad que permita valorar el periodo de recurrencia que transcurre entre dos eventos volcánicos y el error potencial que se comente en su evaluación.

El modelo de recurrencia supone el primer componente clave en el proceso de cálculo de la peligrosidad volcánica, ya que se utiliza para determinar el número de eventos que es necesario simular para el intervalo de tiempo en que se estime la peligrosidad. Es decir, si quisiéramos representar todas las erupciones posibles en un intervalo de 100 Ka, el modelo de recurrencia nos indicará cuántos eventos deberemos simular para que el volcanismo en este periodo quede convenientemente reflejado.

Hay algunos temas que es importante considerar a la hora de desarrollar el modelo de recurrencia, tales como qué es lo que se entiende por eventos y episodios volcánicos o la posible variación temporal de la actividad volcánica en la isla, bien en sentido creciente o decreciente, las cuales pueden influir de forma determinante en los resultados del mismo.

El segundo elemento que hay que tener en cuenta a la hora de valorar la peligrosidad futura de erupciones es la ubicación potencial de las mismas. Puesto que a priori resulta prácticamente imposible determinar cuáles serán las áreas donde se localizarán los futuros centros eruptivos, todos los modelos existentes coinciden en partir de la hipótesis de que, puesto que la emisión de magma se suele realizar a favor de zonas de debilidad cortical, serán bien las fisuras, las zonas donde se ubiquen centros emisores existentes o las zonas de fractura las que ofrecerán una mayor probabilidad de ocurrencia de erupciones.

El modelo de fuente constituye la base sobre la que se establece la probabilidad de que cada uno de los puntos de la isla pueda verse afectado por erupciones en el futuro. Se trata de una superficie de probabilidad que se construye a partir del catálogo de eventos. Los métodos y modelos utilizados para generarlo se describen adecuadamente en el siguiente capítulo. Puesto que en Tenerife nos podemos encontrar con dos tipologías volcánicas dominantes, debe reflejar adecuadamente tanto las características eruptivas del volcanismo monogenético y poligenético como su posible evolución espacial a lo largo de la historia geológica, puesto que en el caso de que se identifique una cierta migración en la ubicación preferente de los centros, ésta podrá influir en la distribución futura de los mismos, que es la que se pretende representar.

La distribución espacial de los distintos fenómenos que pueden tener lugar en la isla viene definida por el modelo de peligros. Este modelo, que se genera a partir de los mismos datos que el de fuente, identifica las

zonas de la isla en la que pueden tener lugar cada una de las tipologías eruptivas dominantes. En principio su introducción en el modelo de cálculo de la peligrosidad refuerza los resultados obtenidos por el modelo de fuente, siempre y cuando éste se haya obtenido realizando un análisis independiente para cada tipología eruptiva. En el caso contrario, su función es la de complementar los resultados obtenidos por el anterior, puesto que de esta forma se obtiene por una parte la probabilidad de que en un punto ocurra una erupción y por otra la tipología de la misma.

Para un intervalo de tiempo dado, al combinar el modelo de recurrencia con el de fuente se obtiene la distribución de eventos (o lo que es lo mismo, de simulaciones) que deben llevarse a cabo en cada punto de la isla para cada tipo de volcanismo. Puesto que este tipo de análisis no tiene sentido realizarlo punto a punto en la isla, la opción más viable ha sido construir una malla regular, con un espaciado de celda adecuado para representar el fenómeno que se está teniendo en cuenta, sobre la cual se distribuye el número de eventos a simular.

Cada celda de la malla regular indica, para el intervalo de tiempo que se desea representar, el número de eventos que le corresponde. Esta información es tenida en cuenta por el generador de eventos para distribuir las simulaciones en la isla.

La ubicación de los eventos en cada celda se realiza de acuerdo con una distribución aleatoria, pero teniendo en cuenta en cada caso las características que han adoptado las erupciones en la isla (orientación y longitud de fisuras, número de centros, etc.). Esta información se almacena en el modelo de datos o en el propio generador de eventos y procede del análisis de las características de los eventos del catálogo.

Los eventos simulados pueden ser de carácter básico-intermedio o sálico en función de su ubicación. Para determinar las características composicionales de cada uno de ellos se tiene en cuenta el modelo de peligros y los datos de geoquímica que se encuentran almacenados en el modelo de datos (los cuales proporcionan información sobre el rango composicional de los eventos ocurridos hasta la fecha). De esta forma, se obtiene una aproximación más realista a la realidad eruptiva de la isla y se tiene en cuenta la asociación que existe entre la composición de los eventos y su ubicación en el espacio.

En la simulación de cada uno de los eventos se muestrean las distribuciones que representan cada una de las variables que requiere el modelo físico (volumen, número de centros, orientación, tasa de emisión, etc.), teniendo en cuenta la tipología eruptiva a la que pertenece el mismo. Estos datos proceden de distribuciones o de rangos propuestos por expertos para aquellos casos en que se carece de información suficiente para obtener información de tipo estadístico. El muestreo de las variables se realiza de forma aleatoria representando diversos tipos de distribuciones (normal, binomial, funciones escalonadas, rangos, etc.), de las cuales se elige la más adecuada para cada uno de los parámetros.

Para llevar a cabo la simulación de las erupciones efusivas se aplican dos modelos físicos: un modelo para la simulación de coladas lávicas y otro para los proyectiles balísticos (que en principio se aplica exclusivamente

para las erupciones de tipo básico – intermedio). El generador de eventos se ocupa de obtener, para cada una de las simulaciones a realizar, los parámetros resultantes de la aplicación de las distribuciones a las bases de datos del modelo (que son las que definirán el comportamiento de las coladas lávicas), identificar cada uno de los puntos de emisión del evento, así como los centros emisores situados en la zona de influencia de la línea de costa o en el mar y generar las áreas de influencia potenciales para la generación de los conos de piroclastos.

La ejecución de los modelos físicos de cálculo de distribución de coladas lávicas se ha llevado a cabo en el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA), en la Universidad de Santiago de Compostela, debido a los amplios requerimientos de cálculo necesario y al gran volumen de simulaciones a realizar. El resultado de los mismos se almacena en un repositorio temporal en el que se obtiene, al final del proceso, un mapa de distribución potencial de productos para cada evento y fenómeno.

El cálculo de la peligrosidad se realiza analizando, para cada punto de la isla la relación entre la intensidad del fenómeno y su frecuencia. La intensidad viene representada por la o las variables que generan de salida los modelos. Esta función, aplicada a cada punto de la isla, permite generar un mapa único de **probabilidad de excedencia** de un determinado umbral con un porcentaje de probabilidad que se define en función del nivel de peligrosidad que se desea representar.

Condiciones de modelización de la peligrosidad

Una vez establecidas las interrelaciones existentes entre las bases de datos y las variables que conforman el modelo de cálculo de la peligrosidad mediante la descripción del proceso lógico de generación de la cartografía, es posible establecer una serie de condiciones o de criterios que se apliquen a la hora de llevar a cabo la modelización. Estas condiciones se establecen con el fin de facilitar el procedimiento de cálculo y deben ser tenidas en cuenta a la hora de analizar la cartografía resultante, puesto que van a condicionar los resultados obtenidos.

En primer lugar, se ha decidido que el periodo que abarque el análisis se centre en la última fase constructiva de Tenerife, es decir, desde la formación de Diego Hernández (hace aprox. 170 Ka) hasta la actualidad. Este intervalo de tiempo se ha tomado con el fin de que los datos a analizar mantengan una coherencia desde el punto de vista evolutivo y no excluye que para el análisis de determinadas variables se pueda abarcar un periodo de tiempo mayor, siempre que esto permita establecer criterios de evolución que sean útiles al análisis de la peligrosidad.

En consonancia con este criterio, el tiempo para el que se ha llevado a cabo la simulación de eventos comprende como máximo el periodo que se considera que la fase actual de construcción de la isla puede abarcar. Puesto que por término medio las distintas etapas de construcción de la isla han comprendido

periodos de entre 300Ka a 600 Ka, la simulación debe representar un periodo de tiempo de entre 150 Ka a 450 Ka, puesto que los últimos 170 Ka ya se encuentran representados en el registro geológico.

La distribución de las erupciones en la isla se rige por las características del modelo de fuente. El muestreo aleatorio de puntos en cada una de las celdas de la malla regular garantiza la distribución de los escenarios de acuerdo con el modelo de fuente y permite asimismo incorporar la mayor variabilidad posible de tipologías eruptivas asociadas con el volcanismo efusivo. Esto significa que, de acuerdo con la realidad de la isla, el muestreo aleatorio permite obtener centros emisores situados en la plataforma costera o bien en las proximidades de la costa, los cuales resultan especialmente significativos a la hora de considerar los posibles efectos de erupciones de tipo freatomagmático. La representación de los efectos de este tipo de erupciones no va a ser llevada a cabo mediante un modelo físico, pero sí que queda de manifiesto al menos aquellas áreas en las que existe un peligro potencial de ocurrencia de este tipo de eventos.

Los escenarios posibles se representan en la simulación por las distribuciones estadísticas que representan a cada una de las variables que intervienen en los modelos físicos. El procedimiento de muestreo de las simulaciones garantiza que todos los escenarios posibles vengán representados en función de su probabilidad de ocurrencia. Se parte de la hipótesis de que el comportamiento eruptivo futuro será similar al que han tenido los eventos durante el último periodo constructivo de la isla, que es el que se va a tener en cuenta para la obtención de las variables de simulación.

Para la simulación de las erupciones efusivas se parte de la hipótesis de que la magnitud de todas ellas es similar. Los estudios realizados en la isla por diversos autores establecen que la magnitud de las mismas se encuentra comprendida entre VEI 2 y 3, pero puesto que los fenómenos asociados son idénticos en cada caso y que la diferencia principal entre ellas está en el volumen de materiales emitidos (variable que queda convenientemente representada en la base de datos), se puede considerar a efectos de simulación que la magnitud de todas ellas es similar.

Es posible que a lo largo del tiempo la evolución de la isla dé lugar a que se produzcan variaciones en el comportamiento eruptivo. Esta hipótesis, que es factible especialmente en el caso del volcanismo central, es difícil de representar en el proceso de simulación. Para tener en cuenta hasta qué punto los cambios evolutivos (sobre todo de tipo composicional, que es la información de que se dispone para la ejecución del proyecto) influyen en la simulación (fenómenos efusivos) se ha llevado a cabo un análisis evolutivo de las muestras geoquímicas de que se dispone. El resultado de este análisis indica que los cambios composicionales a lo largo de la evolución de la isla han sido mínimos en aquellos aspectos que van a intervenir en la simulación de las coladas lávicas, por lo que en principio se ha considerado que las características eruptivas se mantienen constantes a lo largo del tiempo para los fenómenos que vamos a tener en cuenta.

Escenarios para la simulación de piroclastos de caída

Como se ha indicado en apartados anteriores, para la ejecución del proyecto no se dispone de información suficiente para realizar el cálculo probabilístico de la peligrosidad relacionado con erupciones de tipo explosivo. Por tanto y, con el fin de que al menos sea posible tener en cuenta el posible impacto derivado de la ocurrencia de este tipo de fenómenos se ha propuesto la generación de una serie de escenarios que representen los eventos que podrían tener lugar en la isla.

Para llevar a cabo la selección de escenarios se dispone de relativamente poca información. Como ya se ha comentado, tan sólo la erupción de Montaña Blanca, hace aproximadamente 8 Ka ha tenido una componente de tipo explosivo en el sentido en el que se ha considerado en el presente estudio este tipo de volcanismo, con la generación de una columna subpliniana y una serie de depósitos de caída asociados.

Se considera que, por tanto, al menos este escenario debería ser considerado para la simulación (en términos de características eruptivas, pero no de ubicación de los centros), aunque para la representación de escenarios de mayor explosividad, resultaría necesario recurrir a los datos existentes para los eventos asociados con el ciclo Cañadas. Con el objeto de que se pueda incorporar la mayor variabilidad de resultados posibles se ha seleccionado un conjunto de ubicaciones para la realización de los mismos y varias opciones de simulación, basadas principalmente en las condiciones de distribución de los materiales. Para la selección tanto de la ubicación espacial como de las características de cada uno de los escenarios se ha contado con la opinión de expertos en la caracterización del volcanismo explosivo que ha tenido lugar en la isla.

La simulación de columnas plinianas conlleva la obtención de datos de viento en altura. Puesto que no se pretende reproducir erupciones anteriores sino valorar los resultados de erupciones futuras, se han utilizado los datos de perfiles de vientos disponibles para un año completo. De forma ideal, se debería disponer de series temporales más largas, pero este tipo de información se encuentra disponible para las Canarias sólo desde el año 2003 y en sus primeros meses el registro está muy fragmentado, por lo que la posibilidad de obtención de una serie temporal continua de duración superior a la considerada es escasa.

El objeto de las simulaciones de escenarios ha sido determinar la medida en la que las distintas zonas de la isla pueden verse afectadas por caídas de cenizas superiores a un determinado umbral de carga máximo que se ha establecido con anterioridad al proceso de simulación o un espesor determinado que pueda inducir fallos en sistemas o infraestructuras vitales. Es importante resaltar que, puesto que los escenarios representan exclusivamente eventos posibles, la distribución obtenida no indica la probabilidad de que la zona pueda verse afectada por la caída de cenizas en el futuro sino exclusivamente la resultante de una hipótesis en particular.

Se ha descartado en principio la simulación de otro tipo de fenómenos asociados a la formación de columnas plinianas o la ocurrencia de erupciones explosivas, tales como coladas piroclásticas u oleadas piroclásticas, ya que no se dispone de información suficiente para su representación.

Definición de escenarios de peligrosidad

De forma muy simple, para determinar la peligrosidad volcánica de Tenerife, es necesario plantearse tres cuestiones principales:

¿Qué probabilidades hay de que se produzcan erupciones en el futuro?

¿Cuál es la zona más probable en la que se pueden producir estas erupciones?

¿Cuál será su dimensión y su zona de alcance?

El análisis de cada una de estas cuestiones nos proporciona la base para identificar las variables que intervienen en la peligrosidad volcánica y que después se utilizarán para identificar el rango posible de escenarios eruptivos que pueden tener lugar en un área volcánica en el intervalo de tiempo del que se ocupe el estudio. El presente apartado se ocupa exclusivamente de plantear las metodologías que se han venido utilizando habitualmente para resolver las dos primeras cuestiones. La tercera cuestión se trata convenientemente en la tarea destinada a analizar los modelos físicos de erupción.

Según los nuevos métodos de análisis de la peligrosidad, para llevar a cabo el análisis en Tenerife se requiere construir un modelo de recurrencia y un modelo de fuente, los cuales se han elaborado utilizando la información disponible en catálogos históricos y estudios geológicos. Estos modelos se han utilizado para definir el número y distribución de los eventos que deben simularse para representar el fenómeno estudiado en el intervalo de tiempo considerado (Figura 24).

En Tenerife, dada la escasez de datos con que se cuenta sobre el número y magnitud de los eventos, adquiere una relevancia fundamental la catalogación de erupciones, ya sea mediante métodos estratigráficos, estructurales o geocronológicos. Los estudios geológicos han proporcionado la información básica que permite definir el carácter y la magnitud de los procesos eruptivos, así como la evolución de los sistemas volcánicos. Constituyen por tanto la base sobre la que construir el modelo de simulación, la fuente de datos de los modelos físicos y la herramienta para calibrarlos (ej. Andronico & Cioni, 2002).

En la determinación de la escala de las erupciones ocurridas entran en juego un gran número de variables, tanto intrínsecas a la dinámica del proceso eruptivo como externas al mismo (hidrogeología, topografía). Por ello, se ha intentado encontrar un método que permita cuantificar de forma universal el "tamaño" de las erupciones. Los métodos existentes se agrupan entre los que miden la magnitud, la intensidad o ambas, y el que hasta ahora ha sido más ampliamente utilizado, lo proponen Newhall & Self en 1982 y consiste en una escala basada en el Índice de Explosividad Volcánica (*Volcanic Explosivity Index*, VEI), el cual se define

como una estimación compuesta de magnitud, intensidad y otros parámetros, dependiendo de los datos disponibles para el cálculo (Figura 25).

La generación de un catálogo lo más fiable posible de eventos eruptivos a nivel global ha merecido la dedicación de publicaciones específicas (ej. Simkin & Siebert, 1994) y son muchos los estudios dedicados a establecer la cronología de las erupciones a nivel local y las publicaciones dedicadas a analizar o establecer

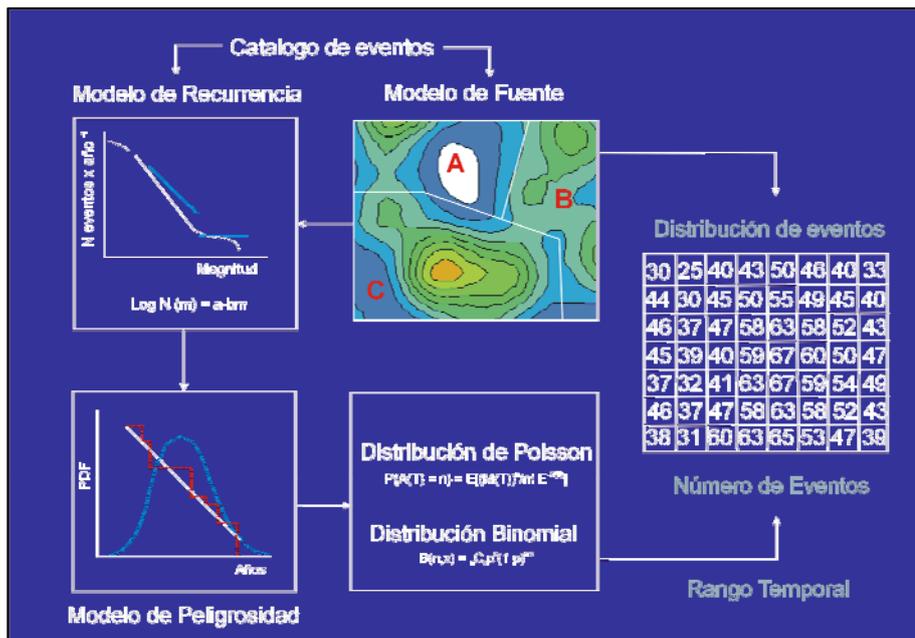


Figura 24. Componentes del Modelo de Peligrosidad que se utilizará para determinar en Tenerife el número y distribución de los eventos que deberán ser simulados por el generador.

métodos precisos de datación. Aunque la revisión detallada de estos estudios se encuentra fuera del alcance de este análisis, es necesario resaltar la contribución fundamental que éstos aportan al estudio de la peligrosidad volcánica.

Sobre la base proporcionada por los catálogos de eventos existentes, se ha dedicado un esfuerzo importante en las últimas décadas a definir modelos de recurrencia en volcanes específicos (De la Cruz-Reyna, S. & Carrasco-Núñez, 2002; Cronin et al., 2001; Hill et al., 1998). Para reconocer los patrones de comportamiento eruptivos la mayor parte de los modelos consideran las erupciones como procesos puntuales y aplican enfoques sencillos que consideran la aleatoriedad absoluta de los procesos volcánicos (modelos de Poisson), aunque para casos específicos (ej. Vesuvio) se han diseñado modelos dependientes del tiempo (renewal models).

Estimados el momento de ocurrencia y la magnitud de las erupciones que hayan tenido lugar en Tenerife, es posible reconocer los patrones de comportamiento eruptivo si es que existen y definir las “leyes” de

probabilidad que indiquen los periodos de retorno para un determinado fenómeno en función de su magnitud, con lo que tenemos la respuesta parcial a dos de las preguntas que nos hemos formulado.

En lo que respecta a los modelos de fuente, pese a que ya a principios de los '90 se propusieron métodos para determinar la probabilidad espacial de ocurrencia de erupciones, como los procesos de Cox, el análisis de clusters o las técnicas de análisis de alineaciones (véase Wadge et al., 1994; Connor, 1990), sigue siendo frecuente la utilización de las técnicas de cartografía de densidad para determinar las posibles áreas de erupción y sólo han tenido una escasa repercusión los métodos de análisis fractal (Mazzarini & Armienti, 2001) o los estudios estructurales (Alaniz-Álvarez et al., 1998).

Hasta este punto se habrá generado información sobre la naturaleza de los fenómenos que pueden tener lugar en la zona de estudio, el rango de magnitud de cada uno de ellos, su posible localización espacial y la probabilidad temporal. Pero para completar el análisis de las variables que intervienen en la peligrosidad de Tenerife se debe además poseer información que permita estimar la distribución de los diversos fenómenos que pueden tener lugar en la isla, ya que la asociación que se produce entre un volcanismo central y otro de tipo fisural monogenético hace necesario tener en cuenta cuáles son las zonas preferentes de ocurrencia de ambos, puesto que condiciona el tipo y la magnitud de los fenómenos que pueden tener lugar en éstas.

El análisis de la distribución potencial de los fenómenos eruptivos es una tarea compleja que parte del

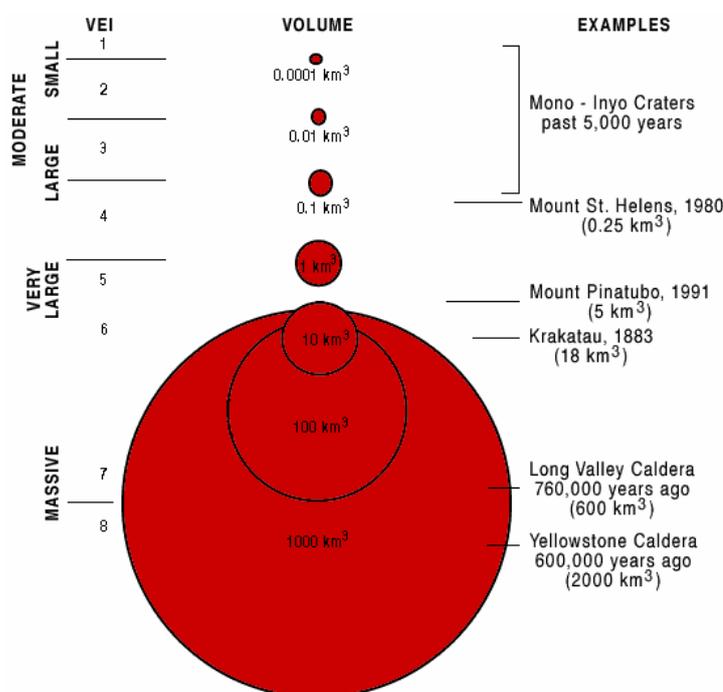


Figura 25. Índice de explosividad volcánica (Long Valley Observatory, basado en Newhall y Self, 1982).

análisis de la distribución actual que se presenta en el registro histórico y geológico. Puesto que se carece habitualmente de indicios que permitan estimar la tendencia futura que seguirá el volcanismo en la zona de trabajo, se parte de la hipótesis de que las características de los fenómenos que tendrán lugar en el futuro estarán directamente relacionadas con las de los que han tenido lugar en el pasado. Partiendo de esta hipótesis, se puede determinar cuál es la distribución potencial preferente de las diversas tipologías eruptivas que pueden tener lugar en la isla y generar el modelo de peligros.

Inventario de datos

El inventario de datos comprende la revisión de aquellos datos que van a proporcionar la información básica sobre la que va a ser posible generar los datos que constituyen la base para la simulación de eventos mediante proceso y análisis de los mismos.

Son tres las fuentes de datos principales que se han utilizado para la ejecución de esta tarea: las propias fuentes de datos del IGME, las del Cabildo de Tenerife y por último las procedentes de las referencias bibliográficas.

El inventario de los datos ha supuesto la realización de un control de calidad destinado a determinar la validez de los mismos para el propósito del proyecto y una propuesta de reorganización y análisis con el fin de que su estructura se corresponda con la necesaria para el funcionamiento del modelo de datos usado para el cálculo de la peligrosidad. El objeto último que se persigue con esta propuesta es que el IGME obtenga una base de datos robusta en la que sea posible integrar a futuro nueva información y que como resultado todos los cálculos que se obtengan a partir de ésta se puedan actualizar con simplicidad y, en la medida de lo posible, automáticamente.

Se ha dispuesto utilizar exclusivamente aquellos datos que estuvieran disponibles para la ejecución del proyecto a la fecha de su inicio. Esta decisión se ha tomado puesto que el proceso de revisión e inventario de datos volcanológicos es costoso y complejo y en la mayor parte de los casos no se dispone de información suficiente para calibrar la bondad de los datos aportados (origen, método de obtención de los mismos, errores, escalas, etc.), por lo que la incorporación de nuevos datos una vez desarrollado este apartado supondría una inversión importante de tiempo y recursos extras a este proceso.

Como resultado de los controles de calidad realizados, se ha obtenido asimismo una visión sobre las necesidades futuras para la mejora de los datos de partida del proyecto y una valoración sobre el tipo de limitaciones o errores que los datos utilizados pueden incorporar a los resultados del trabajo.

A continuación se describe la metodología utilizada para la realización de esta tarea para cada una de las bases de datos incorporada al modelo de cálculo de la peligrosidad.

Cartografía geológica

Para la ejecución del proyecto se ha dispuesto de las siguientes fuentes de datos, todas ellas procedentes del IGME:

- Cartografía Geológica Continua Digital de las Islas Canarias. Proyecto GEODE. Cartografía geológica en formato digital continuo, realizada a partir de la cartografía MAGNA elaborada por el IGME a escala 1:25.000. La información se entrega en diferentes formatos: shapefile y cobertura. Las capas de información son: litologías, contactos, diques, estructuras, fracturas y elementos puntuales.
- Cartografía Geológica MAGNA. Cartografía de la Serie MAGNA, elaborada por el IGME, escaneada de los originales en papel, con escala de referencia 1:25.000. El formato de la imagen es .JPG. Las imágenes no están georreferenciadas, aunque los metadatos aportan la información necesaria para realizar esta tarea. Se ha tenido acceso asimismo a las memorias asociadas a cada hoja en formato papel y digital.
- Mapa Geológico de Síntesis de la Isla de Tenerife. Cartografía Geológica en formato digital, realizada a escala de referencia E 1:100.000. Accesible en formato digital, pero preparada para su impresión en papel.
- Guía del Parque Nacional del Teide. Cartografía geológica y geomorfológica que abarca los límites del citado Parque. Existente en formato digital, pero sin codificación de la simbología.
- Mapa Geológico de Tenerife, del Instituto Lucas Mallada. Mapa geológico elaborado en 1968 y escaneado.

De toda la información disponible, tan sólo la cartografía procedente del proyecto GEODE se encuentra en formato digital, lo que ha condicionado necesariamente la elección de la misma como base de referencia para la ejecución de la cartografía de peligrosidad. Sin embargo, el proyecto GEODE se ha concebido con una filosofía distinta del que nos ocupa, por lo que ha resultado necesario analizar la forma en la que la información que éste incorpora puede resultar útil al estudio de la peligrosidad volcánica.

Dada la naturaleza del presente proyecto, resulta de hecho necesario entender y analizar la evolución volcanológica de la isla y las características de los eventos que han tenido lugar en la misma a lo largo del tiempo, con el fin de constituir una base de cálculo sólida. Este enfoque lo incorpora de forma bastante más aceptable para este trabajo la antigua cartografía MAGNA, en la que los depósitos y formaciones de la isla de Tenerife aparecen identificados como UNIDADES de emisión (es decir, básicamente eventos eruptivos independientes). A pesar de ello, debido a la antigüedad de la misma y a la consiguiente mejora del conocimiento volcanológico de la isla, en la actualidad se han redefinido o se han marcado nuevos límites para algunas de las unidades representadas en esta cartografía, por lo que se hace necesario tener en cuenta este hecho a la hora de utilizarla como fuente de información.

Por tanto, la agrupación de las litologías que describe el proyecto GEODE de acuerdo con UNIDADES volcanológicas se ha considerado el criterio más adecuado para la representación de los datos geológicos de los que se dispone. Esta filosofía es además coherente con la propuesta del Modelo de Análisis de la Peligrosidad Volcánica que se ha propuesto para la ejecución del proyecto (MAPA 2).

Los resultados de la realización de todas estas tareas se han plasmado en la obtención de una nueva cartografía de unidades volcanológicas para la isla de Tenerife a partir de la del proyecto GEODE que ha sido utilizada tanto como base de representación y cálculo, como para la incorporación de nuevos criterios de control de calidad para otros datos geológicos (geocronología, geoquímica...) utilizados en el proyecto y de los que se necesita tener la garantía de que se encuentran ubicados coherentemente.

En consecuencia, por lo que respecta a los sistemas de referencia que utilizará el proyecto, se ha tomado como base la establecida en el marco del proyecto GEODE y a ella se han referido el resto de bases de datos que ha incorporado el proyecto.

Centros de emisión

El segundo tipo de datos que se han incorporado al estudio es la ubicación y características de los centros de emisión visibles de la isla. Parte de los datos proceden de la correspondiente capa en la cartografía GEODE. Sin embargo, en ésta sólo aparecen identificados como centros emisores aquellos que no tienen cráteres o conos asociados, mientras que estos últimos aparecen dentro de las capas destinadas a la representación gráfica o como unidades litológicas específicas (ej. conos de escorias) y, por tanto, sin una representación adecuada a los fines del presente trabajo. Por ello, se ha hecho necesario generar los datos puntuales correspondientes a cada uno de los centros eruptivos visibles que aparecen en la isla. Para ello, se ha recurrido a la información digital incorporada en el GEODE y en los mapas en formato JPEG de la serie MAGNA. El control de calidad de la capa de centros de emisión generada ha sido realizado por el IGME, en base a la comparación de la ubicación de los mismos con ambas cartografías y utilizando como base el conocimiento de la geología de la isla de Tenerife del personal participante en el proyecto.

Con el objeto de que en el futuro sea posible realizar análisis sobre estos datos, se ha identificado la procedencia o fuente de cada uno de los centros emisores digitalizados. Una gran parte de los centros identificados proceden de las exclusivamente diversas capas de información del GEODE (233), aunque muchos de ellos también aparecen como tales en la cartografía MAGNA (175) o en ambas series cartográficas (336).

En septiembre de 2006 se ha añadido un conjunto de centros eruptivos procedentes de las bases de datos del CSIC (20). A estos centros no ha sido posible realizarles un control de calidad, ya que se desconoce el procedimiento de generación de los mismos, las fuentes de datos originales, precisión cartográfica, etc., por

lo que sería deseable en futuras actualizaciones valorar su validez, con el objeto de determinar su uso en la generación de nuevas versiones de la cartografía.

Cada centro eruptivo digitalizado, del total de 764, dispone de un código único que lo identifica, así como una serie de atributos que ayudan a definir la tipología eruptiva de los materiales asociados con el mismo. Los atributos asociados a cada centro son los que han permitido realizar el análisis de algunos de los factores de la peligrosidad, como se verá en apartados posteriores de la memoria de proyecto (MAPA 4).

Datos estructurales

Fracturación y fisuras

La cartografía GEODE incorpora entre sus varias capas información sobre fracturas o fisuras identificadas en la isla. Esta información es muy escasa y se encuentra principalmente asociada a los macizos antiguos, por lo que, aunque se ha decidido incorporarla al modelo de datos, no se ha considerado relevante para la elaboración del presente proyecto.

Sin embargo, se reconoce la importancia que los fenómenos de emisión a favor de fisuras ha tenido y tiene en la isla, principalmente en relación con el volcanismo monogenético de tipo básico e intermedio, por lo que resultaría adecuado disponer de información que permitiese de alguna forma indicar cuáles son las direcciones preferentes en las que, al menos hasta la fecha, ha tenido lugar la inyección de magma en la corteza.

A este respecto, aunque se ha podido acceder a información procedente de otras fuentes para el resto de la isla, los datos relativos a fracturación y fisuras carecían de ninguna información asociada, constituyendo exclusivamente un fichero de líneas cuyo uso sin ningún tipo de interpretación se ha considerado que introduce una importante incertidumbre en el cálculo de la peligrosidad, ya que se desconoce su procedencia y el o los fenómenos a los que están asociados, así como lo que representan o algunos atributos básicos que resulta necesario obtener para realizar un análisis estadístico significativo.

Puesto que se carece en consecuencia de información lo suficientemente válida para la incorporación de los datos de estructuras en el análisis, se ha considerado que esta información se encuentra de alguna forma implícita en la capa de centros emisores, puesto que cuando la erupción ha tenido lugar a través de fisuras, se produce una fuerte y significativa alineación de los mismos. Es decir, como consecuencia de esta predisposición preferente de centros en torno a directrices tectónicas específicas, el modelo de fuente resultante incorporará por defecto la distribución de las mismas, por lo que la incorporación de información adicional sobre fisuras o fracturas, a menos que esté contrastada en campo, se desaconseja, ya que al tratarse de datos interpretativos pueden estar fuertemente condicionados por los conocimientos previos del analista.

Este hecho se comprueba de manera significativa en las erupciones históricas, de las que existen datos suficientes para identificar la fisura a lo largo de la cual ha tenido la emisión y su extensión. Para erupciones del registro geológico, no existe información suficiente por lo general como para identificar con precisión la o las fisuras a lo largo de las cuales han tenido lugar las emisiones. Especialmente para el volcanismo de más de 30Ka, las UNIDADES identificadas pueden tener asociado un número elevado de centros emisores y la identificación de direcciones preferentes ha sido con frecuencia más una cuestión interpretativa que estadística. Por este motivo, no se ha utilizado la información contenida en la cartografía disponible para la extracción de información de tipo estructural para el presente proyecto.

Pese a que la información contenida en GEODE y MAGNA no proporciona información suficiente como para poder determinar las direcciones preferentes de distribución de centros eruptivos en Tenerife, sí se dispone de estudios genéricos elaborados para el total de la isla que incorporan información suficiente para poder incorporar al simulador de eventos los datos necesarios para que la representación de escenarios eruptivos fisurales sea coherente con la distribución de eventos anteriores en la isla (ej. Ancochea et al., 1995). Existen estudios más recientes en los que se ha llevado a cabo un análisis sobre la distribución y características estructurales de la isla de Tenerife y que tienen en cuenta un volumen de datos mayor y más actualizado que el realizado por Ancochea et al. (Galindo, 2005b). Sin embargo, estos análisis adolecen de la posibilidad de asociar los resultados obtenidos a la referencia espacial que es imprescindible para llevar a cabo el presente trabajo, por lo que no han podido ser utilizados.

Esta información se ha incorporado para determinar las características que presentan las erupciones fisurales en función del sector de la isla en el que tienen lugar. El estudio de Ancochea et al., se basa en el análisis estadístico de alineaciones, por lo que se ha considerado la fuente que mayor información aporta para la representación de escenarios de todas las disponibles en el presente momento.

Datos geocronológicos

Los datos geocronológicos de los que se dispone han sido recopilados principalmente por el IGME, que ha proporcionado una base de datos con 202 registros de mediciones geocronológicas. Se ha establecido un plan de calidad para determinar la validez de las muestras en el proceso de cálculo de la peligrosidad y se ha efectuado una serie de controles durante el proceso de incorporación de las muestras, los cuales han proporcionado como resultado una base de datos final depurada que incorpora exclusivamente aquellos registros que han satisfecho todos los umbrales establecidos.

Siguiendo los criterios establecidos por el plan de calidad, los datos de geocronología se han analizado para determinar las siguientes cuestiones:

- Confirmar la compatibilidad de formatos con el software de GIS utilizado para el estudio.

- Analizar los campos que componen la base de datos y su compatibilidad con el objeto de estudio, así como las posibles necesidades de modificación.
- Identificar la bondad de los datos, su procedencia y fiabilidad.
- Analizar la completitud de la base de datos: tanto para ver si el registro del que se dispone es completo para el periodo de tiempo analizado, como para determinar si los registros uno a uno son completos.
- Asegurar que todos los datos disponen de coordenadas geográficas y que éstas son correctas y compatibles con las especificaciones de la cartografía.
- Establecer el grado de correlación de los datos geocronológicos con la cartografía geológica.

Los datos de geocronología se han proporcionado en formato de hoja de cálculo Excel, aunque se ha carecido de información descriptiva sobre los contenidos de los campos que aparecen en la tabla. Aunque los nombres de cada uno de los campos son lo suficientemente explícitos en la mayor parte de los casos, resulta necesario aclarar aún algunos términos para documentar adecuadamente el modelo de datos elaborado.

En cuanto a la procedencia de los datos, se carece asimismo de información detallada sobre el origen y el procedimiento de análisis, fecha de toma de la muestra, laboratorio, etc., por lo que es complicado el poder valorar la bondad intrínseca de los mismos. Por ello, se ha partido de la hipótesis de validez de todos ellos y se ha procedido a realizar los controles de calidad necesarios para su incorporación en el modelo de datos.

Del total de 202 muestras, la mayor parte de los datos se corresponden con muestras pertenecientes al edificio Cañadas y anteriores, por lo que en principio éstas se ha decidido no integrarlas en el modelo, ya que como se indica en el modelo de peligrosidad volcánica, se han utilizado para el cálculo de la peligrosidad tan sólo aquellas muestras de edad coetánea o inferior a 500Ka, debido a que, por coherencia, el análisis se centra exclusivamente en el estudio del último ciclo destructivo-constructivo que ha tenido lugar en la isla. Sin embargo, será posible incorporarlas posteriormente si desease ampliar el rango temporal de las bases, siempre y cuando se proceda en los términos del procedimiento segundo y se mantenga el esquema del modelo de datos. Como resultado, tan sólo 54 muestras sobre el total se han tenido en cuenta para el cálculo de la peligrosidad.

Una vez hecha la preselección de los datos a utilizar, se han valorado el resto de criterios de control de calidad con el fin de depurar los registros restantes. El objetivo es intentar mantener el mayor número de muestras en la base de datos, con el fin de que sea posible mantener una cierta validez estadística en el cálculo del modelo de recurrencia. Para ello se ha aplicado el siguiente procedimiento:

1. Las muestras que se integran en la base de datos presentan diversos sistemas de referencia (Lambert, UTM, geográficas, distintos paralelos de referencia, etc.) y en muchos casos carecen de

coordinadas, pero incorporan una descripción del punto de muestreo o de la unidad a la que pertenecen.

2. Para estas 54 muestras, los datos con coordenadas se han transformado a coordenadas UTM y representado como puntos en el mapa geológico de Tenerife suministrado por el IGME (GEODE 50) a través del software ArcMap 9.1. Como resultado de la transformación, se ha llevado a cabo la asignación semi-automática de las dataciones a la litología sobre la cuál estaban directamente proyectadas.
3. Se ha comprobado que realizando estas transformaciones en los datos a un único sistema de referencia (el del GEODE, WGS84, UTM 28N) se producen errores en la ubicación de muestras, por lo que para determinar la UNIDAD a la que pertenece la muestra se ha seguido un proceso de asignación más complejo, que consiste en buscar a partir de la información bibliográfica de que se dispone de la datación, qué materiales son los que están caracterizando. A falta de otra información, se ha optado por no tener en cuenta los datos que no estén en la bibliografía.
4. Muy similar ha sido el procedimiento seguido para asignar las dataciones que no poseen coordenadas y que, por tanto, no podían ser proyectadas en ArcMap. Cabe destacar aquí la importancia del conocimiento de la geografía y la toponimia de la isla de Tenerife para poder encontrar el mayor número posible de datos con un margen de fiabilidad aceptable.
5. En el caso de que haya varias muestras pertenecientes a la misma UNIDAD no se ha podido tener en cuenta si las diferencias de edades son debidas a errores de muestreo o análisis o si son correctas, por lo que se ha asumido que los datos son correctos y se han mantenido todos ellos en la base.

Además de las muestras proporcionadas por el IGME se le han añadido otras procedentes de fuentes publicadas en las que se indican nuevas edades con el objeto de mejorar la información de la que se dispone. Estas muestras han sido identificadas con el código SC_x (siendo *x* el número de muestra) y a la tabla Excel se le han incorporado todos aquellos campos de los que se disponía información en estos casos.

Entre ellas se encuentran nueve (9) datos geocronológicos que aparecen en el artículo de Carracedo et al. (2004). Para ello se ha utilizado por una parte la información disponible en el propio artículo y en otro muy similar del 2003 del mismo autor, así como una imagen digitalizada y georeferenciada donde están ubicadas casi todas las dataciones. Cabe reseñar en este aspecto que algunas dataciones presentes en el fichero de imagen no tenían correspondencia con las de los artículos citados y que presentaban una nomenclatura confusa, por lo que en esos casos no se han tenido en cuenta.

Además, se han incorporado los datos de las erupciones históricas y sub-históricas (8 en total), con sus correspondientes nombres y edades a partir de la información publicada de las mismas. En total, después de

hacer este pretratamiento, el número de muestras aceptables para ser incorporadas al modelo ha sido de 71 (MAPA 3).

Datos geoquímicos

La base de datos de Geoquímica del IGME incorpora 981 registros de análisis químicos que presentan las mismas características y limitaciones que las muestras de geocronología. Al igual que en el caso anterior, de acuerdo con el Plan de Calidad que se ha establecido para determinar la validez de las muestras en el proceso de cálculo de la peligrosidad, se han efectuado una serie de controles durante el proceso de incorporación de las muestras al modelo, los cuales han proporcionado como resultado una base de datos final depurada que incorpora exclusivamente aquellos registros que han satisfecho todos los umbrales establecidos.

Siguiendo los criterios establecidos por el plan de calidad, los datos de geoquímica se han analizado para determinar las siguientes cuestiones:

- Confirmar la compatibilidad de formatos con el software de GIS utilizado para el estudio.
- Analizar los campos que componen la base de datos y su compatibilidad con el objeto de estudio, así como las posibles necesidades de modificación.
- Identificar la bondad de los datos, su procedencia y fiabilidad.
- Analizar la completitud de la base de datos: tanto para ver si el registro del que se dispone es completo para el periodo de tiempo analizado, como para determinar si los registros uno a uno son completos.
- Asegurar que todos los datos disponen de coordenada geográfica y que ésta es compatible con las especificaciones de la cartografía.
- Establecer el grado de correlación de los datos geoquímicos con la cartografía geológica.

La base de datos geoquímica tiene características similares a la anterior en cuanto a los formatos de almacenamiento y a la información disponible sobre la calidad de los datos. Para cada una de las muestras, la hoja de cálculo incorpora el contenido en elementos mayores, menores y traza en porcentaje. A pesar de que a priori tan sólo el contenido en mayores va a ser utilizado en el modelo de cálculo de la peligrosidad, se ha decidido incorporar la totalidad de campos de la tabla en el caso de que el IGME pueda estar interesado en hacer algún análisis sobre los mismos.

Puesto que al igual que en el caso de la base de datos de geocronología las muestras de geoquímica presentan una gran heterogeneidad en cuanto a la asignación de sistema de coordenadas (X,Y), de su ubicación y las dificultades que presenta su reproyección, se ha utilizado como criterio preferente de

asignación a UNIDADES la descripción de la que se dispone de cada una de ellas, aunque en cualquier caso, se han re proyectado los datos disponibles al sistema de GEODE con el fin de disponer de un formato homogéneo de X,Y para cada dato.

Como resultado de este proceso de asignación de datos descriptivo, del total de muestras tan sólo ha resultado posible ubicar con fiabilidad 526. Para mejorar la validez del modelo de cálculo de la peligrosidad, se ha intentado encontrar otras fuentes de datos alternativas (básicamente publicaciones) que proporcionen la información necesaria para ello, correspondiente con las unidades litológicas que queden comprendidas dentro del rango de edad que el estudio abarca. A las muestras proporcionadas por el IGME se han añadido otras 24 muestras (con código TE_{xx}) procedentes de publicaciones con el fin de ampliar el espectro de datos del que se dispone.

Como resultado de esta revisión, se ha conseguido asignar a UNIDADES un total de 550 muestras, sobre las que se ha llevado a cabo un segundo control de calidad consistente en el análisis de la homogeneidad y coherencia de las mismas. Para ello, puesto que es habitual que en la base de datos exista más de una muestra asignada a cada UNIDAD, se ha realizado el cálculo de la clasificación TAS del conjunto de ellas, con el fin de determinar si la clasificación geoquímica de las muestras para cada UNIDAD es coherente o si por el contrario existen datos anómalos en la base.

El análisis TAS se ha llevado a cabo aplicando el programa de cálculos geoquímicos *Petrograph*. La selección de este programa se ha hecho atendiendo a criterios de versatilidad y disponibilidad y al hecho de que es posible disponer de su código fuente, lo que haría posible en el futuro integrar éste en el modelo de cálculo programando los Applets o módulos necesarios, lo que evitaría la exportación de datos actual.

En aquellos casos en los que se han encontrado datos anómalos (ej. una traquita en una unidad predominantemente basáltica) se ha asumido que son erróneos (aunque debido a la falta de metadatos se desconocen las causas) y se han identificado como posibles outliers (MAPA 3).

Datos para la simulación de erupciones

Además de los datos geológicos propiamente dichos, para la generación de la cartografía de peligrosidad volcánica ha sido necesario disponer de otra serie de datos adicionales que aportan información para la generación de escenarios. Estos datos adicionales están constituidos principalmente por bases de datos físicas que indican el estado en el que se encuentran determinados elementos necesarios para llevar a cabo la simulación y por información sobre determinados parámetros eruptivos utilizados por los modelos físicos de simulación.

Se describen a continuación las bases de datos identificadas por el inventario que han entrado a formar parte del modelo de datos de cálculo de la peligrosidad.

Parámetros independientes de las características de los materiales emitidos

Modelo digital de terreno

El modelo digital de terreno constituye un elemento fundamental para la simulación de las coladas de lava, fenómeno que es el que tiene una mayor relevancia en la isla de Tenerife. Hasta los modelos físicos más simples disponibles requieren como dato de entrada la topografía con el fin de calcular el área que podría verse afectada por las coladas. Los modelos existentes representan la topografía en formato vectorial (TIN) o raster dependiendo de las preferencias de los autores o de los datos disponibles para el área de trabajo.

En nuestro caso, se dispone de un modelo digital de terreno elaborado por el Cabildo Insular de Tenerife, en formato raster y con un píxel de 10 metros, que se ha generado a partir de una cartografía a escala 1:10.000, por lo que el grado de precisión en Z es elevado, aunque dado lo escarpado de la topografía de Tenerife, podría presentar algunas limitaciones en cuanto a la precisión de los resultados de los modelos aplicados, especialmente en aquellas zonas con mayores contrastes topográficos.

De acuerdo con el plan de calidad, existe una serie de controles que resulta posible hacer a un modelo digital de terreno con el fin de garantizar la bondad de los datos que proporciona:

1. Confirmar la especificación del producto.
2. Comprobar que la zona del proyecto está totalmente cubierta y que existe continuidad en los bordes de las celdas de la rejilla.
3. Utilizar histogramas/vistas en 3D para localizar posibles picos/agujeros
4. Superponer mapas disponibles para comprobar que la georreferenciación es correcta.
5. Comprobar los valores de las esquinas y píxel central con mapas publicados.

El modelo digital del Cabildo cumple con los requisitos de calidad para su incorporación en el modelo de datos y la única posible modificación que ha sido necesaria en el mismo es su ajuste al límite común de extensión que se ha fijado para todos los datos que forman parte del modelo de datos.

Distribución de vientos

Para llevar a cabo la simulación de erupciones de tipo explosivo y, en particular, la ocurrencia de eventos de caída de piroclastos (columnas plinianas) se hace necesario disponer de datos para estimar la distribución de las cenizas emitidas en función de la altura. Para ello se requiere disponer de información sobre la dirección y la velocidad de los vientos en altura, lo que se puede obtener a partir de datos de radiosonda.

Existe una estación de radiosonda en el Observatorio de Güímar que recoge datos diarios (dos tomas a las 00:00 y 12:00 horas) de la distribución de vientos en altura desde comienzos del año 2003. La totalidad de

datos disponibles se ha descargado en ficheros que recogen esta información mensualmente. Los ficheros obtenidos se encuentran en formato texto y presentan una estructura como la que a continuación se indica:

60018 Guimar-Tenerife Observations at 00Z 11 Jan 2006

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1008.0	105	15.4	9.4	67	7.39	315	3	287.9	308.9	289.2
1002.0	153	16.2	10.2	68	7.85	4	4	289.2	311.6	290.6
1000.0	169	16.2	10.2	68	7.87	20	5	289.4	311.8	290.7
969.0	435	14.1	9.6	74	7.82	75	10	289.9	312.2	291.2
925.0	827	11.0	8.8	86	7.74	80	7	290.6	312.7	291.9
873.0	1306	7.0	6.6	98	7.05	0	0	291.2	311.5	292.4
866.0	1373	6.4	6.3	99	6.96	316	2	291.3	311.4	292.5
.....										
29.0	23818	-63.6	-92.6	1	0.00	260	46	576.4	576.4	576.4
27.0	24261	-60.6	-90.8	1	0.00	285	45	596.6	596.7	596.6
25.7	24567	-58.5	-89.5	1	0.01	275	41	611.0	611.0	611.0
25.0	24739	-58.8	-89.8	1	0.01	270	39	615.1	615.1	615.1
22.0	25536	-60.0	-91.0	1	0.00	280	39	634.3	634.4	634.3
21.0	25826	-60.4	-91.4	1	0.00	265	48	641.5	641.5	641.5
20.0	26130	-60.9	-91.9	1	0.00	275	41	649.0	649.1	649.0
17.6	26921	-62.7	-92.7	1	0.00	278	43	667.5	667.5	667.5
16.0	27510	-61.6	-92.4	1	0.00	280	44	689.3	689.4	689.3
15.5	27706	-61.3	-92.3	1	0.01			696.8	696.8	696.8

Como se puede observar, el proceso de estos datos es costoso y requiere hacer un análisis detallado sobre la forma en la que van a ser utilizados por los modelos de simulación, con el fin de garantizar que los resultados son coherentes tanto por las transformaciones que se ha realizado sobre los mismos como por los análisis estadísticos que han elaborado con el fin de generar una base de datos de vientos que pueda ser útil al propósito de la cartografía.

Para llevar a cabo la simulación de escenarios se han seleccionado todos los perfiles de vientos disponibles entre Octubre del año 2004 y Diciembre del año 2005. El motivo de esta selección es la de disponer de al menos de un año natural continuo de registro, con el fin de poder obtener la mayor variabilidad posible de vientos en la isla. Puesto que existen algunos meses en los que el registro es incompleto, se han tomado tres meses adicionales del año 2004. La descarga de datos de vientos y su transformación para la incorporación al modelo de cálculo de escenarios explosivos es una tarea que podrá ser realizada en el futuro por el IGME, lo que permitirá mejorar progresivamente la base estadística de cálculo del modelo.

Parámetros dependientes de las características de los materiales emitidos

Para poder llevar a cabo la simulación de erupciones es necesario disponer de información procedente del análisis de los datos geológicos, estructurales y geoquímicos, así como de información adicional sobre las

características de las erupciones que no se puede obtener directamente a partir de estos datos (duración, tasa de emisión, alturas de columna, etc.). Los parámetros eruptivos que se deben caracterizar vienen condicionados por las variables que requieren los modelos de simulación de erupciones que se han seleccionado para la generación de la cartografía y tanto éstos como el proceso seguido para su generación se encuentran descritos con precisión en los correspondientes apartados de esta memoria.

Debido a la escasez de eventos que ha tenido lugar en periodo histórico en la isla de Tenerife existe una información muy limitada sobre los parámetros que han intervenido en la ocurrencia de las erupciones en la misma. Las erupciones históricas han tenido además un marcado carácter efusivo básico, por lo que esta limitación es aún mayor cuando lo que se pretende es obtener información sobre erupciones efusivas sálicas y erupciones de tipo explosivo.

La caracterización paramétrica para la simulación de erupciones se ha obtenido fundamentalmente a partir del análisis de los datos geológicos, estructurales y geoquímicos incorporados en el modelo de datos, por lo que salvo para aquellas variables que es posible extraer directamente a partir de éstos (ej. densidad, temperatura de líquidos), no se ha tenido la posibilidad de realizar un tratamiento estadístico de la información, sino que se ha debido recurrir a la información publicada por terceros en las fuentes bibliográficas disponibles.

En estas condiciones, allí donde no existe información suficiente para poder parametrizar las condiciones eruptivas a partir de los datos directos de que se ha dispuesto, se ha realizado una aproximación a partir de la información de las fuentes bibliográficas que ha permitido obtener una serie de escenarios plausibles de los términos eruptivos que pueden tener lugar en la isla en el futuro. Este hecho supone un obstáculo hasta cierto punto para representar de forma probabilística el cálculo de la peligrosidad, aunque el impacto se puede limitar si la incorporación de estas variables al generador de eventos se realiza de forma estadística y aleatoria.

Erupciones efusivas

Para la totalidad de erupciones históricas se ha buscado la siguiente información relacionada con la simulación de coladas lávicas:

- número de centros emisores
- longitud de fractura (m)
- orientación fractura
- superficie cubierta (km²)
- potencia media (m)
- volumen emitido (x10⁶ m³)

- *tasa emisión (m³/s)*
- *duración (días)*
- *distancia máx. coladas (Km.)*
- *velocidad (m/s)*

Estos datos han sido utilizados principalmente para calibrar los modelos físicos de simulación de coladas lávicas puesto que al no tener validez estadística (no se puede decir que sean representativas de la totalidad de las erupciones de la isla) resulta difícil aplicarlos para la simulación probabilística. Al no existir información sobre la totalidad de estas variables para ninguna de las erupciones históricas, los datos obtenidos han permitido sólo hacerse una idea de las condiciones bajo las que ha sido necesario llevar a cabo la simulación de coladas lávicas.

Además, teniendo en cuenta que las erupciones históricas se encuentran clasificadas dentro de tipologías eruptivas básicas (máficas), esta información no está disponible para las erupciones efusivas de tipo sálico, por lo que la calibración de los modelos para este tipo de erupciones se ha basado principalmente en criterios expertos.

Para la obtención de los parámetros eruptivos necesarios para llevar a cabo la simulación de erupciones efusivas se ha recurrido a métodos alternativos de obtención de información que nos han permitido valorar el orden de magnitud de cada una de las variables que intervienen en el modelo, los cuales se presentan en el informe correspondiente con la modelización de eventos.

Para la simulación de los proyectiles balísticos que frecuentemente acompañan la emisión de lavas, se ha buscado igualmente para las erupciones históricas información sobre:

- *dimensión del cono*
- *volumen de piroclastos (m³)*
- *diámetro bombas (cm)*
- *forma bombas*
- *distancia máx. de bombas (km)*

Existe además información de tipo estadístico sobre las características básicas de los conos de cinder existentes en la isla que puede resultar útil para la simulación (Dóniz, 2001):

POBLACION DE CONOS DE CINDER EN TENERIFE

FM ANTIGUAS % CONOS	FM RECIENTES %CONOS	TOTAL %CONOS
------------------------	------------------------	-----------------

POBLACION DE CONOS DE CINDER EN TENERIFE			
PEQUEÑOS	76,92	61,21	61,91
MEDIANOS	15,39	32,03	31,29
GRANDES	7,69	6,76	6,9

CLASIFICACION MORFOMETRICA DE LOS TAMAÑOS DE LOS CONOS DE CINDER

	ALTURA (M)	VOLUMEN KM ³	AREA KM ²
PEQUEÑOS	<=100	<0,01	<0,2
MEDIANOS	>100<=200	>=0,01<=0,1	>=0,2 <=0,5
GRANDES	>200	>0,1	>0,5

Erupciones explosivas

De acuerdo con el modelo de cálculo de peligrosidad, la limitación de datos disponibles para la simulación de erupciones explosivas hace imposible el cálculo de la peligrosidad en sentido estrictamente probabilístico. Por ello, se ha propuesto como alternativa la generación de una serie de escenarios para la ocurrencia de erupciones de tipo explosivo y, en particular, para la caída de cenizas. Los modelos físicos de simulación de este tipo de eventos requieren disponer de datos de granulometría para los eventos, así como de otra serie de datos necesarios para caracterizarlos (altura de la columna, masa total emitida, coeficiente de difusividad, etc.).

En la última fase evolutiva de la isla de Tenerife (complejo Teide – Pico Viejo) se ha dispuesto de información tan sólo de la ocurrencia de una erupción en la que se emitieron este tipo de materiales: la erupción de Montaña Blanca. A pesar de que esta erupción se acerca más a una tipología sub-Pliniana que Pliniana (por lo que existe una cierta limitación en la aplicabilidad de los modelos físicos de simulación), al tratarse del único evento explosivo registrado en la última fase constructiva es conveniente tener en cuenta sus características a la hora de definir los posibles escenarios futuros. Para ésta existe alguna documentación sobre las características de los materiales emitidos, aunque las publicaciones disponibles no proporcionan información de suficiente detalle como para determinar la composición granulométrica exacta. Sin embargo, resulta posible inferir los datos poblacionales y algunas de las características de la emisión a partir de estas publicaciones (Giray, 1997), que han sido utilizados para definir los escenarios de peligrosidad que se describen en detalle en el correspondiente apartado.

Se ha recurrido también a otras referencias bibliográficas que puedan apoyar la simulación de estos eventos partiendo de datos de erupciones ocurridas durante la fase de formación del edificio Cañadas. A este respecto, la tesis doctoral de Juan José Alonso Blanco: "Estudio Volcanoestratigráfico y Volcanológico de los Piroclastos Sálidos del Sur de Tenerife" es la única publicación a la que se ha tenido acceso que ha proporcionado información suficiente para poder caracterizar los depósitos correspondientes con piroclastos

de caída en fases constructivas anteriores. Aunque existe la opinión de que este tipo de eventos no se corresponden con los que potencialmente podrían tener lugar en el futuro inmediato, es necesario tener en cuenta que el periodo de tiempo que se va a considerar para la simulación de erupciones efusivas es superior a 100Ka por lo que bien puede resultar posible que la evolución futura del sistema conduzca a la generación de eventos similares a éstos, como ya ha ocurrido en ciclos anteriores. Es por ello, que en la selección de escenarios sea sensato contemplar la totalidad de posibles eventos que pudieran tener lugar en un plazo de tiempo equivalente al considerado para las erupciones de tipo efusivo.

Por último, para la determinación de otro tipo de datos que resultan relevantes a la hora de establecer umbrales para la simulación, tanto en lo que se refiere al rango de magnitud y dimensiones de los eventos como a la del impacto de los mismos, se ha tenido en cuenta la información de eventos ocurridos en otras áreas volcánicas del planeta con experiencia reciente en este sentido, lo que ha permitido sopesar las hipótesis que se han planteado para la isla de Tenerife con escenarios reales, manteniendo siempre la perspectiva que supone comparar eventos atendiendo a las características distintivas del marco geodinámico en que se desarrollan.

Datos para la representación cartográfica

Para la representación de los resultados del cálculo de la peligrosidad se ha dispuesto de las siguientes bases de datos:

- Bases topográficas. Conjunto de cartografía de base en formato digital, elaborado por GRAFCAN. Agrupan, en 15 archivos, la información recogida en las hojas E 1:25.000 elaboradas por la citada Empresa. Entre la información contenida, hay que resaltar:
 - Curvas de nivel , incluyendo curvas maestras y de depresión
 - Puntos acotados
 - Elementos singulares del relieve: barrancos, taludes, escarpados, acantilados, etc.
 - Redes de drenaje y masas de agua
 - Edificaciones, construcciones, mobiliario urbano, límites de casco urbano,...
 - Vías de comunicación
 - Vegetación y usos del suelo

La cartografía topográfica de GRAFCAN proporciona tanto la base de representación de la cartografía de síntesis como el medio de interpretación de la posible progresión de algunos de los fenómenos volcánicos que pueden tener lugar en la isla de Tenerife (en particular aquellos cuyo avance depende en primer grado de las características de la superficie del terreno).

Modelo de fuente

El modelo de fuente refleja el área en la que existe probabilidad de que se produzcan erupciones en el futuro. Para llevar a cabo este estudio, se ha analizado la distribución de los centros emisores visibles incorporados en el modelo de datos. La base de datos de centros abarca desde las Series Antiguas hasta la actualidad, aunque por el grado de conservación y recubrimiento, la mayor parte de los centros pertenecen a las series más recientes, emitidas con posterioridad o a partir de las últimas fases del volcanismo de Cañadas.

El intervalo de tiempo que utilizan usualmente los estudios de riesgo para establecer las pautas de comportamiento que, en términos de peligrosidad, han tenido los fenómenos volcánicos varía de unas áreas volcánicas a otras y depende principalmente de las características y frecuencia con la que hayan tenido lugar las erupciones.

Por ejemplo, en los estudios llevados a cabo para evaluar el riesgo potencial en el Monte St. Helens, se analizó la totalidad del período de actividad de éste (40.000 años) aunque para la evaluación se consideró sólo el registro de los últimos 4.000 años (Crandell & Mullineaux, 1978). En contraste con este estudio, Miller (1989) analizó para la evaluación regional del riesgo en el Cascade Range (USA) el registro geológico de los últimos 100.000 años y otros autores estiman necesario analizar la historia eruptiva a lo largo de todo el período Cuaternario.

En nuestro caso, el criterio principal por el que se ha guiado la selección ha sido la necesidad de que el grado de conservación en el que se encuentran los centros y los productos emitidos por éstos sea lo suficientemente bueno como para poder llevar a cabo una identificación y localización correcta de los mismos.

El período de tiempo que abarcan los datos de que se dispone varía de unos puntos a otros de la isla para una misma unidad, pero supera en muchas áreas el pleistoceno superior, que es el que en mayor número de casos se fija como base para la realización de los estudios de riesgo.

El número total de centros considerados es de 764, de los cuales 120 se encuentran ubicados en las Series Antiguas, 109 pertenecen a la serie Cañadas, 266 a la denominada serie III de MAGNA (volcanismo post-Cañadas) y 269 al volcanismo desarrollado durante la última fase de actividad de la isla (desarrollo del complejo Teide-Pico Viejo), incluidas las erupciones históricas.

Definición de evento

Para llevar a cabo la estimación de la probabilidad espacial de ocurrencia de eventos se ha procesado en primer lugar la base de datos de centros eruptivos con el fin de que sea posible obtener una serie de

alternativas de cálculo sobre las cuales se ha decidido en última instancia cuál es la más adecuada para su utilización en el generador de eventos.

Un primer paso que es necesario llevar a cabo antes de comenzar con los cálculos es el de definir lo que se entiende por evento en este caso. La base de datos de centros eruptivos de la que partimos para llevar a cabo el cálculo de la probabilidad recoge los centros emisores discretos que son visibles, puesto que la limitación de datos de que se dispone sobre fisuras eruptivas (como se ha planteado en el apartado de inventario de datos) desaconseja su utilización en la estimación de la probabilidad espacial.

A pesar de que se dispone de datos limitados, es posible definir los eventos volcánicos de varias formas. Por una parte, se puede considerar que cada centro emisor es un evento, o bien, se puede considerar que los centros emisores agrupados y pertenecientes a una misma unidad representan todos ellos un único evento, siempre y cuando la edad de esta unidad sea lo suficientemente restringida.

Puesto que la base de datos de centros eruptivos recoge datos de erupciones que han tenido lugar fundamentalmente a lo largo del registro geológico, es difícil interpretar si las agrupaciones de centros que pertenecen a cada una de las UNIDADES volcanológicas identificadas se corresponden a eventos individuales o a un único evento, ya que los centros pueden agruparse de diversa forma dependiendo de su edad y distribución. Sólo en el caso de las erupciones históricas es posible llevar a cabo este tipo de agrupación sin riesgo de cometer errores. Por tanto, para tener una cierta seguridad en el modelo de análisis a seguir, se ha debido primero determinar los patrones de agrupación que siguen los centros emisores en la isla.

Como se ha presentado en apartados previos, en la isla de Tenerife se ha producido una evolución temporal y espacial del volcanismo desde los comienzos de su evolución subaérea. Además, a lo largo de este proceso evolutivo, se ha generado simultáneamente una “especialización” en la que entran en juego dos tipos de volcanismo: el central y el fisural monogenético.

Para tener en cuenta todos estos hechos y valorar en qué medida se deben utilizar los centros/eventos que forman parte de la base de datos en el análisis de la probabilidad espacial, se ha decidido segregar la base de datos en varios set, cada uno de los cuales representa los siguientes datos:

1. Por una parte, de la totalidad de centros visibles se han individualizado aquellos que se relacionan con el volcanismo central, con independencia de la composición que presenten. Esta clasificación se ha hecho teniendo en cuenta los campos que incorpora la base de datos. Los centros que aparecen en la base de datos pertenecen a dos periodos eruptivos:
 - Centros asociados con el edificio Cañadas (34), equivalentes con la clasificación C2 de la base de datos de centros.

- Centros asociados con la construcción del complejo Teide – Pico Viejo (98), correspondientes con la clase C5.
2. Por otra parte, se han separado los centros relacionados con la ocurrencia de volcanismo de tipo efusivo, fisural y monogenético (632), los cuales a su vez se han clasificado de acuerdo con un criterio que los relaciona con la edad del volcanismo al que están asociados, con lo que se crean cuatro subconjuntos de datos:
- Centros asociados con las Series Antiguas (120), correspondientes con la clase D1.
 - Centros asociados con la formación y desarrollo del edificio Cañadas (75), correspondientes con la clase D2.
 - Centros post-Cañadas, pero anteriores a la formación del complejo Teide-Pico Viejo (266), subdivididos además en dos subseries, D3 (144) y D4 (122), que se han diferenciado en función de sus posiciones estratigráficas, como dos fases constructivas diferentes.
 - Centros recientes, coetaneos con la formación del complejo Teide – Pico Viejo, incluyendo las erupciones históricas (171), equivalentes a la clase D5.
3. Por último, se ha mantenido también como conjunto de datos la totalidad de los centros eruptivos, con independencia de la época o el mecanismo eruptivo al que pertenezcan.

El propósito que se ha perseguido con la generación de estas bases de datos independientes es el de verificar si se ha producido en realidad una evolución espacial de ubicación de erupciones a lo largo de la evolución de la isla o, si por el contrario, las erupciones han tenido lugar en cualquier punto de la isla independientemente de la época evolutiva que consideremos. Este dato es necesario con el fin de determinar cuál es el modelo de fuente más adecuado al propósito de nuestro análisis.

Análisis de la distribución de los centros eruptivos

Para estimar el área probable de erupción a partir de estos datos es fundamental determinar en primer lugar si la distribución que presentan obedece a algún tipo de patrón definido o bien es aleatoria, ya que si se cumpliera esta segunda condición, significaría que las erupciones pueden tener lugar en cualquier punto de la isla y por lo tanto el análisis del área probable de erupción no sería concluyente.

El análisis del patrón de distribución de los puntos se ha realizado aplicando dos métodos ampliamente utilizados: el del número de "vecinos reflexivos" (reflexive nearest neighbours) y el de la distancia media al vecino más próximo (mean distance to nearest neighbour).

El primer método, clasificado dentro lo que se conocen como medidas de agrupamiento de poblaciones, se utiliza para examinar las características que tiene cada uno de los puntos con respecto al resto de los que componen la población. Se definen como vecinos reflexivos de primer orden aquellos pares de puntos que

cumplen la condición de ser los más próximos entre sí. Este concepto se extiende para identificar vecinos reflexivos de órdenes superiores (Boots & Getis, 1988).

Una forma simple de analizar la forma en la que se organizan los puntos es comparando el número de vecinos reflexivos existentes en la población objeto de estudio con el número que se obtiene cuando nos encontramos con una situación de aleatoriedad espacial completa (Complete Spatial Randomness, CSR), la cual se estima a partir de una serie de patrones preestablecidos.

Si el número de vecinos reflexivos de orden superior resultante del análisis de la población es mayor al esperado en caso de aleatoriedad absoluta, la población se encuentra distribuida de acuerdo con un patrón regular. Si el número es inferior indica tendencia al agrupamiento y si es aproximadamente del mismo orden, la distribución es aleatoria.

El segundo método, que es complementario del anterior, pertenece a las denominadas medidas de dispersión, las cuales examinan las características de los puntos con respecto al área en que se distribuyen. El análisis consiste en este caso en medir las distancias existentes entre los vecinos más próximos de varios órdenes y compararlas con las que se encontrarían en una situación de aleatoriedad absoluta.

Si las distancias resultantes de este análisis son inferiores de las que presenta la distribución aleatoria, los puntos están agrupados, mientras que si son superiores el patrón de distribución es regular (Boots & Getis, 1988).

Debido a la falta de un test que permita establecer el nivel de significación de los resultados, el procedimiento que se utiliza comúnmente para asegurar la corrección de la evaluación consiste en generar una población distribuida de forma aleatoria y otra de forma regular, del mismo orden de magnitud que la nuestra, y comparar los resultados obtenidos al realizar estos análisis.

El análisis de la distribución de centros se ha realizado para cada uno de los casos que se han propuesto en el apartado anterior, con los siguientes resultados:

1. En cuanto a los análisis realizados para los centros asociados con el volcanismo central, se han obtenido los siguientes resultados:
 - Los centros asociados con el volcanismo poligenético del edificio Cañadas muestran una distribución claramente agrupada, aunque es importante tener en cuenta que la totalidad de ellos se corresponden con diques o pitones fonolíticos aflorantes en la caldera de las Cañadas, lo que sin lugar a dudas es el origen de este resultado. Sin embargo, éstos no son una muestra representativa de esta fase constructiva de la isla, por lo que se ha decidido no tenerlos en cuenta en el análisis de la probabilidad espacial.

- Para los centros asociados con el volcanismo central asociado con Teide-Pico Viejo, el resultado de los análisis de las medidas de agregación y dispersión pone de manifiesto que presentan un patrón agrupado, por lo que este conjunto de datos es viable para la realización de un análisis de distribución probabilística espacial.
2. En cuanto a los análisis realizados para los centros asociados con el volcanismo fisural/monogenético, se han obtenido los siguientes resultados:
- El volcanismo asociado a las Series Antiguas presenta una distribución próxima a la aleatoria, lo que unido al mismo hecho que al del volcanismo poligenético Cañadas, da lugar a que resulte recomendable no tenerlos en cuenta de forma individual para el análisis de patrones de probabilidad espacial. Este resultado se justifica teniendo en cuenta que existe muy poca información sobre la distribución de centros emisores debido a la antigüedad de las series a las que pertenecen.
 - Los centros eruptivos que se encuentran asociados temporalmente al volcanismo durante el episodio de Cañadas sí presentan un patrón de distribución agrupado, aunque éste se revela principalmente cuando se tienen en cuenta los vecinos de orden superior al tercero, lo que parece indicar que centros próximos entre sí pertenecen a un mismo evento.
 - En cuanto a los centros emisores de edad post-Cañadas, presentan un comportamiento similar a los anteriores en las medidas de CSR, si bien las medidas de dispersión de centros presentan un claro comportamiento agrupado, por lo que podríamos llegar a conclusiones similares.
 - Por último, los centros correspondientes con la última fase constructiva de Tenerife presentan un comportamiento “errático” en lo que a las medidas de agregación se refiere (con lo que su distribución podría asimilarse a la aleatoria), aunque las medidas de dispersión indican un claro agrupamiento. La interpretación de estos resultados indicaría que, aunque existen zonas preferentes de ubicación del volcanismo fisural reciente, dentro de éstas la ubicación de los eventos no sigue un patrón predominante, lo cual puede deberse a la escasez del registro en comparación con los datos existentes para otros grupos.
 - Con el fin de garantizar que las poblaciones analizadas son adecuadas, se han realizado dos test adicionales: se ha considerado de forma conjunta, por una parte todos los centros asociados al volcanismo fisural y por otra el de los episodios posteriores a las series antiguas con independencia de su origen. Ambos grupos de datos se comportan de forma similar al conjunto de centros de los episodios Cañadas y

post-Cañadas, por lo que se ha llegado a la conclusión de que el tipo de patrones que se detectan no proceden de “artefactos” de la distribución, sino que realmente tienen un significado específico.

3. Por último, se ha realizado el análisis CSR para la totalidad de los centros eruptivos visibles, con resultados similares a los de todos los casos anteriores.

Se concluye por tanto que los resultados obtenidos del análisis parecen indicar que el patrón de distribución de erupciones es de tipo agrupado (con excepción de las Series Antiguas), independientemente de la clasificación que se haga de los centros, lo que es coherente con estudios previos que se han llevado a cabo sobre una distribución similar de datos (Gómez Fernández, 1997). En cuanto a los resultados obtenidos del cálculo de las medidas de dispersión, permiten concluir que, globalmente, los centros eruptivos en Tenerife no se distribuyen de forma aleatoria sino ocupando áreas preferentes, por lo que los resultados del cálculo del área probable de erupción podrán interpretarse como significativos. Estos resultados están de acuerdo con las observaciones realizadas por distintos autores sobre la disposición preferente de los centros eruptivos en Tenerife.

Por otra parte, el hecho de que en el análisis de CSR todos los conjuntos de datos presenten un mayor patrón agrupado en los órdenes de análisis superior parece ser indicativo de que en las distancias inferiores, los centros se distribuyen de forma más cercana a la aleatoria, mientras que en distancias superiores a un determinado radio las distribuciones son claramente agrupadas. Esta singularidad se puede deber a los siguientes factores:

- a) Es posible que la forma de la distribución indique que para cada una de las UNIDADES los centros siguen una distribución relativamente aleatoria (apertura de vents) a favor de las fisuras que se abren durante el proceso eruptivo, mientras que la distribución de los grupos de centros entre distintas UNIDADES, parece seguir un patrón claramente agrupado. Esto explicaría el comportamiento errático de los centros emisores recientes puesto que, al presentar un mejor grado de conservación, se ponga de manifiesto de forma mucho más llamativa esta tendencia de distribución de los centros según se trate de UNIDADES o de centros dentro de cada UNIDAD.
- b) Sin embargo, hay que tener en cuenta que en el análisis los centros se consideran como puntos adimensionales, por lo que no se valora el hecho de que muchos se generan a favor de fisuras que en muchos casos pueden llegar a tener varios kilómetros. Por este motivo, si se pondera el hecho de que las distancias calculadas entre centros para los órdenes inferiores en muchas ocasiones se aproximan a las dimensiones totales que pueden tener los conos, es fácil asumir que en realidad lo que ocurre es que en esos órdenes de análisis, la dimensión del fenómeno supera a la que se asume con el análisis adimensional.

La decisión definitiva sobre el modelo más conveniente a considerar por el generador de eventos (i.e. centros emisores identificados en la base de datos como un evento independiente del resto o UNIDADES) ha venido determinado por la combinación de estos resultados con los del análisis del modelo de recurrencia. Sin embargo, para la elaboración del modelo de fuente, se ha decidido formalmente que dadas las características de los eventos que estamos considerando y su dimensión espacial, se puede considerar como válida la hipótesis de que los centros son asimilables de forma independiente como eventos.

Además, puesto que no es posible establecer a priori un criterio claro que permita determinar cuál de los conjuntos de datos seleccionados es el más adecuado para la generación del modelo de fuente, se ha decidido realizar el análisis sobre la totalidad de los mismos (con la excepción de las Series Antiguas y el volcanismo poligenético asociado al Edificio Cañadas), con el fin de decidir con posterioridad el conjunto o conjuntos utilizados por el generador de eventos.

Metodología para el cálculo de la probabilidad espacial

Para llevar a cabo el cálculo de la probabilidad espacial que existe en el futuro de que se produzcan erupciones en la isla de Tenerife, se han aplicado dos métodos alternativos: el proceso Cox y estimadores de Gauss. Se ha decidido aplicar dos procedimientos diferentes con el objeto de tener un criterio comparativo de los resultados que ofrecen dos aproximaciones diferentes al problema y poder seleccionar de éstas la que se considera más adecuada al estudio de la peligrosidad volcánica en Tenerife.

Funciones de densidad – el Proceso Cox

Según la aproximación de Cox al cálculo de la probabilidad espacial, la posición que adoptarán los centros de emisión en el futuro dependerá en primer lugar del campo de esfuerzos en profundidad y de la estructura de la isla. Si se asume que la no aleatoriedad de la distribución que presentan nuestros centros se deriva de la existencia de un entorno estocásticamente heterogéneo, se puede aplicar el denominado proceso Cox (Diggle & Milne, 1983) para formular matemáticamente la situación.

El proceso Cox asume que, en cada punto y en cada instante, hay un ratio intrínseco al que se producen erupciones, el cual se puede describir por medio de una función de intensidad. La probabilidad de que un punto se convierta en un futuro centro de emisión está determinada exclusivamente por los centros pasados que se encuentren situados a una distancia específica (r), de tal forma que la probabilidad será mayor cuanto mayor sea la proximidad a los centros ya existentes.

En consecuencia, la forma más simple de establecer la intensidad de erupción en cualquier punto X es calculando la suma ponderada con la distancia del número de erupciones en su entorno local, por lo que éste es el método que se ha decidido utilizar para la estimación de la probabilidad espacial. Para incorporar el efecto que la distancia desde los centros conocidos ejerce sobre la probabilidad, se pondera el mapa

resultante con un mapa de “resistencia”, que representa la inversa de la distancia desde los centros conocidos.

La elección de la distancia (r) que se utiliza como parámetro de ponderación varía de unos estudios a otros. Puesto que el estimador se basa en la idea de que las erupciones tienden a concentrarse en zonas preferentes de debilidad estructural, en nuestro caso hemos utilizado como estimador la distancia media entre todos los centros seleccionados.

Esta serie de procesos genera como resultado una superficie de probabilidad en la que las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de erupciones son las que presentan una mayor concentración media de centros.

Estimadores de densidad Gaussianos

La base estadística de los estimadores de densidad Gaussianos aparece desarrollada en Connor & Hill (1995) y Connor et al. (2000). De forma sencilla, los estimadores de densidad en ventanas o kernels se utilizan para calcular una superficie de probabilidad directamente a partir de la localización y edad de eventos volcánicos discretos ocurridos en el pasado. Como resultado, este tipo de estimadores son sensibles a la forma en la que éstos se distribuyen, como agrupamientos o clusters, los cuales se observan frecuentemente en los campos volcánicos. Además, estas distribuciones no suelen presentar los cambios abruptos de la probabilidad que aparecen en los modelos de tipo homogéneo, por lo que se elimina por lo general la necesidad de definir zonas de actividad volcánica.

Los modelos Gaussianos definen una ventana de trabajo del tipo:

$$K_i = 2 \pi \exp [-1/2 (d_i/h)^2]$$

Donde d_i es la distancia desde el punto X hasta el volcán i y h es el parámetro de suavizado.

La tasa de recurrencia espacial de los eventos volcánicos en 1 km^2 alrededor del punto X , dada la ocurrencia de un evento en el sistema, viene dado por:

$$\text{Lambda}(X) = 1/(nh^2) \sum_{\text{from } i=1 \text{ to } n} K_i$$

El factor de suavizado controla la forma en la que la probabilidad se distribuye entorno a eventos existentes, los cuales se tratan como procesos puntuales. Utilizar un factor de suavizado pequeño tiende a concentrar la probabilidad cerca de los volcanes existentes, mientras que un factor grande produce un efecto más distribuido sobre la totalidad del área. Aunque los métodos de cálculo del factor de suavizado son diversos (al igual que en el caso de Cox), en general se asume que el estudio de la distribución que analiza la distancia a los vecinos más próximos suele ser útil para extraerlo.

Desarrollo del modelo de fuente

Se presenta a continuación el procedimiento que se ha seguido para la generación de los modelos de fuente para Tenerife aplicando ambos métodos de cálculo.

Estimación de la probabilidad espacial por procedimiento de Cox

La estimación de la probabilidad espacial siguiendo el procedimiento de Cox se ha llevado a cabo para cada uno de los grupos de centros que se han individualizado y que se identifican en el apartado anterior. El primer proceso que se hace necesario ejecutar es el cálculo de las distancias umbral que serán tenidas en cuenta para la valoración de la probabilidad. Para ello, se ha aplicado una función que mide la distancia más corta entre cada centro y el que se encuentra ubicado más próximo y después calcula la media de todas estas distancias (average nearest neighbor distance). Esta función se ha aplicado para cada uno de los centros hasta orden 6, debido al comportamiento que se ha visto que presentan en apartados anteriores. Puesto que el objeto del análisis es el obtener una tendencia regional de probabilidad espacial y además se ha observado que los agrupamientos de centros son más claros cuanto mayor es el orden del vecino considerado, se ha tomado para cada uno de los grupos de datos la distancia mínima de los vecinos más próximos de sexto orden. Los resultados obtenidos de la aplicación de esta función son los siguientes:

SERIE	DISTANCIA MEDIA (m)
Series Antiguas (D1)	N/A
Serie Cañadas poligenético (C2)	N/A
Serie Cañadas monogenético (D2)	4.500
Serie post-Cañadas I (D3)	2.000
Serie post-Cañadas II (D4)	2.200
Series recientes e históricas (D5)	2.000
Teide – Pico Viejo (C5)	1.500
Total de volcanismo dorsal (D2-D5)	2.000
Total volcanismo dorsal post-Cañadas (D3-D5)	2.000
Total de volcanismo post-Cañadas (D2-D5 + C5)	1.800

Una vez estimada la distancia media intercentros, se ha procedido a calcular la densidad de centros existentes. La función de cálculo de densidad aplicada define un vecindario alrededor de cada una de las celdas del mapa resultante y el número de puntos que caen en el vecindario se totaliza y divide por el área del vecindario. El valor del radio en el que se analiza la densidad de centros influye en el grado de generalización que se obtenga para el mapa de salida, por lo que puesto que estamos tratando con fenómenos de distribución regional, puede ser preferible que éste sea algo mayor que las distancias entre centros. El resultado es un mapa que determina el número de centros por unidad de área, siendo ésta por defecto el kilómetro cuadrado.

Una vez obtenida la densidad de centros por kilómetro cuadrado, existen diversas alternativas para introducir el factor de peso o de contribución de los centros en función de la distancia. De las varias opciones posibles (introducción de factores de resistencia, introducción de funciones de peso en función de la distancia, estadísticas regionales), se ha obtenido que el mejor resultado en términos de correlación con las distribuciones se obtiene aplicando un filtro de mediana con un tamaño de radio equivalente al de la distancia media entre centros calculada en pasos anteriores. Este tipo de algoritmo lo que produce es una generalización de los resultados de la densidad, con lo que extrapola de forma adecuada el comportamiento representado de forma puntual por los centros eruptivos a la región en la que se ubican.

Los resultados obtenidos se han analizado con el objeto de determinar cuáles son los que representan de forma más aproximada el conocimiento que se tiene del comportamiento de la realidad de la isla. Como resultado de este análisis, se ha observado que, como era previsible, los resultados obtenidos por aquellos agrupamientos en los que se ha utilizado para el cálculo los centros correspondientes con el edificio Cañadas producen una distorsión en la probabilidad espacial, apareciendo como regiones de alta probabilidad de ocurrencia de eventos zonas en las que ya desde la finalización del ciclo Cañadas no se ha producido ninguna otra actividad. Sin embargo, aquellos agrupamientos en los que se utilizan las series post-Cañadas indican en todos los casos áreas en las que es previsible que se pudieran producir eventos en el futuro.

Se ha decidido considerar para la generación del modelo de fuente los resultados obtenidos para cada uno de los agrupamientos por separado excepto en el caso de las series D3 y D4¹. La razón para considerar las series de forma independiente procede del hecho de que al estar considerando como fuente de datos la ubicación de los centros emisores visibles, a mayor antigüedad de los datos, mayor es la probabilidad de que se haya producido un recubrimiento de los mismos, con lo que el peso que se debe de atribuir a cada una de las series en la generación del modelo de fuente no puede ser equivalente.

¹ La separación de las series D3 y D4 desde el punto de vista del análisis de la aleatoriedad de la distribución de centros ya no tiene sentido a la hora de elaborar el modelo de fuente, puesto que pese a que la distribución temporal de los materiales de las mismas cubre un largo periodo de la historia de Tenerife, los diversos autores que han analizado la historia de la isla la consideran como un conjunto de eventos que se han generado bajo un mismo régimen y que pertenecen al mismo ciclo eruptivo.

Para la asignación de pesos a cada una de las series se ha utilizado como procedimiento por una parte un análisis del porcentaje de recubrimiento de los materiales de cada una de las series, considerando la superficie total de UNIDADES de cada serie frente a la superficie total de UNIDADES que contienen centros visibles. En segundo lugar, se ha utilizado como fuente de información la publicación de Ancochea et al. (1990) en la que se hace una estimación de tasas de emisión y volúmenes correspondientes para cada una de las series equivalentes a las que se han utilizado en este estudio. Como resultado de estos dos análisis, se concluye que los pesos que se deben atribuir a cada una de estas series para la generación del modelo de fuente son los siguientes (MAPA 5):

MFUENTE_COX: $D3D4*1+D5*1/3+ C5*0.5$

Estimación de la probabilidad espacial mediante Kernels Gaussianos

El análisis de la probabilidad espacial mediante kernels o ventanas Gaussianos se puede llevar a cabo utilizando para ello un programa desarrollado por el Centro de Análisis Regulatorios de Residuos Nucleares (Center for Nuclear Waste Regulatory Análisis) denominado PVHA_YM (Probabilistic Volcanic Hazard Assessment) en su versión 1.0 (Connor, 2000). El programa se compone de cuatro applets de java que se utilizan para estimar la probabilidad de las erupciones volcánicas en el punto de interés utilizando kernels Gaussianos y crear mapas de la distribución probable de eventos futuros. El programa PVHA_YM requiere Java Virtual Machine versión 1.1 o superior y un visualizador de Internet (Netscape, Explorer) y es independiente de la plataforma.

El programa PVHA_YM se ha utilizado en Yucca Mountain para generar los mapas de probabilidad de ocurrencia espacial de eventos. El problema que se plantea en este caso es que la ejecución del mismo tiene lugar de forma externa a ArcGis, requiere la generación de ficheros de datos con un formato interno complejo que hay que generar ex profeso y que está diseñado para llevar a cabo su ejecución en un visualizador de Internet (Web Browser), por lo que la salida que se obtiene es gráfica y no en disco, lo que limita también el tamaño del píxel con el que se puede trabajar. Por ello, con el objeto de que sea posible hacer un uso más adecuado del programa PVHA_YM, se ha modificado la programación del Applet para que en lugar de generar una salida gráfica se obtenga un fichero que sea posible importar en ArcGIS.

El análisis de la probabilidad espacial mediante este método se ha llevado a cabo para las mismas series equivalentes que se han utilizado para el método de Cox. Puesto que el programa de cálculo de la función de densidad requiere un área o extensión sobre la que calcularla, se introducen en cada una de las pasadas del modelo los límites del modelo digital de terreno utilizado, que es la capa que se ha elegido como referencia para la realización de todos los cálculos.

El programa PVHA_YM necesita además la introducción de dos parámetros para la generación de salidas: el número de intervalos de probabilidad que se desea generar y el factor de suavizado que se quiere aplicar. En la siguiente tabla, se presentan los parámetros utilizados para realizar el análisis de cada una de las series.

Serie	Parámetros	Correspondencia
Serie_1	Intervalos 20, Smooth 5	Serie c5
Serie_2	Intervalos 20, Smooth 10	Serie d2
Serie_3	Intervalos 20, Smooth 5.5	Serie d3
Serie_4	Intervalos 20, Smooth 6	Serie d4
Serie_5	Intervalos 25, Smooth 5.5	Serie d5
Serie_6	Intervalos 25, Smooth 6	Serie d3d4
Serie_7	Intervalos 20, Smooth 5.5	Serie d3d4d5
Serie_8	Intervalos 25, Smooth 4	Serie d2d3d4d5
Serie_9	Intervalos 25, Smooth 4	Serie c5d2d3d4d5

Las salidas que genera PVHA_YM representan isolíneas de probabilidad. Al igual que en el caso anterior, los resultados obtenidos se han analizado uno a uno con el objeto de determinar cuáles son los que representan de forma más aproximada el conocimiento que se tiene del comportamiento de la realidad de la isla. Como resultado de este análisis, se ha observado que, en este caso, todas aquellas series que consideran centros con una antigüedad superior a la del complejo Teide-Pico Viejo presentan unos máximos de probabilidad espacial situados en áreas alejadas de las que han concentrado de hecho la misma, por lo que se ha decidido descartar todas ellas. Estos resultados no se han conservado en la estructura definitiva del proyecto.

Para el caso de las series recientes (C5 y D5), se obtiene una superficie sin desplazamientos o anomalías en la ubicación de los máximos y con mayor continuidad de datos que para el modelo de Cox. El gradiente de probabilidad obtenido es además mucho más suave que en ese caso, lo que indica un potencial predominio de los valores regionales sobre los locales, lo cual tiene sentido dada la importancia que en este caso adquiere la función de suavizado en el análisis. Sin embargo, la presencia en ambos casos de posibles anomalías en determinados puntos tanto de la isla como externos a la misma, ha determinado que en esta ocasión se haya preferido utilizar los datos resultantes del análisis de Cox, lo cual no significa que los obtenidos por Gauss sean inválidos sino que no se dispone de información suficiente como para analizar los resultados en detalle en el marco del presente proyecto. La incorporación al modelo de fuente de los datos

procedentes del análisis de Gauss podrá llevarse a cabo en el futuro, cuando se disponga de una mayor cantidad de información que permita realizar una mejor interpretación de los mismos.

En cualquier caso, al igual que para el modelo de Cox, se ha generado el modelo de fuente completo a partir de los resultados del análisis de ambas series, aunque en este caso, dado que las dos proceden de centros relacionados con el volcanismo reciente, el peso que se ha dado a ambas ha sido equivalente, por lo que el modelo generado se ha obtenido aplicando la fórmula:

$$\text{MFUENTE_GAUSS: } D5^{1/3} + C5^{0.5}$$

Modelo de recurrencia

El objeto que se ha perseguido con el desarrollo del modelo de recurrencia es el de proporcionar al generador de eventos la base sobre la cual se han determinado el número de simulaciones que llevar a cabo con el fin de reproducir los escenarios que pueden tener lugar en la isla durante un periodo eruptivo determinado.

La definición del periodo de recurrencia ha sido siempre una de las materias más complejas de valorar en el estudio de la peligrosidad volcánica, debido a la escasez de datos de que se dispone en general (y en particular para la isla de Tenerife) y a la falta de un modelo bien establecido que permita determinar las pautas del comportamiento eruptivo en una zona activa (por contraste con otros riesgos naturales, como el sísmico, donde la metodología está bien definida).

A lo largo de este apartado se presenta la propuesta de modelo que se ha definido para el estudio de la peligrosidad volcánica en la isla de Tenerife. Se ha partido para ello del numeroso volumen de publicaciones que existe para otras áreas volcánicas activas del planeta, adaptando las metodologías disponibles al volumen y características de los datos de partida (base de datos de geocronología) e intentando mantener la coherencia del tratamiento estadístico de los mismos, con el fin de que la propuesta sea consistente, aunque pueda incorporar unos márgenes de error importantes derivados de la naturaleza de estos datos.

Metodología de análisis

Como se ha presentado anteriormente desde que comenzaron a valorarse los patrones de comportamiento de los fenómenos eruptivos, ha habido una gran cantidad de intentos y de métodos diseñados para intentar encontrar patrones específicos de ocurrencia de erupciones para volcanes específicos o para la actividad global.

La primera conclusión que se extrae del análisis del volumen de publicaciones recopiladas para la realización de este estudio es que los datos de las erupciones no pueden ser utilizados de forma indiscriminada, puesto que de esta forma resulta imposible extraer ningún tipo de función de correlación que permita determinar el posible comportamiento eruptivo de las áreas volcánicas.

Los dos principales modelos de función que se han adaptado con cierto éxito en el análisis de los periodos de recurrencia eruptivos son los de tipo Poisson y la Binomial negativa. La aplicación de cualquiera de estos métodos requiere disponer de un volumen de datos suficiente (una buena muestra) que permita determinar la tasa de actividad. En la mayor parte de los casos, los análisis se han realizado sobre volcanes con un registro histórico amplio y bien documentado, mientras que los datos del registro geológico raramente han sido utilizados.

En la isla de Tenerife, el caso es justamente el opuesto, puesto que el número de erupciones en periodo histórico es muy reducido y no es suficiente para determinar periodos de recurrencia con validez estadística. Por ello, se ha decidido recurrir a los datos obtenidos por medio de dataciones geocronológicas para incrementar el volumen de la muestra de que se dispone. Estos datos se han complementado con las erupciones históricas, por lo que a priori se ha dispuesto de una población compuesta de 71 datos.

El siguiente problema al que se enfrentan los estudios de recurrencia es el determinar la magnitud de las erupciones que se van a utilizar para el análisis. En el caso que nos ocupa y puesto que la práctica totalidad de dataciones se ha realizado sobre coladas de lava, se han asimilado todos los eventos a una misma magnitud, que en realidad puede oscilar entre VEI 2 y 3, pero que con el fin de mantener la muestra lo más amplia posible se ha preferido considerar como única. Esta decisión se ha tomado sobre la base de la dificultad que supone la interpretación de los datos del registro geológico en lo que se refiere a la asimilación de las UNIDADES identificadas con uno o más eventos, como ya se ha comentado en apartados anteriores, por lo que de partida existe una dificultad inherente por la tipología de datos disponibles para la correcta asignación de magnitud a las UNIDADES.

Además, en este rango de magnitudes y para el fenómeno considerado, la diferencia fundamental que supone el que los eventos se asignen a uno u otro rango estriba en los volúmenes de materiales emitidos y las tasas de emisión de los mismos, factores que se han considerado convenientemente en el proceso de simulación y en la introducción de las variables aleatorias que forman parte del generador de eventos, por lo que de forma indirecta, se ha considerado en la realización de la cartografía la variabilidad en la magnitud de los eventos.

Para determinar si es posible asignar un periodo de recurrencia con representatividad estadística a las muestras de que se dispone, se ha realizado en primer lugar un análisis que ha tenido como objeto determinar si los datos siguen un patrón de actividad de tipo Poissoniano. La elección de este modelo frente al binomial se plantea dado el hecho de que ha resultado ser el que mejor resultados ha proporcionado en otros estudios gracias a la facilidad que supone el análisis de sus datos.

La distribución de Poisson establece que para un mismo nivel de magnitud eruptiva, el patrón de ocurrencia de los fenómenos eruptivos sigue una distribución de la forma:

$$P(x) = \lambda^x e^{-\lambda}/x!$$

Donde λ es la tasa media de ocurrencia de erupciones por unidad de tiempo, es decir, el número total de erupciones de una determinada magnitud dividido por la duración total del periodo analizado y $p(x)$ es la probabilidad de que X erupciones se puedan producir en un determinado intervalo de tiempo.

Para comprobar si el volcanismo en Tenerife (al menos aquel para el que se dispone de información geocronológica) ha seguido un patrón de comportamiento de este tipo se ha realizado un análisis basado en el propuesto por De la Cruz-Reyna (1993) para el volcán Colima.

Una vez determinado si la distribución de Poisson es aceptable para el conjunto de datos de que disponemos, nos hemos encontrado en disposición de determinar cuál es el número de erupciones esperables en un determinado periodo de cálculo de nuestro interés (utilizado por el generador de eventos). Sin embargo, para reforzar el resultado obtenido en esta tarea, se ha procedido de forma adicional a estimar dos cuestiones que son importantes en el análisis del comportamiento eruptivo de la isla de Tenerife:

1. La distribución de los periodos de reposo y su variación y
2. El análisis de la dependencia temporal de las secuencias eruptivas que se han identificado en la isla.

El primer análisis ofrece una forma de contrastar los resultados obtenidos por el ajuste de las distribuciones de Poisson utilizando un método alternativo de valoración del número de eventos que deberán ser tenidos en cuenta para la simulación. En principio es esperable que los resultados sean del mismo orden de magnitud, aunque el estudio de la distribución de los periodos de reposo va a permitir determinar el grado de error del dato obtenido de número de erupciones esperables.

El segundo análisis conduce a determinar hasta qué punto es posible que la tasa de erupción haya cambiado con el tiempo y por tanto siga también este comportamiento en el futuro. Este tipo de comportamiento es habitual en muchos volcanes y de hecho se interpreta que el proceso aleatorio compuesto que corresponde a series de Poisson sucesivas con diferentes tasas de ocurrencia es en sí mismo un proceso de Poisson cuya tasa media de ocurrencia es la media ponderada con el tiempo de las medias de las series individuales. El conocimiento de si existe tal tipo de comportamiento en la isla es fundamental a la hora de valorar la validez de los resultados obtenidos.

Este último análisis resulta clave a la hora de determinar qué proporción del total de eventos simulados se corresponde con eventos asociados al volcanismo central y con el volcanismo fisural/monogenético. Los resultados de este estudio han servido para alimentar el generador de eventos y establecer en qué zonas de la isla tendrá una distribución preferente los eventos de cada tipo.

Preparación y tratamiento de datos: hipótesis de trabajo

El primer paso a seguir antes de desarrollar el modelo de recurrencia consiste en la preparación de los datos de que se dispone con el fin de que sea posible realizar el análisis estadístico de los mismos.

Para el análisis y desarrollo del modelo de recurrencia eruptiva de Tenerife se ha partido de los datos geocronológicos integrados en el modelo de datos del proyecto. Estos datos incorporan tanto dataciones geocronológicas, como las fechas disponibles para los eventos ocurridos en periodo subhistórico e histórico.

Para realizar el tratamiento estadístico, se han asociado las edades de las dataciones disponibles con las UNIDADES a las que pertenecen. Una vez realizada esta asociación, se ha tomado la información sobre la

edad máxima, mínima y desviación media de cada una de ellas. Además, se ha incorporado en una misma tabla el número de centros eruptivos asociados a una misma UNIDAD y el estilo eruptivo de los mismos. De esta forma, se ha obtenido información sobre la edad y número de centros de cada una de ellas. Existe un gran número de UNIDADES que no tienen correspondencia con los datos geocronológicos o para las que no hay centros eruptivos. A estas unidades sin datos se les ha aplicado el siguiente tratamiento:

- Todas aquellas UNIDADES correspondientes con las Series Antiguas y la serie Cañadas hasta Diego Hernández se han eliminado del cálculo, puesto que se considera que el comportamiento eruptivo de la isla durante estos periodos debería de ser, de acuerdo con la información disponible, diferente del actual.²
- Se han eliminado también todas las UNIDADES relacionadas con materiales de tipo sedimentario o de origen antrópico.
- Puesto que en la tabla de UNIDADES se distinguen para una misma unidad piroclastos y lavas, se han eliminado registros repetidos e innecesarios.
- De las UNIDADES restantes, entre aquellas que no tienen asignación de edad se han eliminado todas aquellas que no tienen centros eruptivos, excepto las procedentes del volcanismo central y los registros anómalos.
- Por último, para las UNIDADES restantes se ha estimado una edad máxima y mínima en función del criterio estratigráfico por el cual se encuentran ordenadas en la base de datos y consultando la información de publicaciones disponibles en caso de duda.

Puesto que los resultados obtenidos de la generación del modelo de fuente no permiten determinar aún si es más adecuado considerar cada centro individual como evento o es mejor asignar este concepto a las UNIDADES, en la generación del modelo de recurrencia se va a analizar la validez de ambas hipótesis, con el fin de determinar de forma definitiva el procedimiento de cálculo que deberá aplicar el generador de eventos.

Con el fin de garantizar que se consideran todas las posibles alternativas en cuanto al desarrollo del modelo, el análisis del ajuste de las distribuciones de Poisson se ha realizado sobre las siguientes bases de datos:

- La base de datos resultante del proceso indicado en los párrafos anteriores, sin ningún tipo de modificación, considerando exclusivamente los valores de edades máximas y partiendo de la hipótesis de que las UNIDADES son equivalentes a eventos (es decir, sin tener en consideración el número de centros eruptivos asociados a cada unidad).

² La disponibilidad de datos geocronológicos de mayor antigüedad en las bases de datos del IGME permitirá en el futuro realizar análisis más completos que el que se ha llevado a cabo en el presente proyecto y que permitirán profundizar en el estudio de las variaciones que ha experimentado el volcanismo de Tenerife a lo largo del tiempo.

- La misma base de datos, pero excluyendo del cálculo los eventos interpolados, por lo que sólo los datos de la tabla de geocronología serán tenidos en cuenta.
- De estas dos, la que resulte más adecuada, pero utilizando en su lugar la edad mínima.
- El mismo análisis, pero considerando los centros eruptivos como eventos, con el fin de determinar cuál de los dos tipos de hipótesis es la más adecuada para el análisis de la peligrosidad en Tenerife.

Para el estudio de periodos de retorno y recurrencia se ha preferido mantener un único conjunto de datos, con independencia del tipo de volcanismo al que estén asociados (esta hipótesis equivale a considerar la isla como un único complejo volcánico en el que la ocurrencia de un tipo u otro de eventos va a venir condicionada por las condiciones geológicas regionales, por lo que resulta coherente considerar para estos análisis todos los datos de forma única). Sin embargo, el análisis de la dependencia temporal de las series de datos se ha realizado clasificando los eventos (UDS o centros, según la conclusión del análisis preliminar) en función de su asociación con el volcanismo central o el fisural-monogenético, con el fin de determinar posibles pautas de comportamiento de uno y otro tipo y aplicarlas a la simulación de los eventos (para determinar la proporción de eventos de cada uno de los estilos eruptivos principales que se producen en la isla).

En el siguiente apartado se presentan los resultados del análisis de cada uno de los puntos de la metodología para los datos que se han generado en este proceso.

Desarrollo del modelo de recurrencia

Una vez generadas las bases de datos que se han utilizado en el análisis y desarrollo del modelo de recurrencia se ha procedido a seguir cada uno de los pasos de la metodología propuesta con el fin de determinar en primer lugar hasta qué punto es viable la estimación del modelo y una vez aclarado este punto, realizar su diseño para su incorporación en el generador de eventos.

Ajuste de distribuciones de Poisson

El análisis sobre la distribución de los eventos seleccionados y su ajuste con un modelo de Poisson se ha realizado en primer lugar para las bases de datos que incorporan las edades máximas. En cada caso, para la totalidad de eventos de la que se dispone, se ha analizado el número de eventos por intervalo de tiempo según tres modelos de análisis diferentes:

- Para erupciones con edades inferiores a 3.000 años
- Para erupciones con edades inferiores a 15.000 años
- Para erupciones con edades inferiores a 35.000 años

El número de intervalos en que se han agrupado los eventos se ha ajustado de tal forma que se cumpla la premisa básica para el análisis de distribuciones de Poisson, intentando que el número de eventos sea similar en todos ellos en la medida de lo posible. Las UDS con edades superiores a 35.000 años no han podido ser consideradas debido a que al incorporarlas en el análisis introducen distorsiones en el modelo de cálculo. Para comprobar el ajuste de las distribuciones se ha utilizado el método de la Chi cuadrado.

Como resultado de este análisis, se observa que todas las distribuciones se ajustan a un modelo de Poisson, pero siempre y cuando se consideren por separado dos poblaciones: las erupciones con edad inferior a 3.000 años y las erupciones con edad superior a 3.000 e inferior a 15.000 o 35.000 años. Por otra parte, tanto las distribuciones con edades interpoladas como las edades reales conservan este comportamiento, por lo que parece que la introducción de información extra no parece alterar el resultado de los análisis.

Al realizar el estudio sobre las otras dos familias de datos restantes (edades mínimas y centros eruptivos) se ha observado que no resulta posible ajustar distribuciones de Poisson a ninguno de estos casos, por lo que se descarta el continuar realizando estudios sobre cualquiera de ellas.

Por tanto, el resultado obtenido para el análisis de los centros es concluyente a la hora de determinar si los eventos a simular van a venir representados por las UNIDADES o los mismos, inclinándose a favor de las primeras. Sin embargo, puesto que se ha considerado a la hora de determinar el número de eventos que se deben simular la UNIDAD como concepto, se ha tenido en cuenta el hecho de que éstas es frecuente que tengan asociados varios centros emisores, para lo cual se ha estimado la relación media de centros emisores por intervalo de tiempo para cada uno de los casos analizados. Esta relación se ha utilizado para comprobar que las variables introducidas en el generador de eventos de forma aleatoria representan de forma adecuada la distribución de centros emisores según el modelo de recurrencia.

Por tanto, para la realización de los análisis consecutivos se ha decidido seleccionar aquellas bases de datos que incorporan exclusivamente la información procedente de los datos de geocronología y que pertenecen a dos poblaciones: la de edades inferiores a 3.000 años y la comprendida entre 3.000 y 35.000 años. Estos resultados indican que va a ser necesario realizar un tratamiento independiente de ambos grupos de datos, por lo que ha sido necesario interpretar en los apartados sucesivos si lo que se está revelando es un comportamiento eruptivo diferente correspondiente con cambios en las tasas de erupción a lo largo de este periodo o por el contrario el resultado simplemente viene condicionado por la estructura de los datos de que se dispone.

Los valores de lambda, Chi cuadrado y la relación de centros emisores para cada uno de los dos casos en los que la distribución de Poisson se cumple, se presentan en la siguiente tabla.

Población	Lambda	Chi cuadrado	Relación centros/eventos
< 3.000 años	1,67	1,9204 (test 6,25)	5,00
3.000 a 35.000 años	0,92	1,6006 (test 2,70)	9,00

Análisis de la distribución de los periodos de reposo

Una vez que se ha determinado las poblaciones que siguen una distribución de Poisson para los datos disponibles en Tenerife es posible proceder a analizar la distribución de los periodos de reposo en las mismas. Para ello, se ha determinado el número de eventos acumulado por periodo de reposo considerado (que varía en función de la población utilizada) y por intervalo de tiempo analizado y a la distribución de puntos se le ha ajustado una curva exponencial. Con el fin de conocer el grado de dispersión de los valores que nos va a proporcionar este ajuste, se ha estimado el efecto que tiene la desviación típica sobre los valores observados con respecto a los calculados. Este ajuste ha proporcionado dos nuevas rectas que indican el máximo y mínimo de los valores posibles para un intervalo de confianza del 0,025 (2,5%).

El resultado de este análisis permite observar que, mientras que en la serie de datos con edades inferiores a 3.000 años el ajuste obtenido para los periodos de retorno es bastante bueno, éste se ve reducido significativamente cuando el intervalo de tiempo considerado se encuentra entre 3.000 y 35.000 años, lo cual es en principio esperable, dada la calidad y procedencia de los mismos. En ambos casos, la desviación típica obtenida al comparar los datos observados con los comparados es muy pequeña.

Aunque estos resultados son esperables dadas las características de la segunda población, este hecho supone que la estimación de los periodos de retorno puede verse afectada por la importante variabilidad que presenta, suponiendo que sólo se pudiera tener ésta en cuenta para la valoración del número de eventos a simular, por lo que se hace necesario determinar si existe algún tipo de variación de la tasa eruptiva entre ambos periodos que permita aplicar el principio presentado en el apartado de metodología por el que resulta posible combinar los resultados de ambas poblaciones.

Dependencia temporal de las secuencias eruptivas

Para llevar a cabo el estudio de la posible dependencia temporal de las secuencias eruptivas se han clasificado los eventos (UNIDADES, según la conclusión del análisis preliminar) en función de su asociación con el volcanismo central o el fisural-monogenético, con el fin de determinar posibles pautas de comportamiento de uno y otro.

Para determinar la posible variación temporal del comportamiento de las secuencias eruptivas para cada uno de los tipos de volcanismo identificados en Tenerife se ha valorado la media de episodios y de centros eruptivos presentes para cada uno de los episodios volcánicos principales que se identifican en cada serie de datos. En este caso, los episodios no tienen por qué tener una misma duración temporal ni deben necesariamente corresponderse entre el volcanismo central y el monogenético. Se ha determinado también en estos casos y para cada episodio la relación existente entre el número de centros eruptivos y los episodios identificados.

Tanto para el volcanismo central como para el monogenético se observa que existe una buena correlación entre la media de centros por episodio y la media de eventos ocurridos, aunque en todos los casos siempre la primera supera a la segunda. Si se analiza la relación existente entre la media de centros y la media de episodios para el volcanismo de tipo monogenético de la isla de Tenerife, se observa que existe una tendencia evolutiva ascendente en las fases posteriores al volcanismo de Cañadas. Podría suponerse entonces que existe una tendencia al incremento de la actividad fisural-monogenética de Tenerife (para la muestra que estamos utilizando) con posterioridad a los últimos episodios del volcanismo de Cañadas. En este periodo cabe destacar que el incremento de la tasa eruptiva de unos periodos a otros (175ka – 30ka – 5ka) es en cada caso de un orden de magnitud superior al anterior, lo que podría ser la causa de que en el análisis de Poisson resulte necesario tratar cada uno de estos conjuntos de datos por separado pese a que aparentemente pertenecerían a un episodio global único de carácter superior.

Por lo que respecta al volcanismo de tipo central la situación es similar, si bien en este caso los intervalos representan periodos de tiempo diferentes, por lo que los gráficos representan una tendencia claramente ascendente desde finales del periodo de Diego Hernández (175Ka) hasta la actualidad, aunque se produce un “vacío” tanto en el número de eventos como de centros en el periodo comprendido entre los 175Ka y los 30Ka, lo cual puede ser debido a que la actividad durante este periodo puede estar relacionada con el relleno de la caldera de las Cañadas por materiales que habrían quedado cubiertos por los de fases eruptivas posteriores.

Para extrapolar este comportamiento al futuro habría que valorar de qué forma esta tendencia evolutiva puede llegar a influir en los eventos, aunque el análisis que cabe extraer de la observación de estos resultados es meramente de tipo cualitativo.

Por ello, se ha realizado otro tipo de análisis destinado a determinar de forma cuantitativa la posible tendencia evolutiva del volcanismo central y monogenético de la isla. Para ello, se ha considerado exclusivamente el periodo comprendido desde los últimos 30Ka y lo que se ha representado es el número de eventos por periodo de cálculo, dividido en intervalos regulares. En este caso, se puede observar que para el volcanismo de tipo fisural-monogenético se confirma esta tendencia ascendente en la tasa eruptiva, pese a que existen intervalos de tiempo en los que esta desciende ligeramente.

En el caso del volcanismo central, el comportamiento durante este periodo es mucho más errático y todo hace interpretar que la tasa eruptiva a la que se produce la ocurrencia de eventos depende de otro mecanismo diferente que el de las dorsales, a pesar de que la tendencia parece indicar que la tendencia evolutiva es de carácter claramente ascendente.

A primera vista la tendencia creciente es más marcada para los episodios de tipo monogenético en los periodos más recientes a pesar de que las tasas eruptivas son similares, lo que puede indicar que la tasa eruptiva crece de forma más marcada para este tipo de volcanismo en las últimas fases evolutivas (es decir, que lo que cabría esperar en el futuro es que cada vez se produjese un mayor número de eventos de tipo monogenético con respecto a los eventos centrales).

Sin embargo, es necesario ponderar en este caso el peso que en los resultados tienen la ocurrencia en periodo histórico un conjunto de erupciones de tipo fisural monogenético, que pueden estar forzando la interpretación de los resultados.

Como conclusión a esta parte del análisis, se puede afirmar que en los últimos 30Ka la tasa eruptiva del volcanismo central es superior a la del volcanismo de tipo monogenético (0,0018 frente a 0,0012, es decir un 50% superior) y que ambos tipos de volcanismo parecen presentar una tendencia evolutiva de crecimiento progresivo de la misma, que parece estar más a favor del volcanismo monogenético que del central (aunque puede deberse a enmascaramiento de datos). Sin embargo esta tendencia no es concluyente, puesto que no se dispone de información suficiente que permita determinar que esta previsión pueda llegar a cumplirse, ya que como se ha observado en otros volcanes, es frecuente que la tasa eruptiva se mantenga constante o con ligeras variaciones durante un mismo episodio evolutivo.

Por estos motivos, se prefiere aplicar como hipótesis para la simulación que se debe llevar a cabo en el generador de eventos la idea de considerar que el comportamiento eruptivo que se ha manifestado durante la última fase constructiva analizada (30Ka) es el que cabe esperar que, con ligeras variaciones, pueda seguir teniendo lugar en el futuro, lo que conduce a determinar que el volumen de eventos de tipo central tenderá a ser un 50% de veces superior al de los de tipo monogenético. Esta relación será utilizada para la simulación de eventos de la siguiente forma:

$$N \text{ eventos dorsales} = N \text{ total de eventos} / 2,5$$

$$N \text{ eventos central} = N \text{ eventos dorsales} * 1.5$$

Por el contrario, la relación de centros eruptivos es superior para el volcanismo de tipo fisural asociado a las Dorsales que para el central en una proporción justo inversa, por lo que a la hora de estimar el número de centros emisores que deberían resultar del generador de eventos la proporción es la siguiente:

$$N \text{ centros central} = N \text{ total de centros} / 1,3$$

$$N \text{ centros dorsales} = N \text{ centros central} * 0,3$$

Generación del modelo de recurrencia

Como se ha observado en apartados anteriores, es posible que la tasa de erupción en Tenerife haya cambiado con el tiempo y por tanto siga también este comportamiento en el futuro. Como ya se ha indicado, este tipo de comportamiento es habitual en muchos volcanes y de hecho se interpreta que el proceso aleatorio compuesto que corresponde a series de Poisson sucesivas con diferentes tasas de ocurrencia es en sí mismo un proceso de Poisson cuya tasa media de ocurrencia es la media ponderada con el tiempo de las medias de las series individuales.

Siguiendo esta hipótesis, es posible realizar una primera aproximación sobre el número de eventos que se deberá simular en función del intervalo de tiempo considerado, teniendo en cuenta los valores obtenidos para los periodos de recurrencia resultantes del ajuste de las rectas obtenidas para las dos poblaciones identificadas y la relación de centros/eventos obtenidas para cada una de las poblaciones seleccionadas.

Los resultados de este cálculo se han resumido en la siguiente tabla, en la que para cada uno de los periodos de simulación que se propone, se han incorporado los valores estimados del número de simulaciones a llevar a cabo, el número de centros emisores medio por cada evento y máximo total que se puede asociar a las mismas y el número de eventos asociados con cada tipo de volcanismo.

Modelo de recurrencia	100.000 años de simulación	250.000 años de simulación	325.000 años de simulación
Número de simulaciones	252	631	820
Eventos centrales	101	252	492
Eventos dorsales	151	379	328
Media centros emisores	7	7	7
Número máx. de centros	1.767	4.417	5.742

Modelo de peligros

El modelo de peligros refleja las zonas preferentes en las que pueden tener lugar los diversos tipos de erupciones posibles en Tenerife en el futuro. Para llevar a cabo este estudio, se ha analizado la distribución de los centros emisores visibles incorporados en el modelo de datos teniendo en cuenta la tipología eruptiva a la que pertenece cada uno de ellos. Para ello, se ha utilizado la misma base de datos de centros eruptivos que la utilizada por el modelo de fuente.

Para generar el modelo de peligros cada centro eruptivo seleccionado se ha asociado con el evento al que pertenece utilizando como referencia la UNIDAD en la que se encuentra ubicado, analizando sus características eruptivas y las fuentes de datos bibliográficas disponibles.

De cada evento identificado se han analizado tres parámetros (Miller, 1989) que han permitido definir en términos generales la tipología eruptiva: composición, historia evolutiva y explosividad potencial. Esta información es fácil de adquirir analizando las características de los depósitos pertenecientes a cada evento y se encuentra ya incorporada en el modelo de datos.

Por lo que respecta a la composición, los eventos se han agrupado en torno a dos grandes categorías de acuerdo con la clasificación petrológica de sus productos: composición básica a intermedia y composición sálica. A pesar de que es posible identificar términos geoquímicos más precisos que los propuestos para las UNIDADES en las que se encuentran ubicadas las muestras geoquímicas, en contraste no se dispone de información para todas ellas, por lo que la asignación de una clasificación petrológica es más adecuada en este caso ya que generalmente se dispone de esta información en los informes asociados a la cartografía MAGNA.

En cuanto a la historia evolutiva, se han hecho dos distinciones a la hora de clasificar los eventos. Se ha considerado por una parte el carácter monogenético o poligenético de las emisiones y, por otra, la relación espacial que presentan los eventos con respecto al complejo Teide-Pico Viejo. De esta forma, se han separado aquellos centros que se encuentran situados en el área de influencia del volcanismo central de los que no presentan relación aparente con ella.

La explosividad potencial de los eventos se ha analizado a partir de sus productos. A nivel general, para clasificar los eventos hemos considerado que ésta aumenta con el grado de viscosidad de los magmas y que depende del carácter mono o poligenético de los eventos, lo que la convierte en una variable dependiente. La explosividad intrínseca de los eventos seleccionados se puede considerar, por lo general, como baja aunque ésta se ha visto incrementada ocasionalmente debido a la intervención de agua.

De acuerdo con estos criterios, el total de eventos analizados ha quedado clasificado dentro de cinco grandes categorías o tipologías eruptivas:

- 1) Eventos efusivos básicos a intermedios, monogenéticos, relacionados con Teide-PV
- 2) Eventos efusivos básicos a intermedios, monogenéticos, sin relación con Teide-PV
- 3) Eventos efusivos a explosivos sálicos, monogenéticos, relacionados con Teide-PV
- 4) Eventos efusivos a explosivos sálicos, monogenéticos, sin relación con Teide-PV
- 5) Volcanismo central (complejo Teide-Pico Viejo).

Una vez clasificados los eventos, para establecer el área en la que potencialmente pueden desarrollarse cada una de las tipologías obtenidas, se ha aplicado un algoritmo de medias móviles con el que se ha interpolado la clasificación obtenida a la totalidad de la isla.

Este algoritmo calcula, para cada punto del mapa, la media ponderada de los valores de todos los puntos situados dentro de una cierta distancia límite establecida, utilizando una función de ponderación. La fórmula que se ha aplicado para realizar este cálculo es del tipo:

$$Z = \text{Sum } i=1 \dots N (P_i \times Z_i) / \text{Sum } i=1 \dots N (P_i)$$

donde:

- Z: valor de salida para el píxel sobre el que se realiza el cálculo
- n: número de puntos
- P_i: peso del punto i (W es la función de peso)
- Z_i: valor en el punto i

Como distancia límite se ha utilizado, al igual que para el cálculo del modelo de fuente, la media de las distancias inter-centros para la totalidad de los datos de la tabla y como método de ponderación se ha aplicado una función exacta de tipo $(1/d^n - 1)$ que toma los siguientes valores:

para $D \leq d_0$ $P = (1 / (D / d_0)^n) - 1$

y para $D > d_0$ $P = 0$

donde:

- P: peso calculado
- D: distancia al punto medido
- d₀: distancia límite
- n: factor constante

Esta función mantiene los valores de la clasificación en los píxeles sobre los que se encuentran situados los centros. Como valor para el coeficiente n hemos elegido 1 para obtener un resultado lo más suavizado

posible en el mapa resultante, ya que nuestro interés se centra en obtener información a nivel regional (MAPA 6).

Distribuciones de probabilidad

Una vez obtenidos los mapas que reflejan los modelos de fuente y peligros y las estadísticas correspondientes con el modelo de recurrencia, se hace necesario relacionar todos ellos con el objeto de determinar cuántas simulaciones y de qué tipo se deberán realizar en cada punto de la isla.

El procedimiento que se ha aplicado para generar las distribuciones de probabilidad ha pasado por la agregación de los datos a una dimensión que sea coherente con la que tienen lugar los fenómenos eruptivos, equivalente al paso de una malla regular con un espaciado de 2.500 metros. La agregación de los modelos de fuente y peligrosidad en celdas de tamaño de 2.500 x 2.500 metros ha asegurado la coherencia espacial de todas las capas que forman parte del cálculo de las distribuciones de probabilidad.

El objetivo que se ha perseguido con la agregación del modelo de fuente es determinar el número de eventos medio que han tenido lugar en cada una de las celdas de la malla regular. Este dato sirve para determinar de qué forma se han de distribuir las simulaciones por la totalidad de la superficie que abarca el proyecto.

La agregación del modelo de peligros ha permitido obtener el porcentaje de superficie que ocupa cada estilo eruptivo en cada celda. Esta operación se ha realizado por separado para cada uno de los ficheros asociados con el modelo de peligros, ya que en una celda pueden tener lugar simulaciones que pertenezcan a más de un estilo.

Una vez que se han obtenido los mapas de fuente y de peligros agregados, se ha procedido a determinar los valores que cada uno de ellos tienen para cada una de las celdas de la malla regular. La malla tiene la función de asignar valores unívocos a cada una de las celdas que forman parte de la misma, lo que se ha conseguido asignando un identificador único para cada una de las celdas. Para obtener los valores agregados que cada una de las celdas de malla tiene para cada uno de los mapas generados se ha cruzado el fichero de malla con cada uno de los mapas de agregación.

El resultado obtenido después de llevar a cabo todos estos cálculos es una tabla en la que para cada celda se ha obtenido el número de simulaciones a realizar para cada uno de los estilos eruptivos identificados en la misma. Esta tabla es utilizada por el generador de eventos.

Modelos físicos de simulación

Los modelos físicos proporcionan el medio para simular las erupciones y obtener información sobre la distribución y magnitud de sus efectos (Pareschi & Berstein, 1989), habiéndose ya considerado en numerosas ocasiones la posibilidad de integrarlos en la arquitectura de los GIS con el fin de apoyar el cálculo de la peligrosidad (Lam & Swayne, 1991).

Las investigaciones que se han llevado a cabo durante la últimas décadas sobre el comportamiento físico de los fenómenos eruptivos han conducido al desarrollo de modelos numéricos, algunos sofisticados, que en numerosas ocasiones requieren un volumen importante de parámetros de los que no es fácil obtener información. Este tipo de modelos es fundamental para mejorar el conocimiento que actualmente tenemos de los fenómenos volcánicos pero son difíciles de aplicar cuando se requieren resultados prácticos, sobre todo debido a los importantes requerimientos tecnológicos y de computación que tienen (Gómez Fernández, 1998).

Se ha realizado una recopilación bibliográfica y revisión detallada de los modelos físicos disponibles para la generación de la cartografía de peligrosidad volcánica a la fecha de inicio del proyecto para la simulación de los diversos tipos de fenómenos volcánicos.

La revisión de los modelos físicos publicados se ha centrado en la obtención de información para los tres fenómenos principales que considera el modelo de cálculo de la peligrosidad en Tenerife:

- Coladas de lava
- proyectiles balísticos
- Caída de piroclastos

Existe evidencia de que a lo largo del registro geológico de la isla de Tenerife han tenido lugar otro tipo de fenómenos eruptivos, tales como surges o flujos piroclásticos, los cuales pueden tener un importante impacto potencial sobre la isla y sus habitantes debido a la violencia de sus efectos. Es el caso de los depósitos correspondientes con la ignimbrita de Arico, Chimiche, etc., que revelan el importante volumen de materiales que se llegó a generar a lo largo del ciclo de formación del edificio Cañadas asociado a este tipo de fenómenos. Por otra parte, existe otro tipo de fenómenos menos relevante pero que también han tenido lugar en la historia eruptiva, tales como explosiones freáticas, para las cuales no existen modelos aceptados publicados. Otro tipo de fenómenos como lahares o avalanchas están escasamente documentados en el registro geológico, por lo que no serán tenidos en cuenta en la simulación.

Aunque se está haciendo un esfuerzo importante de investigación dedicado al desarrollo y mejora de los modelos numéricos destinados a simular los fenómenos eruptivos más complejos, éstos presentan todavía

hoy por hoy dos limitaciones principales para su incorporación en entornos operativos de cálculo de peligrosidad:

- Requieren largos tiempos de cálculo y también generalmente ordenadores muy potentes (computación en paralelo, etc.), lo que los hace poco operativos al nivel de desarrollo de un sistema como el que se ha propuesto.
- Generalmente son modelos unidimensionales axisimétricos, es decir, consideran exclusivamente los datos procedentes de un perfil topográfico único (ya que la topografía es un factor fundamental en el control de la dispersión de los productos), lo que impide obtener una distribución espacial para todo el entorno del área fuente.

A estos hechos hay que añadir que se dispone de escasos datos en la isla de Tenerife para la simulación de este tipo de fenómenos, por lo que incluso su aplicación en las condiciones más simples puede conducir a resultados con un alto grado de error, poco concluyentes y que no apoyaría al objeto último que se persigue con la realización de la cartografía de peligrosidad.

En el futuro sería deseable que fuera posible incorporar este tipo de modelos al cálculo de la peligrosidad de la isla de Tenerife, cuando los desarrollos existentes pasen del entorno de formulación teórico al operativo y se disponga de información suficiente para poder llevar a cabo las simulaciones sobre datos fiables.

Para los tres tipos de fenómenos seleccionados, se presentan a continuación de forma sintética los resultados de la revisión realizada de los modelos físicos publicados, que se utilizarán como base para llevar a cabo la selección de los que finalmente entrarán a formar parte del simulador en este proyecto:

a. Modelos de simulación de coladas lávicas

En general, los modelos de coladas pueden dividirse en tres grupos básicos (Macedonio, 1998): modelos basados en la resolución de las ecuaciones de transporte, modelos probabilísticos y modelos basados en correlaciones empíricas de datos de pasadas erupciones.

Los primeros resultan satisfactorios en general para la modelización de flujos a pequeña escala, mientras que los segundos reflejan mejor los efectos topográficos en detrimento de una descripción dinámica detallada del flujo. Los modelos basados en correlaciones empíricas de datos de erupciones pasadas sólo pueden ser aplicados en el volcán para el que se desarrollaron, por lo que su uso resulta limitado. En la tesis doctoral de Felpeto (2002) se hace una breve revisión de las características de los dos primeros tipos de modelos, la cual se ha utilizado como base para llevar a cabo la valoración de cuáles resultan más adecuados para llevar a cabo el cálculo de la peligrosidad de las erupciones de tipo efusivo en la isla de Tenerife. El razonamiento asociado con esta decisión se desarrolla convenientemente en su correspondiente apartado.

Los modelos físicos más simples disponibles requieren generalmente como datos de entrada la ubicación del foco eruptivo y la topografía con el fin de calcular el área probable que podría verse afectada por las coladas.

Adicionalmente, según cual sea el modelo, se puede necesitar incorporar información sobre otros parámetros secundarios, tales como la extensión máxima, altura crítica, etc.

Los modelos existentes representan la topografía en formato vectorial (TIN) o raster dependiendo de las preferencias de los autores o de los datos disponibles para el área de trabajo (ej. Macedonio et al., 1990).

b. Modelos de simulación de piroclastos de caída-columnas plinianas

Este tipo de modelos requiere un entorno de computación más complejo que los anteriores. La simulación depende de la disponibilidad de datos que representen la ubicación del foco eruptivo, la distribución de vientos en altitud, la distribución de partículas y su densidad y el máximo volumen de material emitido. Generalmente se construyen para operar sobre datos de tipo raster y los resultados hacen referencia a la profundidad máxima de piroclastos que pueden acumularse en cada punto o a la carga (en Kg x m²) (ej. Armienti et al., 1988). También en la tesis de Felpeto (2004) se presenta una revisión de la evolución metodológica que ha seguido el desarrollo de los modelos físicos de la simulación de columnas plinianas y sus diversas aplicaciones, aunque en este caso las diferencias en la base física de la simulación se reducen sensiblemente con respecto al caso de las coladas lávicas.

c. Modelos de proyección balística

La mayor parte de los trabajos de investigación en simulación volcánica se concentran en el desarrollo de modelos correspondientes a los dos fenómenos anteriores. Los modelos de proyección balística, bien sea por el escaso impacto del fenómeno que representan o por la simplicidad de los mismos, tienen apenas representación en la bibliografía y se han aplicado sólo de forma muy limitada al cálculo de la peligrosidad. Los modelos más simples tienen en cuenta la topografía, velocidad de salida y ángulo de la bomba volcánica, su forma, densidad y masa y la densidad del aire y su resistencia. Los resultados indican el punto potencial de impacto del proyectil y la trayectoria seguida.

Criterios para la selección de modelos de simulación

Con el fin de facilitar el proceso de selección de los modelos de simulación, se han identificado los criterios principales que se va a requerir a los mismos con el fin de que puedan ser incorporados en el simulador de eventos. El enfoque que se pretende aplicar para la ejecución de este proyecto y la limitación temporal de que se dispone para la obtención de resultados implica la necesidad de disponer de modelos numéricos que cumplan las siguientes condiciones:

- El código de ejecución de los mismos debe ser del dominio público.
- La base física de los mismos debe ser precisa pero al mismo tiempo lo suficientemente simple como para que se puedan implementar en el proceso de cálculo de la peligrosidad de forma operativa.

- Deben caracterizarse por su rapidez de ejecución (fast performance), ya que aquellos modelos que requieran largos tiempos de cálculo pueden inducir a importantes retrasos en la obtención de resultados.
- Deben de ser reconocidos y aceptados por la comunidad de usuarios como un método estándar de simulación.

Dependiendo de las características de los modelos que se seleccione, será posible llevar a cabo un diverso grado de integración de los mismos en el entorno GIS en el que va a tener lugar el cálculo de la peligrosidad. El que se lleve a cabo una integración total o parcial de los mismos en el entorno GIS va a depender fundamentalmente de la eficacia en el cálculo que ofrezca una u otra solución y de las posibilidades de edición del código fuente de que se disponga, por lo que se optará en cada caso por la más viable en términos de tiempos de ejecución y tratamiento de datos.

En la actualidad hay un número significativo de modelos cuyas bases teóricas se han publicado y que se han aplicado para simular eventos, aunque generalmente se caracterizan por dos particularidades:

1. En la mayor parte de las ocasiones los modelos se aplican para la simulación de eventos individuales, que cubren pequeñas superficies (ej. matrices de 100 x 100 celdas, parámetros únicos para la simulación, etc.). Esto permite extraer dos observaciones:
 - a. Al ser el volumen de datos necesario para su aplicación muy pequeño, esto hace suponer que, cuando se de el caso de aplicarlos a un entorno operativo de la complejidad del que se ocupa este proyecto, se presentarán dificultades en el manejo de las bases de datos de las que se dispone. Es decir, será necesario asegurarse de que en entornos reales de cálculo de peligrosidad, los modelos son viables.
 - b. En segundo lugar, la valoración de los resultados se suele realizar sobre eventos concretos, de los que se dispone de información detallada, pero en ningún caso se ha valorado hasta qué punto las divergencias que se producen en los resultados obtenidos, pueden suponer un problema a la hora de llevar a cabo la simulación de cientos de eventos, como en nuestro caso. Por este motivo, hemos de partir de la hipótesis de que, las pequeñas variaciones en la superficie obtenida para un evento individual se pueden considerar despreciables cuando lo que se pretende es simular un número muy elevado de eventos.
2. No se dispone de información en ningún caso sobre los tiempos de ejecución necesarios para llevar a cabo las simulaciones, por lo que no existe forma de valorar a priori las necesidades que tendrá nuestro proyecto. Se hace necesario por tanto realizar pruebas sobre ejemplos particulares que utilicen nuestras bases de datos con el fin de estimar esta variable.

3. Es difícil disponer del código fuente de los mismos, ya que la política de la comunidad científica en este sentido es muy conservadora y, en la mayor parte de las ocasiones, las publicaciones tampoco ofrecen los detalles suficientes para reproducir el entorno de cálculo a partir de las bases que ofrecen.

Estos hechos restringen de forma considerable los modelos físicos a los que el proyecto ha tenido acceso, aunque ha sido posible identificar programas que cumplen la mayor parte de los criterios establecidos y que parecen ofrecer en principio un buen nivel en la calidad de los resultados.

Modelización de erupciones efusivas

Entre los procesos o fenómenos eruptivos relacionados con la ocurrencia de erupciones efusivas es la producción de coladas de lava el que tiene una mayor relevancia. En la isla de Tenerife, tanto para el volcanismo de tipo fisural, asociado con la emisión de materiales de básico a intermedio, como para el de tipo central, relacionado con materiales de composición sálica, esta relevancia se mantiene, siendo la emisión de materiales lávicos la que predomina en las últimas etapas de construcción de la misma.

Asociados con la emisión de lavas, se presentan habitualmente otros fenómenos como la formación de conos de escorias (o cínider) y de domos en función de la composición de los materiales emitidos. Especialmente en el caso de las erupciones efusivas, aunque la peligrosidad asociada a la formación de los conos piroclásticos es reducida se ha considerado interesante incorporarla al cálculo de la peligrosidad por los efectos que las cenizas y las bombas asociadas con su formación puede tener sobre elementos vulnerables del entorno (tendidos eléctricos, canales de distribución de agua, etc.), por lo que el conocimiento de las posibles zonas de afección resulta interesante en términos de planificación.

Otros fenómenos que se pueden asociar a las erupciones efusivas son la ocurrencia de explosiones freáticas en aquellas zonas donde el contenido en agua superficial de los acuíferos pueda ser suficiente para provocar una reacción de este tipo al contacto con el magma o en las zonas costeras. En este momento, se carece de información detallada para poder llevar a cabo una modelización de este tipo de fenómenos, por lo que en todo caso se podrá como máximo llegar a identificar o delinear las áreas susceptibles de que se produzcan. Otros fenómenos menores, como la emisión de gases nocivos asociada a los frentes de colada, no serán considerados en la simulación de este tipo de erupciones.

En el presente apartado se presentan las características principales y los requerimientos que presentan los modelos de simulación seleccionados para llevar a cabo la simulación de las erupciones efusivas.

Modelos de simulación de coladas lávicas

Felpeto (2004) presenta en su tesis doctoral una breve revisión de los modelos disponibles para la simulación de coladas lávicas que se recoge de forma sintética en los siguientes párrafos y sirve de introducción para justificar la elección del modelo físico que se ha seleccionado para llevar a cabo la modelización.

Según esta tesis, en los modelos basados en la resolución de las ecuaciones de transporte un flujo se representa por un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen la conservación de masa y el balance de momento y energía. Para solucionar este conjunto de ecuaciones, se precisa además una ecuación constitutiva apropiada (que relaciona esfuerzos y sus derivadas temporales con deformaciones y sus derivadas temporales) y condiciones iniciales y de frontera para la velocidad y temperatura. La complejidad de resolución de estas ecuaciones en el caso de las coladas de lava radica en el comportamiento no-newtoniano de las mismas, las condiciones de frontera no lineales de la ecuación energética (debido a la pérdida de calor por radiación) y la presencia de una superficie libre. Estas dificultades en la resolución de las ecuaciones de transporte hacen que los modelos existentes introduzcan diversas simplificaciones. Para ello se han propuesto diversas soluciones analíticas para flujos sobre planos inclinados, tanto en regímenes estacionarios (Park & Iversen, 1984; Dragoni et al., 1986; Dragoni, 1989) como transitorios (Baloga & Pieri, 1986) y canales de geometría sencilla.

En esta misma tesis se considera que los modelos más adecuados para el cálculo de la peligrosidad volcánica son los propuestos por Ishihara et al. (1990) y posteriormente por Miyamoto & Sasaki (1997), que asumen que la lava es un fluido Bingham, con viscosidad y cizalla umbral dependientes de la temperatura y consideran el área de cálculo dividida en celdas cuadradas en las que la altura de lava en cada celda en cada iteración temporal se calcula como la suma de la lava emitida (si la celda es un centro de emisión) y los flujos de masas a través de los lados de la misma. Puesto que se asume reología Bingham, el flujo es sólo posible si la altura de la lava en la celda origen es mayor que la altura crítica correspondiente a la pendiente considerada. En lo referente a balance energético, sólo considera la pérdida de calor por radiación, asumiendo temperatura constante en cada perfil vertical o bien, en el caso de que la lava empiece a solidificarse en la capa superior, una temperatura efectiva de radiación equivalente a la temperatura anterior menos una cantidad constante.

Por lo que respecta a los modelos probabilísticos, tales como los de Macedonio (1996) y Felpeto et al. (1996 y 2001), asumen que la topografía juega el papel principal en la determinación del camino seguido por la colada. La probabilidad de que un flujo se desplace a una celda determinada es proporcional a la diferencia de alturas entre la unidad considerada (corregida según un parámetro denominado "corrección de altura") y aquella donde se encuentra el flujo, teniendo en cuenta que, si esa diferencia es negativa, la probabilidad será cero. Aplicando un algoritmo de Monte Carlo se calcula un posible camino de la colada. Este proceso se

repite iterativamente un gran número de veces y, finalmente se hace un recuento de cuántas veces ha sido atravesada por un flujo cada unidad. El resultado es un mapa en el que se representa la probabilidad de cada celda de ser invadida por un flujo de lava. Estos modelos suelen ser denominados en la bibliografía como modelos probabilísticos de máxima pendiente.

Otra aproximación es la presentada por Young & Wadge (1990) y Wadge et al. (1994). Este modelo, denominado FLOWFRONT, destaca por su rapidez de cálculo, ya que se basa en simular únicamente el frente de lava asumiendo implícitamente la llegada de la lava al mismo.

Otros autores proponen aproximaciones basadas en técnicas de autómatas celulares. El modelo descrito en Barca et al. (1993 y 1994) considera el espacio de cálculo dividido en celdas cuadradas, cada una de las cuales está caracterizada por una serie de parámetros: altura topográfica, altura de la lava, temperatura de la lava y cuatro flujos hacia las celdas vecinas. Este modelo se ha aplicado a diversos flujos de lava del Etna, mostrando un buen ajuste con los datos reales.

En términos de evaluación de la peligrosidad volcánica se necesita disponer de un parámetro que permita valorar la gravedad de los efectos producidos por el fenómeno, por lo que la aplicación de los modelos de tipo probabilístico queda en principio descartada, ya que la información que proporcionan es la probabilidad de que una zona se vea invadida por coladas, pero sin poder establecer a priori la gravedad de los efectos (potencia de las coladas, por ejemplo). Los modelos deterministas sin embargo suelen aportar información sobre el espesor de las coladas y la temperatura que éstas alcanzan en cada punto de su trayectoria, lo que da mayor juego a la hora de valorar hasta qué punto distintas áreas que pueden tener la misma probabilidad de invasión pueden tener distinto grado de afección por las mismas. Por este motivo, se ha decidido que sea éste el tipo de modelos a incorporar en el generador de eventos.

En la actualidad, se dispone de una amplia variedad de modelos físicos de tipo determinista para la simulación numérica de lavas. Entre ellos, el modelo de Ishihara (Ishihara et al., 1990), que se basa a su vez en el de Dragoni (Dragoni et al., 1986) (flujo en sentido de la pendiente de un fluido Bingham), parece ser el más realista de los utilizados. Sin embargo, la teoría de Dragoni es sólo válida si el plano de flujo es inclinado, por lo que en el modelo de Ishihara no resulta posible calcular el flujo en zonas planas o con muy ligera pendiente. Este modelo tampoco considera el flujo condicionado por el gradiente de presión como resultado de la variación de la profundidad del flujo a lo largo del mismo. El modelo de Ishihara tiene otra debilidad crítica, ya que depende del tamaño de la malla de cálculo. La forma de la malla y su dirección puede causar efectos indeseables en la simulación. Para eliminar este problema, el modelo de Miyamoto y Sasaki (1997) utiliza un método de cálculo de espacio aleatorio reducido que permite superar este defecto de los autómatas celulares clásicos sin incrementar el tiempo de cálculo y con una estabilidad que permite reproducir tanto pequeños como grandes flujos de lava.

El modelo de Miyamoto y Sasaki es uno de los que en la actualidad resulta más aceptado para llevar a cabo la simulación de coladas lávicas, lo que unido a la posibilidad de disponer del código fuente para la ejecución del mismo ha dado lugar a que haya sido éste el que se ha seleccionado para llevar a cabo las simulaciones de los flujos.

Modelo de simulación de coladas de Miyamoto y Sasaki

El método de cálculo de Miyamoto y Sasaki es similar al de Ishihara. El proceso parte de la utilización de una malla de celdas regulares cuadradas, cada una de las cuales tienen asociados dos atributos: su altitud y el espesor de lava. La altitud representa la altitud media de la topografía en cada celda. El volumen neto de lava en cada celda es igual al producto del área y del espesor del flujo en la misma. Cada celda tiene también una temperatura de lava media, de tal forma que el calor de la lava en la malla es igual al producto del volumen por la temperatura media.

El volumen en cada celda cambia según evoluciona el flujo. La erupción desde el centro de emisión se representa por el incremento de volumen de lava en las celdas que se corresponden con el mismo. El producto del área del centro de emisión por la velocidad de engrosamiento de la lava es la tasa de erupción. La lava no se mueve cuando el espesor es inferior a la altura crítica. Si el espesor llega a ser igual a la misma, se producen transportes de masa o desbordamientos a las celdas adyacentes y en consecuencia se aumenta el espesor de las mismas.

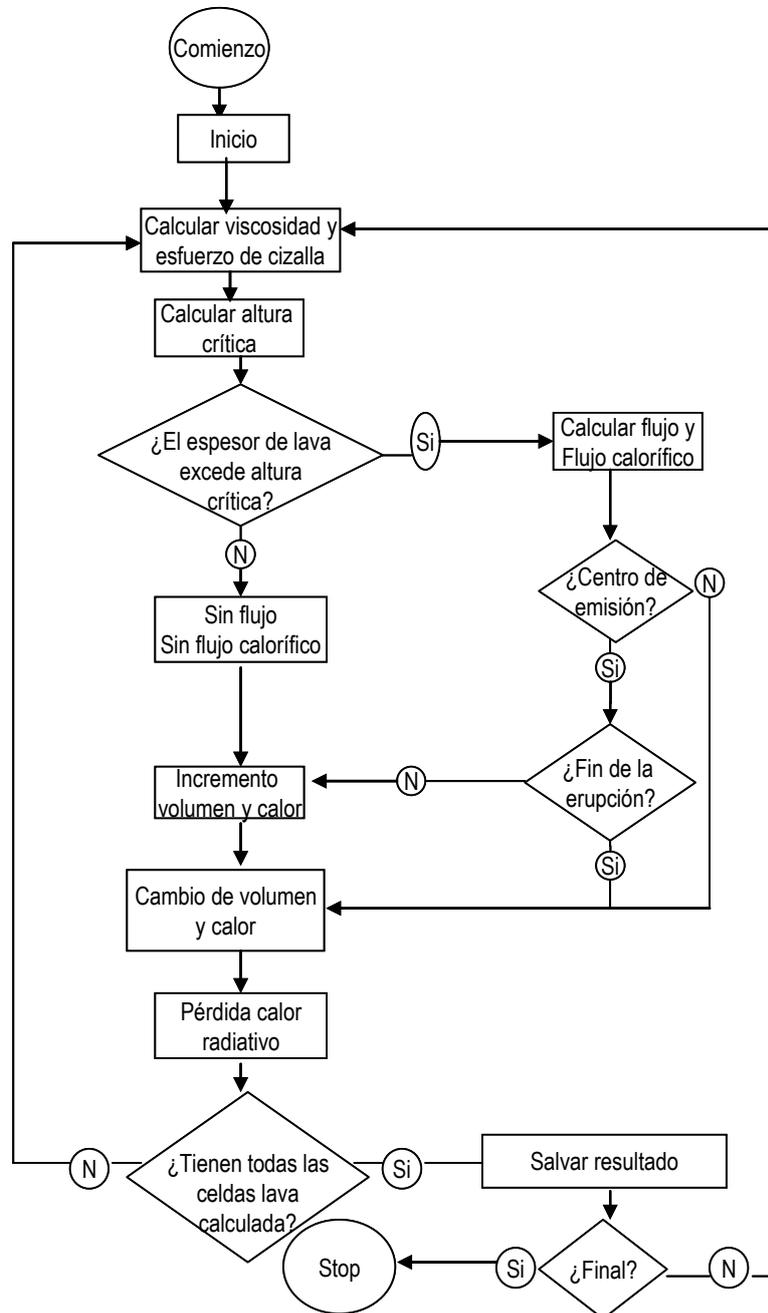
El calor se transfiere entre celdas según tiene lugar el transporte de masa. El cambio de temperatura como consecuencia de la pérdida de calor radiativo desde la superficie también se tiene en cuenta. La viscosidad y el esfuerzo de cizalla se calculan a partir de la temperatura en la celda. El cálculo avanza hasta que no sea ya posible.

La longitud final de un flujo de lava depende de las direcciones relativas del flujo y de las características de la malla que se utilice. Para evitar el problema de dependencia de la malla que presenta el modelo de Ishihara, Miyamoto y Sasaki han desarrollado un programa que se basa en celdas hexagonales. En el modelo de Ishihara, la longitud de la lava que transcurre en una dirección principal es aproximadamente 1.3 veces superiores que la de la dirección diagonal. El error que genera esta discrepancia es significativo cuando se tienen que hacer simulaciones de flujos a larga escala. Miyamoto y Sasaki generan un procedimiento que utiliza puntos representativos aleatorios y celdas hexagonales. El diagrama de flujo que representa este procedimiento se incorpora en la siguiente página:

Generación de las variables de simulación

Las variables de simulación que necesita el modelo para llevar a cabo los cálculos se extraen a partir de las bases de datos almacenadas en el modelo de datos del GIS y es el simulador de eventos el que se ocupa de realizar las operaciones necesarias para obtenerlas. Asimismo, es el simulador de eventos el que se ocupa

de obtener el conjunto de variables para cada una de las simulaciones que se deberá llevar a cabo y transferirlas al fichero de entrada de datos del modelo de simulación.



Estimación de los parámetros físicos para la simulación

Las propiedades reológicas de los flujos de lava, tales como la viscosidad o el esfuerzo de cizalla se pueden medir en ocasiones en algunos volcanes en estado de erupción, aunque más frecuentemente se obtienen a partir de estudios petrológicos. Las temperaturas de erupción, contenidos en gas y las velocidades de flujo de las lavas se pueden medir también en ocasiones.

El conocimiento que existe sobre los procesos de progreso de las lavas es tan limitado que incluso con la observación in situ y la medida de las propiedades físicas es difícil establecer relaciones directas entre las propiedades de los flujos y su comportamiento. Por ello, se han propuesto modelos simplificados utilizando aproximaciones a los mismos.

La composición química de las rocas magmáticas se encuentra dentro de unos límites que no presentan grandes variaciones. Su composición se suele calcular con el porcentaje de los óxidos de los diferentes elementos que las componen, de manera que el óxido más importante es la sílice (SiO_2), cuya concentración varía entre el 40-75%, el óxido de aluminio (Al_2O_3) varía entre el 10-20%, y el resto de los óxidos que las componen no suele sobrepasar el 10% del total.

A partir de los análisis químicos pueden evaluarse de forma aproximada los distintos parámetros físicos de las lavas, como son la viscosidad, la densidad, la emisividad, el calor específico, la presión y la temperatura entre otros. Conocidos estos parámetros físicos, podemos construir un modelo para estudiar cómo varían en el tiempo estos parámetros y poder predecir el comportamiento de nuevas lavas emitidas.

El modelo de Miyamoto & Sasaki utiliza un fichero de configuración en el que se incorporan los parámetros de entrada y las variables necesarias para llevar a cabo la simulación. En este fichero se almacenan los valores de las constantes que utiliza el modelo, las variables generadas por el simulador de eventos y los parámetros físicos, cuyos valores se extraen aplicando los procedimientos que a continuación se especifican.

Para este proyecto, se disponemos de los datos de los análisis químicos de diferentes muestras, por lo que para determinar las variables que necesita el modelo para operar las siguientes fórmulas:

DENSIDAD (ρ):

- McBirney y Murase (1984): $\rho = 2.2 + 0.027 (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{TiO}_2)$

TEMPERATURA Y PRESIÓN:

- Termómetro de Albarede (1992): $T (^{\circ}\text{C}) = 2000 (\text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{MgO}) + 969$

VISCOSIDAD:

El modelo físico seleccionado incorpora un método para el cálculo de la viscosidad de tipo lineal que tiene en cuenta la temperatura de la lava que se está simulando, pero sin tener en cuenta su composición. Por este motivo, no distingue entre los diferentes comportamientos que lavas sálicas y básicas tienen en términos de propagación.

Como alternativa al cálculo de la viscosidad, se ha aplicado en ocasiones una aproximación empleada por Ishihara et al. (1990) o una serie de valores propuestos por Dragoni et al. (1992) que sí tienen en cuenta la variación de este parámetro en función de la composición de las lavas. Ishihara et al. consideran que la relación entre la viscosidad y la temperatura para las lavas básicas sigue la relación:

$$\ln \eta = 24,22 - 0,00181T \text{ (}^\circ\text{K)}$$

Mientras que para las lavas ácidas, ésta se convierte en:

$$\ln \eta = 26,67 - 0,00181T \text{ (}^\circ\text{K)}$$

El problema que se plantea en primer lugar en este caso es que no existe información suficiente para determinar cuál es la relación existente para lavas de tipo intermedio, que son las que predominan en Tenerife. En segundo lugar, habiendo realizado comparativas entre este modelo y el de Shaw (1972), los resultados de viscosidad obtenidos por el primero se alejan considerablemente de los que se obtienen experimentalmente para lavas de composición similar a las de Tenerife.

Por este motivo, la mejor solución que se ha encontrado es la de utilizar la formulación que proporciona el modelo físico seleccionado, ya que no se dispone de medios ni tiempo suficiente en el margen de este proyecto para modificarlo con el fin de que tenga en cuenta las variaciones en la viscosidad en función de la composición química de los magmas.

CIZALLA UMBRAL:

Para la generación de los valores de cizalla umbral de la simulación es posible utilizar la formulación que incorpora el propio modelo de Miyamoto y Sasaki. Sin embargo, es difícil valorar la bondad de este planteamiento puesto que los valores que se obtienen aplicándolo son dispares con los de otras referencias, aunque todos ellos proceden de diversas áreas volcánicas y los datos se han tratado aplicando diferentes métodos.

CALOR ESPECÍFICO:

El calor específico calculado de acuerdo con métodos experimentales, ha proporcionado resultados erróneos para los ensayos de calibración realizados en Tenerife con las tipologías lávicas de las que se dispone, por lo que para la ejecución del modelo se ha optado por incorporar un valor constante igual a 840, que ya ha sido utilizado por otros autores en la ejecución de modelos físicos para lavas intermedias y sálicas.

EMISIVIDAD:

Para el modelo que vamos a aplicar se ha considerado para todos los tipos de lavas un valor de 0,91.

Modelos de proyección balística

Durante las erupciones volcánicas de tipo efusivo, explosiones discretas lanzan al aire pequeñas nubes de ceniza, lapilli, bloques, bombas y gases volcánicos, principalmente vapor de agua. Segundos después de la emisión, el frente de la nube generalmente evoluciona de una forma más o menos esférica a una consistente en proyecciones con forma de dedos (“finger jets”). En la punta de cada una de estas proyecciones se encuentra un fragmento balístico único o un grupo de fragmentos más grandes. Por detrás, hay una nube de fragmentos de tephra y gas que siguen la trayectoria de los anteriores. Segundos después de que los frentes de los finger jets sean perceptibles, los bloques se pueden separar por completo de la nube y viajar por su cuenta por la atmósfera.

La proyección de estos fragmentos sigue en primera aproximación un modelo elemental de tipo parabólico en el que sólo interviene la gravedad, el ángulo de salida del fragmento y la velocidad inicial. Cuando la velocidad de proyección de los fragmentos es elevada o bien cuando la densidad de los mismos es baja (ej. pumitas), es necesario tener en cuenta la influencia que el aire tiene en el movimiento de los mismos.

Cuando se considera el rozamiento del aire cero y la densidad del aire insignificante comparada con la de los bloques, la posición de un bloque en un momento determinado de su trayectoria viene gobernada por las siguientes ecuaciones:

$$x(t) = v_i \cos \alpha t$$

$$z(t) = v_i \operatorname{sen} \alpha t - \frac{1}{2} g t^2$$

Donde:

g es la aceleración de la gravedad,

V_i es la velocidad inicial de la bomba y

α es el ángulo de tiro, que está condicionado por la geometría del conducto de salida de la siguiente forma:

$$\alpha = \operatorname{atan}(a / 2h)$$

Donde:

a es la anchura del conducto y

h la profundidad desde donde se produce la proyección.

Asumiendo que el bloque viaja hasta un punto cuya elevación iguala la del punto de partida, la distancia final alcanzada por el mismo viene dado por:

$$X_{\text{final}} = v_i \operatorname{sen} 2\alpha / g$$

Y el alcance máximo horizontal que puede alcanzar un fragmento será:

$$X_{\max} = V_i^2 \operatorname{sen}(2\alpha) / g$$

La altura alcanzada por las bombas viene por otra parte dada por la ecuación:

$$H_{\max} = \frac{1}{2} V_i^2 \operatorname{sen}^2(\alpha) / g$$

En aquellos casos en que el rozamiento del aire tenga importancia suficiente como para ser tenido en cuenta y la densidad del aire sea constante, las ecuaciones anteriores se transforman en las siguientes:

$$x(t) = 1/\mu \ln(\mu v_i \cos \alpha t + 1)$$

$$Z(t) = 1/\mu \ln(\mu v_i \cos \alpha t + 1) - \frac{1}{2} g t^2$$

Donde:

$$\mu = \rho_{\alpha} C_d A / 2m$$

En la que ρ_{α} es la densidad del aire y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_{\alpha} = p / RT$$

Donde:

P es la presión atmosférica en Pascales, que se calcula para una elevación determinada mediante la fórmula:

$$p = p_0 (T/T_0)^{-g/(R(dT/dz))}$$

Donde:

p_0 y T_0 son la presión y la temperatura (°K) a nivel del mar y

dT/dz es el ratio de cambio térmico en °K por metro

R es la constante de los gases para el aire 286,98 J/kg K y

T es la temperatura en grados Kelvin

Otra alternativa al cálculo de la densidad del aire es utilizar la siguiente fórmula:

$$\rho_{\alpha} = 1,2255 (1 - (0,00651 / 288) h)^{4,255}$$

Donde:

h es la altitud por encima del nivel del mar, asumiendo una temperatura de 15°C.

Cd es el coeficiente de arrastre, que varía ampliamente dependiendo de la orientación, forma y rugosidad del bloque. Se ha obtenido experimentalmente para una variedad de formas. En condiciones normales (20°C, 1 atmósfera) se admite 0,65 para velocidades subsónicas y 1,25 para velocidades supersónicas.

A y m dependen de la forma y tamaño de los bloques.

$$A = D^2 \text{ para cubos} \quad A = \frac{1}{4} \pi D^2 \text{ para esferas}$$

$$m = \rho_r D^3 \text{ para cubos} \quad m = \frac{1}{6} \rho_r \pi D^3 \text{ para esferas}$$

La verificación de las trayectorias balísticas de bloques durante las erupciones volcánicas no ha sido llevada a cabo habitualmente para las erupciones volcánicas, por lo que no se dispone de modelos de cálculo de trayectorias y distancias. Por este motivo, aunque sería factible desarrollar un modelo de cálculo complejo para la estimación de las trayectorias balísticas de bloques en erupciones efusivas, se ha optado por desarrollar el modelo más simple, dado que no se dispone de criterios suficientes para la estimación de parámetros que permita suponer que el esfuerzo adicional de desarrollo implique notables mejoras en los resultados.

Generación de los parámetros para la simulación

La obtención de información necesaria para generar los parámetros utilizados por la simulación de proyectiles balísticos es complicada para la isla de Tenerife, puesto que se dispone de escasos datos al respecto. Los parámetros requeridos para el cálculo se han extraído principalmente del análisis realizado por Solana (1997) en su tesis, donde se recoge información sobre las velocidades máximas alcanzadas por las bombas emitidas en varias de las erupciones históricas que han tenido lugar en la isla.

Modelización de erupciones explosivas

En la isla de Tenerife las erupciones de tipo explosivo (no se incluye en esta categoría las explosiones freáticas ni freatomagmáticas) han tenido lugar a lo largo de la historia asociadas con el volcanismo central. En el último periodo constructivo de la isla tan sólo se tiene constancia de la ocurrencia de erupciones ligeramente explosivas relacionadas con la generación de columnas subplinianas (erupción de Montaña Blanca, hace aprox. 8 Ka), por lo que se deduce que no existe un gran desarrollo de fenómenos eruptivos explosivos relacionados con la formación del complejo Teide – Pico Viejo (desde aprox. 170 Ka).

Esto no significa sin embargo que no sea posible que en el futuro se puedan producir eventos de la misma explosividad o superior, pero la carencia de información sobre estos eventos supone un grave inconveniente a la hora de valorar los posibles escenarios eruptivos que podrían tener lugar en el futuro y además corrobora el hecho de que resulta imposible el poder llevar a cabo la modelización probabilística de este tipo de erupciones.

Como se ha presentado en la propuesta de cálculo de la peligrosidad, con el fin de que al menos este tipo de fenómenos pueda ser tenido en cuenta a la hora de valorar los posibles efectos potenciales de erupciones de tipo explosivo, se ha planteado llevar a cabo la simulación de varios escenarios relacionados con la formación de columnas plinianas, con generación de piroclastos de caída.

La simulación de otro tipo de fenómenos, tales como la ocurrencia de coladas piroclásticas u oleadas piroclásticas implica (como ya se ha presentado en apartados anteriores) la utilización de modelos de elevada complejidad que no cumplen los criterios establecidos para llevar a cabo la simulación (aunque se puede valorar en futuras versiones la aplicación de un modelo de cono de energía simple que permita determinar para los mismos escenarios la zona máxima de alcance de flujos piroclásticos).

Partiendo de este conjunto de hipótesis y condiciones, en el presente apartado se presentan las características principales y los requerimientos que presentan los modelos de simulación seleccionados para llevar a cabo la simulación de los fenómenos de caída de cenizas en erupciones explosivas.

Modelos de simulación de columnas plinianas

Felpeto (2002) recoge en su tesis doctoral una breve revisión de los modelos disponibles para la simulación de columnas plinianas que se recoge de forma sintética en los siguientes párrafos y sirve de introducción para justificar la elección del modelo físico que se ha seleccionado para llevar a cabo la modelización.

Según esta tesis, los primeros modelos de caída de cenizas de erupciones plinianas surgieron de los estudios de dispersión de material de explosiones nucleares. Sobre esta base, Carey & Sigurdson (1982) desarrollaron una simulación numérica para tratar de explicar el comportamiento de la columna eruptiva generada durante la erupción del St. Helens en 1980. Posteriormente, Hopkins & Bridgman (1985) desarrollaron un modelo más complejo basado en el cálculo del eje principal de dispersión a partir de la trayectoria de 20 partículas de diferente tamaño y, a continuación, la distribución de toda la masa de ceniza siguiendo el eje calculado según una función normal bidireccional.

Otro tipo de modelos que se han desarrollado son los denominados de advección-difusión, entre los que destaca el de Suzuki (1993), que se basa en la difusión de partículas desde la columna eruptiva, advección horizontal debida al viento, difusión horizontal de las partículas debida a turbulencia atmosférica y caída de las partículas por efecto de la gravedad. La difusividad de las partículas es función del tiempo de caída de las mismas. La mayor limitación de este modelo es la simplificación de que considera el tiempo constante (modificado posteriormente por Glaze & Self, 1991) y el hecho de que no está basado en un modelo realista de estructura o dinámica de columna (Carey, 1996), por lo que los patrones de caída están controlados por parámetros empíricos que no pueden ser directamente relacionados con el proceso eruptivo.

Armienti et al. (1988) y Macedonio et al. (1988) presentaron un modelo de advección-difusión tridimensional en el que se considera nula la componente vertical del viento y constantes las componentes horizontales para cada altura. El modelo asumía que a distancias suficientes del centro emisor la columna eruptiva puede ser considerada como una fuente lineal vertical y que el movimiento de las partículas se puede describir mediante la advección atmosférica, la difusión y la caída por gravedad. El modelo se aplicó a la erupción del St. Helens y a la del Vesuvio del 79 a.C. con éxito. Sin embargo, este modelo requería tiempos de simulación muy largos y limitaba al usuario a correr un número específico de simulaciones, con distintos parámetros en cada ocasión.

Oberhuber et al. (1998) y Herzog et al. (1998) desarrollaron el modelo ATHAM (Active Tracer High resolution Atmospheric Model), el cual contempla una parametrización de los trazadores atmosféricos muy detallada, pero sin embargo la de las partículas volcánicas es muy simple, considerando únicamente dos tamaños (0,06mm y 2mm) y simetría esférica para las mismas.

Con posterioridad al análisis y revisión realizado por Felpeto en 2004, Pfeiffer et al. (2005) han desarrollado una versión modificada del modelo de Macedonio et al. que resuelve un modelo bidimensional semianalítico y que se diferencia del anterior por las siguientes características:

- La versión tridimensional de la ecuación de difusión-advección-sedimentación tiene en cuenta la componente vertical de la difusión atmosférica. En este nuevo modelo la difusión vertical y la componente vertical del viento se consideran irrelevantes.
- Macedonio et al. (1988) utilizaron una parametrización sencilla para todas las clases de velocidad de sedimentación para describir su dependencia con la altitud. En el nuevo modelo se adopta un modelo más general de velocidad de sedimentación que se basa en los datos experimentales de Walter et al. (1971) y Wilson & Huang (1979).
- Macedonio et al. (1988) tienen en cuenta la variación vertical de la altura de la columna (por modelos independientes). Asumieron la misma altura de columna eruptiva para cada fase y una emisión instantánea de la masa.
- Macedonio et al. (1988) utilizaron un perfil de viento de verano escalado y rotado establecido por observaciones estadísticas en el Sur de Italia. En este nuevo modelo, se utilizan varios modelos de viento y un perfil de vientos parametrizado, que se ajusta mejor a los datos observados.
- La modelización tridimensional requiere un elevado tiempo de cálculo, mientras que el modelo semianalítico simplificado puede ejecutar miles de cálculos en pocas horas de cálculo de PC.

Este último modelo ofrece además la gran ventaja de que el código para la ejecución del mismo se encuentra libremente disponible bajo el nombre de HAZMAP (Macedonio et al., 2005), lo que unido a que ofrece en la actualidad el código más versátil disponible, apoya la decisión de utilizarlo para llevar a cabo la simulación de los escenarios de erupciones explosivas en Tenerife.

El programa HAZMAP

El programa HAZMAP está escrito en FORTRAN 77 y corre sobre plataforma UNIX o PC. El programa corre en dos modos diferentes: modo depósito y modo probabilístico. En modo depósito el programa utiliza tan sólo un primer perfil de viento para llevar a cabo la simulación y genera un mapa que expresa la acumulación en Kg/m² de cenizas en cada una de las celdas de la zona de interés. En modo probabilístico el programa utiliza todos los perfiles de viento que se hayan almacenado en el correspondiente fichero y simula para cada uno de ellos el correspondiente depósito. A continuación, HAZMAP marca para cada una de las simulaciones resultantes las celdas que presentan una acumulación de depósito superior a un cierto umbral que especifica el usuario y genera un mapa que contiene la frecuencia (normalizada a 100) de que cada una de las celdas de la zona de trabajo supere este umbral.

El modelo presenta ciertas limitaciones debido a la necesidad que se tiene de simplificación de hipótesis. Para su aplicación hay que tener en cuenta las siguientes cuestiones:

- La validez del uso del modelo se limita a zonas situadas alejadas del centro de emisión, donde las dinámicas de la columna eruptiva juegan un papel menos relevante. Los resultados obtenidos por Macedonio et al. (1988) y Armienti et al. (1988) sugieren que la distancia crítica se encuentra aproximadamente situada a la distancia equivalente a la altura de la columna.
- Puesto que se asume que la difusión vertical y los componentes verticales del viento son despreciables con respecto a los horizontales, el modelo es intrínsecamente un modelo bidimensional y sus resultados deben ser considerados imprecisos en niveles atmosféricos inferiores y en zonas con relieve considerable, donde los efectos topográficos no se pueden obviar (la altura topográfica máxima que se encuentre en el dominio de cálculo debe ser inferior que la altura de la columna). Por esta razón el modelo no se puede aplicar para reconstruir la caída de cenizas de columnas eruptivas pequeñas.
- Los componentes horizontales del viento se consideran constantes en el tiempo y en el dominio horizontal. Esta asunción es válida para distancias intermedias del orden de 100 Km o superiores, pero es menos precisa para distancias mayores.

- Finalmente, si el modelo se usa sin tener en cuenta la variación de la velocidad de sedimentación con la altura los resultados son menos precisos en las zonas altas de la atmósfera.

Modelización de erupciones efusivas

La modelización de eventos ha comprendido todas aquellas tareas destinadas a realizar las simulaciones, tanto de tipo efusivo como de tipo explosivo. Para las erupciones de tipo efusivo se ha procedido a utilizar los servicios de un centro de supercomputación, ya que el volumen de simulaciones a procesar es muy elevado y los requerimientos tanto físicos como de tiempo para la ejecución del proyecto escapan a las capacidades habituales de las que se dispone para la realización de este tipo de procesos. Por lo que respecta a las erupciones de tipo explosivo, se han seleccionado en esta fase los escenarios a simular de acuerdo con una serie de criterios que han tenido como objeto el representar con la mayor fiabilidad posible el tipo de eventos de este tipo que cabe esperar que tengan lugar en el futuro.

Generador de Eventos

El generador de eventos constituye la pieza clave para la generación de la cartografía de peligrosidad. Su misión es la de apoyar en la generación de un volumen importante de escenarios independientes que representan el comportamiento eruptivo de la isla durante un intervalo de tiempo determinado. Para ello, hace uso de la información depositada en el modelo de datos y a partir de ella genera las variables necesarias para la simulación de los fenómenos físicos relacionados con la ocurrencia de erupciones efusivas. El generador incorpora asimismo una serie de variables intrínsecas para la simulación que no se encuentran almacenadas directamente en el modelo de datos pero que resultan necesarias para la ejecución de los modelos físicos. Estas variables representan parámetros físicos o variables que definen la tipología eruptiva de los fenómenos.

El generador de eventos constituye por tanto una herramienta que apoya el proceso iterativo de generación de datos para el análisis de la peligrosidad.

El generador de eventos constituye una herramienta que se utiliza en el proyecto para apoyar la definición de los escenarios para llevar a cabo la simulación y ejecutar cada uno de ellos, almacenando los resultados. Las características principales que lo definen son las siguientes:

- El generador extrae, a partir de un modelo de recurrencia implementado internamente, el número de eventos que se debe simular con el fin de representar la historia eruptiva correspondiente con ese intervalo.
- La herramienta utiliza la información almacenada en el modelo de datos para determinar la forma en la que se distribuyen los eventos a lo largo de la isla y las características de cada uno de estos eventos.

- Los datos que utiliza se almacenan en un repositorio único, basado en un gestor de bases de datos relacionales. Las relaciones existentes entre los diversos tipos de datos están claramente establecidas, con el fin de que sea posible en el futuro actualizarlas si fuese necesario.
- Los datos almacenados en el modelo pueden ser consultados mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), que se corresponde con el utilizado por el personal técnico del IGME que hará uso de la aplicación. El proyecto tiene también en cuenta las necesidades de almacenamiento de información del GIS Insular del Cabildo de Tenerife.
- En el generador se almacena internamente información correspondiente a variables o parámetros de cálculo que por sus características no es posible almacenar en una base de datos relacional.
- Para la simulación de cada uno de los eventos, el generador extrae las variables a partir de los datos almacenados internamente o del modelo de datos.
- El muestreo que se realiza para generar los parámetros de simulación de cada evento es de tipo aleatorio para garantizar la independencia de cada una de las simulaciones. Las características de las variables aleatorias se han definido en función de las de los datos que las originan.
- El generador pasa las variables de simulación a los modelos físicos seleccionados para el cálculo de la peligrosidad.
- El modelo físico es un componente independiente del generador, capaz de leer la información necesaria directamente desde el modelo y de almacenar los resultados de las simulaciones en formatos compatibles con los del Sistema de Información Geográfica.
- Para cada uno de los eventos se genera un escenario para la simulación de coladas lávicas y otro para los proyectiles balísticos, cuyos resultados se almacenan de forma independiente.
- En aquellos casos en los que las erupciones se producen a una distancia inferior a quinientos metros de la línea de costa marcada por el Modelo Digital de Terreno del Cabildo, se identifican éstas con el fin de poder realizar análisis posteriores que permitan identificar las áreas potenciales de ocurrencia de erupciones freatomagmáticas.
- Cuando los puntos emisores seleccionados aleatoriamente caen en el mar no se realiza simulación alguna, pero se identifican las simulaciones que generan, erupciones submarinas.
- El almacenamiento de los resultados del generador se realiza en un formato adecuado para su lectura y visualización, teniendo en cuenta los requerimientos de ejecución del modelo de simulación seleccionado. Su almacenamiento se realiza de forma sistemática y estructurada en un repositorio específico, independiente del modelo de datos central.

La arquitectura desarrollada se compone de:

- Un repositorio de datos central que sigue el modelo de datos establecido para el mismo. Los objetos espaciales se han almacenado según formatos específicos nativos de la base de datos y/o definidos expresamente para el proyecto.
- Una aplicación que permite:
 - Determinar el número de eventos a simular, su distribución y sus características eruptivas.
 - Extraer los parámetros de simulación para cada uno de los eventos, siguiendo un muestreo aleatorio de las distribuciones que intervienen en el mismo.
 - Una estructura para el almacenamiento de los resultados de cálculo de los escenarios que sea útil para la posterior ejecución de los modelos físicos de simulación.

Identificación del soporte tecnológico

Teniendo en cuenta las características enumeradas en el punto anterior, se han identificado aquellos soportes tecnológicos que puedan apoyar la ejecución del modelo de cálculo de la peligrosidad, condicionar su desarrollo y permitir la incorporación de la información procedente del IGME.

En cuanto al software, la solución final se ha implementado teniendo en cuenta:

- Software SIG: el IGME cuenta con diferentes licencias del Software ArcGIS de ESRI, por lo que es éste el que ha dado el soporte al generador de eventos y a los distintos componentes del sistema.
- Por lo que respecta a sistemas operativos, los puestos clientes del IGME están montados sobre S.O. Windows, por lo que el desarrollo de las herramientas se ha ejecutado en este entorno.
- No existe una directriz claramente marcada en lo referente a entornos de desarrollo, aunque puesto que la personalización de ArcGIS se realiza a través de VBA, se ha empleado en la personalización de este software lenguajes COM o .Net (VB, VB.Net, C++, Delphi y Delphi.Net, ...).
 - El generador de eventos se ha desarrollado en VBA, ya que presenta utilidades específicas para la lectura de ficheros y el tratamiento de cadenas de texto.
- En cuanto a las especificaciones de desarrollo, el generador de eventos se ha integrado en el SIG, en donde aparece como un botón dentro de una barra de herramientas independiente que se ha integrado en la interfaz principal del software. Los modelos físicos son componentes independientes de la aplicación.
- Por último, en lo que se refiere al acceso a los datos, se realiza en el entorno del software ArcGIS de ESRI. Estos datos se encuentran almacenados en una geodatabase personal que permite el acceso a los datos almacenados en el modelo y la utilización de las herramientas en el puesto de trabajo en el que se haya realizado la instalación.

Generación de los eventos a simular

Para obtener los ficheros necesarios para la ejecución del modelo físico que se ha utilizado para la simulación de las coladas lávicas, se ha utilizado el generador de eventos. Puesto que el modelo de datos incorpora la información necesaria para llevar a cabo la reproducción de los eventos de este tipo que podrían tener lugar en la isla de Tenerife durante un periodo de 250 Ka, en el generador se ha de definir exclusivamente la cantidad de celdas para las que se desea generar la información para llevar a cabo el proceso de simulación.

El análisis se ha llevado a cabo para la totalidad de la isla. En este caso, el generador lleva a cabo la distribución de los eventos atendiendo a las características de los datos incorporados en el modelo y la tipología de distribuciones que se han asimilado a cada uno de ellos. Las opciones para generar una celda o un evento se han incorporado a la interfase del generador en el caso de que se desee generar una cantidad limitada de ficheros de configuración de simulaciones de un área concreta, pero en ambos casos se aplican igualmente las características de toda la población de datos disponibles.

De la ejecución del generador de eventos se obtiene no sólo la configuración de ficheros necesaria para la ejecución de cada una de las simulaciones, sino además:

- La identificación de las coordenadas de cada uno de los puntos de emisión que configuran un evento (todos los eventos de la isla tienen carácter fisural, quedando éstos representados por la distribución de un conjunto variable de centros a lo largo de una directriz estructural principal que viene marcada por la información contenida en el modelo de datos).
- Aquellos centros de emisión que se ubican en zonas submarinas se salvan en un fichero aparte (mar.txt) con el objeto de poder trabajar con ellos de forma independiente.
- Los centros de emisión en los que puede tener lugar algún tipo de explosión freática o freatomagmática por encontrarse situados en la zona de influencia marina (hasta 500 m hacia el interior), se almacenan en un archivo aparte. La simulación de coladas se lleva también a cabo, pero se salvan las coordenadas para su posterior representación.
- Por último, la simulación de las posibles áreas de influencia de caída de proyectiles balísticos (máxima y mínima) se lleva a cabo durante la ejecución del generador de eventos, salvándose los resultados en un fichero independiente.

El total de las simulaciones resultantes del cálculo del modelo de probabilidad es de 707. Sin embargo, esta cifra es el resultado de aplicar una serie de redondeos en Excel para la obtención del número de simulaciones por tipo y celda. El número total de simulaciones a realizar para cumplir con el mínimo requerido por el modelo de recurrencia es de 631. Por este motivo, se han descartado 14 simulaciones de

grandes dimensiones debido a que los eventos que representan son excesivos teniendo en cuenta las características del registro histórico de Tenerife (por lo que se pueden considerar outliers).

Debido al gran número de simulaciones a realizar, el elevado tiempo de ejecución que el modelo físico requiere y los propios requerimientos de memoria derivados de la dimensión de los ficheros que debe manejar el programa (fundamentalmente el MDT, con una dimensión de 7.500 píxeles por 8.500 columnas), se ha tomado la decisión de llevar a cabo el proceso de simulación en la sede del C.E.S.G.A. (Centro de Supercomputación de Galicia), con sede en Santiago de Compostela.

- Para llevar a cabo la simulación, se ha dispuesto de hasta tres máquinas diferentes, cada una con su propia configuración y capacidad, lo que ha supuesto la necesidad de llevar a cabo las necesarias adaptaciones al modelo y a la simulación, teniendo en cuenta sus características.

Control de calidad de resultados

El resultado de este análisis ha permitido identificar aquellos resultados de las simulaciones que resultan inválidos o que no pueden ser utilizados directamente porque presentan algún tipo de limitación. Esta información ha sido utilizada para regular el número de simulaciones totales lanzadas en el CESGA, con el fin de garantizar que al menos el número final de las ejecutadas, tanto globalmente como por tipo de simulación, se correspondía con el exigido por el modelo de recurrencia.

Una vez que se han descargado los ficheros resultado de la ejecución de las simulaciones, se han realizado una serie de controles que han permitido determinar la calidad de los resultados obtenidos.

Por una parte, se ha comprobado el grado de finalización de las simulaciones determinando si el tiempo de ejecución límite establecido se ha cumplido y, en ese caso, el número total de iteraciones (una iteración equivale a la emisión desde un centro) que se han ejecutado.

En la mayor parte de los casos se completa la ejecución del ciclo completo sin problemas, aunque se ha observado que cuanto mayor es el tamaño de las simulaciones, más probable es que se superen los tiempos límites establecidos para la simulación, obteniéndose en estos casos resultados intermedios, que son los que se han utilizado para el cálculo de la peligrosidad.

De las simulaciones ejecutadas, un total de 13 (2% del total) han dado errores de ejecución en las diversas máquinas. Estos errores se atribuyen en todos los casos a problemas en el funcionamiento de los procesadores debidos a sobrecarga o una situación similar. Estas simulaciones presentan rangos de valores anómalos que conducen a la generación de ficheros que desde un punto de vista morfológico son correctas pero en las que los valores que en ellas aparecen son erróneos, por lo que no se han tenido en cuenta para el cálculo de la peligrosidad.

El resto de las simulaciones que han presentado resultados anómalos o no válidos (48, equivalentes a un 7,38% del total) se encuentran concentradas en un grupo muy específico de celdas de la malla regular, fundamentalmente en el entorno de la Caldera de las Cañadas. Se interpreta la concentración de errores en esta zona al hecho de que es habitual que los modelos físicos de simulación de lavas tienden a comportarse de forma anómala o errática en zonas llanas, lo que se da en todos estos casos. Esta concentración de errores en puntos concretos de la isla puede ir en detrimento de los resultados del cálculo de la peligrosidad en las zonas en particular donde se producen, por lo que se ha tenido en cuenta este hecho a la hora de realizar el postproceso de las mismas, con el objeto de evitar que presenten anomalías en el cálculo de la peligrosidad con respecto a las áreas colindantes.

Se observa en cualquier caso que las simulaciones que representan erupciones de tipo básico a intermedio por lo general completan el ciclo eruptivo sin mayores obstáculos mientras los volúmenes emitidos son relativamente reducidos. De hecho todas las simulaciones de pequeña magnitud se han ejecutado en su totalidad y sólo se comienza a observar la existencia de un número significativo de resultados intermedios a partir de las simulaciones equivalentes a 72 horas de simulación. Esta relación se presenta también para las simulaciones que representan erupciones sálicas, con la salvedad de que los volúmenes emitidos para este tipo de simulaciones son por lo general muy superiores a los de las básicas a intermedias y, en consecuencia, el número de simulaciones con ejecución parcial es superior.

Este comportamiento parece indicar que el modelo físico presenta también limitaciones para representar eventos en los que se emite un volumen importante de materiales. Sin embargo, también puede deberse al hecho de que las simulaciones de tipo sálico se ejecutan en una máquina diferente de las de tipo básico (por requerimientos de memoria del programa), por lo que se necesitaría de un análisis más detallado del que se ha podido llevar a cabo durante la ejecución del presente proyecto para identificar el factor o combinación de factores por los que se pueden superar en un punto dado los límites temporales de ejecución de las simulaciones. El análisis de este tipo de comportamiento requiere una interpretación detallada de la física del modelo que ha quedado fuera de nuestro alcance.

Cabe destacar que, pese a que este análisis se considera deseable con el objeto de que se corrija en futuras versiones del software o para aplicarlo a otras islas, este tipo de limitación no ha generado problemas en Tenerife, ya que:

- La mayor parte de las simulaciones quedan comprendidas en el rango que se consideraría de pequeñas a intermedias y se corresponden con erupciones de tipo básico a intermedio.

- Con las simulaciones ejecutadas se ha cumplido el cupo mínimo necesario para garantizar que se ha representado la actividad potencial que podría tener lugar en un intervalo temporal suficientemente amplio.

Un segundo control de calidad implementado para determinar la bondad de los resultados ha consistido en el análisis visual y estadístico de los mismos. En este proceso, los ficheros de cada una de las simulaciones se han analizado desde varios puntos de vista que garantizan que los mismos sean válidos a la hora de llevar a cabo el cálculo de la peligrosidad. Para cada uno de ellos se han verificado los siguientes puntos:

1. Límites geográficos del fichero: para cada una de las simulaciones se ha comprobado que la distribución geográfica de los productos es correcta y compatible con las de las bases de datos que integran el modelo de datos (dimensión total, tamaño de píxel, coordenadas geográficas, etc.).
2. Valores obtenidos para la simulación: se ha comprobado que cada una de las simulaciones tiene un rango de valores aceptables y acorde con el tipo de evento que representan. Especialmente, se ha tenido en cuenta que en los límites de la simulación se observen valores progresivamente decrecientes y que no aparezcan cortes o efectos que puedan derivarse de la mala representación del avance del frente de la colada. Hay algunos casos en los que las simulaciones han presentado errores:
 - a. Alrededor del 10% de las simulaciones restantes presentan valores anómalos puntuales, principalmente concentrados en las zonas cercanas al origen de las simulaciones. Estos casos, en los que se produce un efecto pixelado en las áreas afectadas, se han podido corregir ya que los valores anómalos que presentan suelen tener valores muy superiores a los del umbral superior de espesores obtenidos en la misma zona en la que se generan. Por tanto, todas estas simulaciones una vez rectificadas han sido tenidas en cuenta para el cálculo de la peligrosidad.
 - b. Todas las simulaciones presentan en los píxeles de borde de las áreas resultantes valores negativos de una magnitud muy reducida (generalmente valores negativos de cero en el tercer o cuarto decimal). Esta característica, más que ser considerada un error, se interpreta como el resultado de la resta de los valores de las simulaciones de los de la zeta del modelo digital de terreno, que al ser enteros puede producir pequeñas diferencias. Sin embargo, no afectan al cálculo de la peligrosidad ni producen efectos morfológicos sobre los resultados.
3. Adaptación a la topografía (distribución espacial de las coladas): un último control de calidad que se ha realizado, esta vez de forma estadística, ha sido analizar la distribución obtenida para las

simulaciones en relación con la topografía del área en la que se encuentran y, en especial, en relación con la red de drenaje. En este caso, todas las distribuciones analizadas cumplen con las especificaciones mínimas de calidad establecidas.

A la finalización de este proceso se ha obtenido como resultado el conjunto total de simulaciones ejecutadas con el objeto de proceder en una fase posterior con la generación de la cartografía de peligrosidad. En el MAPA 7 se muestran algunos ejemplos de resultados obtenidos para la simulación de escenarios concretos.

Modelización de erupciones efusivas

Una vez desarrollados los módulos y las bases de datos necesarias para la realización del cálculo de la peligrosidad derivada de la ocurrencia de las erupciones explosivas, se ha procedido a realizar la simulación de los eventos que se han considerado necesarios para valorar los posibles efectos que diversos escenarios pueden ejercer sobre la isla de Tenerife.

Selección de escenarios de simulación

Para la obtención de información sobre la susceptibilidad a la que se pueden ver sometidas distintas áreas de la isla en el caso de ocurrencia de un evento de tipo explosivo, similar a alguno de los que han tenido lugar en la última fase constructiva del complejo Teide – Pico Viejo, se han seleccionado varios escenarios sobre los que llevar a cabo la simulación:

1. En primer lugar se han seleccionado puntos teóricos a partir de los cuales podrían tener lugar eventos explosivos en el futuro. Las coordenadas de su ubicación que requiere para su funcionamiento el modelo tan sólo sirven para hacer referencia al entorno en el que pueden tener lugar y no a los complejos en relación con los cuales se relacionan estas coordenadas (es decir, no se han tomado en función del conocimiento de características internas del complejo Teide-Pico Viejo, sino para determinar los efectos que se derivarían si un evento de determinadas características tuviera lugar en ese entorno). Los tres puntos de emisión se han situado en zonas cercanas a:
 - a. Los Roques Blancos
 - b. Montaña Abejera
 - c. Montaña Blanca

De esta forma se han representado eventos situados en distintos cuadrantes del complejo. Con posterioridad, se ha incorporado a la simulación una nueva área de cálculo situada en el entorno de las Narices del Teide.

2. Se han realizado dos tipos de simulaciones para cada uno de los tres puntos seleccionados:
 - a. En primer lugar se ha aplicado el modelo físico en “modo depósito”, con el objeto de obtener la carga potencial que podría depositarse en cada uno de los puntos de la isla en el caso de ocurrir un evento. Los valores que proporciona el modelo se presentan en Kg/m².
 - b. En segundo lugar, se ha ejecutado el modelo físico en modo probabilístico para los tres puntos seleccionados inicialmente, con el objeto de determinar el grado de probabilidad de que, en el caso de ocurrencia de un evento de las características que se describen a continuación, se produzca una acumulación de piroclastos en un área para un umbral determinado. El umbral que se ha tomado como referencia para la simulación probabilística

es de 100 Kg/m², ya que es en este rango de valores en el que se comienza a producir habitualmente el colapso de tejados si la ceniza está seca (el umbral se reduce en el caso de que esté húmeda).

3. Para la simulación se ha utilizado el fichero de vientos resultante del análisis de los perfiles de distribución verticales que se han descrito en el inventario y análisis de datos. En función del escenario de simulación que se ha llevado a cabo, se han generado dos tipos de ficheros de vientos, de acuerdo con las especificaciones del modelo físico:
 - a. Para la simulación en modo depósito se ha generado un perfil de vientos único para cada una de las cuatro estaciones del año. Puesto que el modelo requiere la utilización de un único perfil, las simulaciones se han generado para los vientos dominantes (moda) en cada una de las estaciones y para cada una de las alturas que componen el perfil. Cada uno de los perfiles se ha almacenado en un directorio con el nombre que corresponde a la estación del año que representan.
 - b. Para la simulación de tipo probabilístico, se ha generado un fichero que contiene la totalidad de perfiles que cumplen los requerimientos mínimos para la simulación. El fichero resultante se ha almacenado junto con el resto en el mismo directorio.
4. Todos los escenarios se han simulado para la ocurrencia de un evento de tipo “medio”, que se correspondería con una erupción del tipo de Montaña Blanca. Se ha valorado la emisión de masa para una erupción ligeramente superior a ésta en aproximadamente 0,05 Km³. Se ha llegado a esta cifra teniendo en cuenta los datos procedentes de publicaciones en las que se estiman valores para eventos similares en distintas partes del mundo, ya que la información disponible a partir de publicaciones que hacen referencia al cálculo de volúmenes para esta erupción no se mantienen en diversas publicaciones. En particular, Ablay (1995) estima el volumen emitido para la erupción más reciente de Montaña Blanca en 0,3 Km³, lo que supone un orden de magnitud por encima de los valores comunes que presentan otros volcanes de características similares. Se supone que esta sobrevaloración sea debida al hecho de que en esta cifra se incluyan no sólo los productos procedentes de la generación de nubes de ceniza, sino la masa total de materiales emitida para todos los fenómenos relacionados con el evento. El volumen se ha traducido a masa (en Kg) que es el formato en el que el modelo requiere que se introduzcan los datos, teniendo en cuenta la densidad media de los materiales emitidos en Kg/m³.
5. La altura de la columna que se corresponde con el volumen o masa simulados se ha establecido en 10 Km y se ha discretizado en 200 pasos verticales, cada uno con un intervalo de 50 metros, con el objeto de conseguir que la definición de la columna sea lo más detallada posible.
6. Por lo que se refiere a las clases granulométricas establecidas para la ejecución del modelo, se ha consultado la bibliografía disponible con el objeto de que éstas puedan asimilarse a la erupción tipo que podría tener lugar en el futuro. Puesto que el único evento del que se dispone información en la

última fase constructiva de la isla es Montaña Blanca, se ha recurrido al análisis granulométrico publicado para la misma en la tesis doctoral de Felpeto (2004). Ya que no existe en esta publicación una información detallada del análisis granulométrico de esta erupción, se ha procedido a desglosar la información estadística recogida con el objeto de que sea útil para la ejecución del modelo físico. De acuerdo con este análisis, la granulometría obtenida permite trabajar tan sólo con un tipo de partículas, con la siguiente distribución de valores de phi, densidad y porcentaje en peso:

phi	densidad	población
-6	800	0,2
-5	800	2,22
-4	800	7,71
-3	800	17,29
-2	800	25,29
-1	800	24,01
0	800	14,62
1	1200	6,37
2	1200	2,3

7. Una vez establecidos los parámetros básicos que definen las características principales de los eventos a simular, para llevar a cabo el cálculo de la velocidad de sedimentación de las partículas se ha utilizado el correspondiente subprograma del modelo físico seleccionado. De los tres métodos que propone el modelo para calcularla, se ha utilizado la opción que ha demostrado generar valores más ajustados a la realidad que cualquiera de los otros métodos incorporados. Los valores de velocidad de sedimentación obtenidos al aplicar el modelo se han reagrupado en intervalos, tal y como se establece en el método seguido por los autores y los valores resultantes se han aplicado al submodelo destinado a obtener la estratificación vertical de la columna.
8. Para el cálculo de la estratificación vertical, la forma de la columna viene determinada por el coeficiente de Suzuki (λ) que, después de la calibración del modelo y la consulta de publicaciones, se ha valorado en 6, con un factor de A de 4. Estos dos parámetros definen una columna en la que no existe un elevado grado de dispersión de partículas en altura, ya que dado que la altura de la columna eruptiva no alcanza niveles superiores de la atmósfera, las partículas más finas no alcanzan la estratosfera y la distribución final de los productos suele encontrarse en áreas relativamente próximas a la zona de emisión.
9. Por este mismo motivo, el coeficiente de difusividad se ha establecido en 1.000 ya que es el que parece de acuerdo con este mismo proceso adaptarse de forma más adecuada a la distribución de depósitos que ha tenido lugar en Montaña Blanca.

Una vez establecidos todos los parámetros necesarios para llevar a cabo cada una de las simulaciones se ha procedido a ejecutar cada uno de los subprogramas que componen el modelo físico y que son

independientes con el objeto de obtener los ficheros finales que requiere la ejecución del programa HAZMAP, que es el que utiliza la aplicación desarrollada. Los ficheros de parámetros finales para la ejecución en modo depósito y probabilístico, se han almacenado dentro de la aplicación y éstos son los que llama el modelo a la hora de realizar las simulaciones.

En cuanto al paso de malla utilizado, se ha aplicado una celda de 10x10 metros para las simulaciones en modo depósito, ya que se ha considerado que se requiere obtener un mayor nivel de detalles en éstas, al generarse como resultado de la aplicación del modelo la carga potencial en Kg/m². Para la ejecución del modelo en modo probabilístico este paso de malla se ha reducido a 100x100 metros, lo que ha permitido una mayor rapidez de ejecución del mismo sin que esto perjudique la calidad de los resultados, que en este caso ofrecen exclusivamente la probabilidad de que en cada una de las celdas se supere el umbral de carga que se ha establecido previamente.

Desarrollo de una Interfaz para la ejecución del modelo

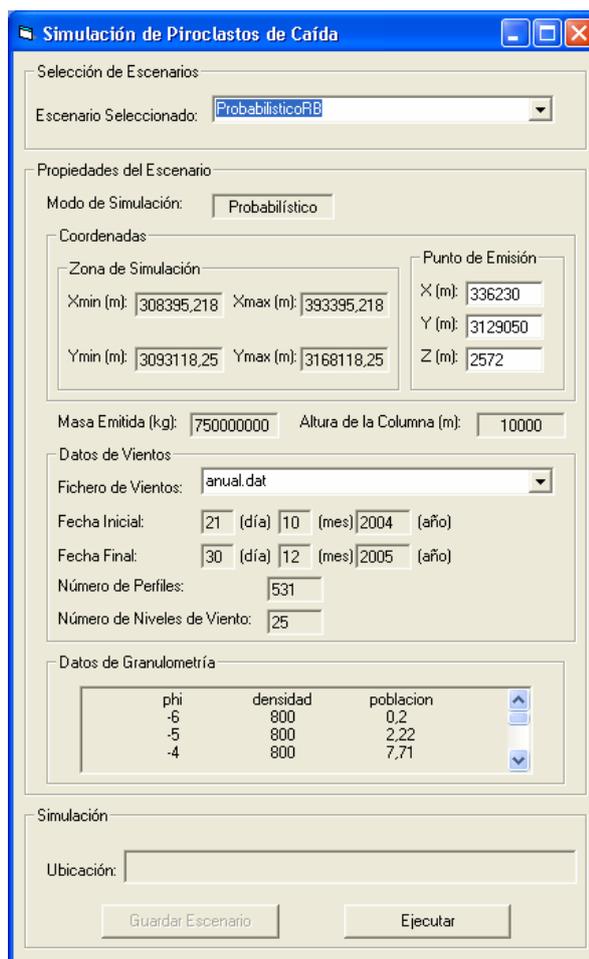
El simulador de piroclastos de caída se ha realizado en Visual Basic debido a su fácil integración en ArcGIS y al amplio número de posibilidades que ofrece. La base de datos con la que va a trabajar es una base de datos en Access, siendo de fácil manejo en Visual Basic.

Se ha desarrollado un formulario o diálogo que se muestra las siguientes opciones:

- Selección de Escenarios. En primer lugar se ofrece la posibilidad de seleccionar un escenario en concreto. El resto de opciones del formulario sólo se habilitarán si se selecciona uno de los escenarios disponibles en la lista.
- Propiedades del Escenario. Este conjunto de campos engloba una serie de campos TextBox destinados a mostrar las características o propiedades del escenario seleccionado, estos campos son:
 - Modo de Simulación: Este campo no es editable y se corresponde con el modo de funcionamiento del programa Hazmap.
 - Coordenadas del Escenario:
 - Zona de Simulación.
 - Xmin. Se corresponde con el valor mínimo de la coordenada X del escenario. Será el valor mínimo del modelo digital del terreno que se está simulando.

- Xmax. Es el valor máximo de las coordenadas X del escenario seleccionado. Se corresponde con el valor máximo de la X del modelo digital del terreno que se está simulando.
- Ymin. Este campo contiene el valor máximo de las coordenadas Y del escenario seleccionado.
- Ymax. Muestra el valor máximo de las coordenadas Y del escenario.
- Punto de Emisión. En este grupo se engloban las coordenadas del punto de emisión.
 - X. Coordenada X.
 - Y. Coordenada Y.
 - Z. Coordenada Z.
- Masa Emitida: Indica el total de masa emitida desde el punto de emisión en la simulación. Su valor corresponde al valor del escenario seleccionado.
- Altura de la Columna: Se corresponde con el valor perteneciente al escenario seleccionado. Indica la altura de la columna de piroclastos emitida en la simulación.
- Datos de Vientos: Engloba las características de un fichero de vientos en particular.
 - Fichero de Vientos. Permite seleccionar un fichero de vientos de entre los disponibles.
 - Fecha Inicial: Día, Mes, Año. Fecha de la primera medida de vientos que aparece en el fichero seleccionado.
 - Fecha Final: Día, Mes, Año. Última fecha de las medidas de vientos que forman el fichero de vientos seleccionado.
 - Número de Perfiles: Número de perfiles o distintas medidas realizadas en el fichero seleccionado.
 - Número de Niveles de Viento: Número de las distintas alturas a las que se han tomado las medidas.

- Datos de Granulometría: Campo en el que se muestran los datos de granulometría pertenecientes al escenario seleccionado.
- Simulación. Engloba las opciones de ejecución.
 - Ubicación. Al pulsar el botón de Ejecutar el resultado de la simulación y su localización aparecerá en este campo.
 - Guardar Escenario: Botón encargado de guardar un nuevo escenario. Se guardarán los valores modificados por los usuarios y el nuevo escenario guardado aparecerá desde ese instante en la lista de selección de escenarios. Habrá que dar un nombre al nuevo escenario de manera que no coincida con uno de los escenarios ya existentes.
 - Ejecutar. Este botón se encarga de iniciar la simulación del escenario actual, anteriormente se pedirá el nombre con el que se guardará la simulación.



Selección de Escenarios

Escenario Seleccionado: ProbabilísticoRB

Propiedades del Escenario

Modo de Simulación: Probabilístico

Coordenadas

Zona de Simulación:

Xmin (m): 308395,218 Xmax (m): 393395,218

Ymin (m): 3093118,25 Ymax (m): 3168118,25

Punto de Emisión:

X (m): 336230

Y (m): 3129050

Z (m): 2572

Masa Emitida (kg): 750000000 Altura de la Columna (m): 10000

Datos de Vientos

Fichero de Vientos: anual.dat

Fecha Inicial: 21 (día) 10 (mes) 2004 (año)

Fecha Final: 30 (día) 12 (mes) 2005 (año)

Número de Perfiles: 531

Número de Niveles de Viento: 25

Datos de Granulometría

phi	densidad	poblacion
-6	800	0,2
-5	800	2,22
-4	800	7,71

Simulación

Ubicación:

Guardar Escenario Ejecutar

Figura 26. Diagrama con escenario seleccionado

Ficheros de vientos

A partir del fichero de vientos completo, se han extraído varios ficheros de vientos que son los empleados para la ejecución del programa. Los ficheros obtenidos son: anual.dat, primavera.dat, verano.dat, otono.dat e invierno.dat.

El fichero anual.dat se corresponde con la totalidad de perfiles que ha superado los umbrales mínimos de calidad que se han establecido para la totalidad de ficheros descargados de la estación de radiosonda. Este fichero se ha utilizado para realizar el cálculo de la distribución probabilística de depósitos para los diversos escenarios seleccionados.

Los demás ficheros están compuestos por un único perfil de vientos, destinados para la ejecución en modo depósito, compuesto por la moda de los perfiles de cada estación del año. Para su obtención primero se ha creado un fichero intermedio con los valores de los perfiles correspondientes a cada estación del año, para después obtener de cada uno de ellos la moda o perfil dominante. De esta manera se han obtenido todos los ficheros que se han empleado en la simulación de los distintos escenarios de las simulaciones realizadas para los piroclastos de caída.

Para que el programa funcione correctamente y en el futuro incluya nuevos ficheros de vientos habrá que añadir un nuevo registro a la tabla Datos de la base de datos vientos.mdb que se encuentra en el directorio del programa indicando por lo menos el nombre del nuevo fichero de vientos que se desea incluir.

Cartografía de peligrosidad volcánica

Mapa de peligrosidad frente a coladas lávicas

Una vez completado el ciclo de ejecución de simulaciones en el CESGA y superada la fase de controles de calidad, se ha obtenido como resultado un total de 583 simulaciones válidas. De éstas, 367 se corresponden con erupciones de tipo básico (2 y 3) y 216 con erupciones de tipo sálico (4 y 5). Las primeras han cumplido prácticamente en su totalidad (a falta de 12 simulaciones) el mínimo requerido para completar los eventos que de acuerdo con el modelo de recurrencia representarían las emisiones posibles durante un periodo de 250 Ka. En el caso de las erupciones sálicas, esta diferencia se incrementa hasta 36, debido al hecho que se ha marcado en el informe de la tarea anterior relacionado con los problemas de ejecución del modelo en áreas de topografía plana, por lo que la totalidad de las simulaciones que han dado error se encuentran ubicadas en áreas de efusión en el circo de las Cañadas. Los efectos que este resultado han producido sobre el cálculo de la peligrosidad en esta zona se reflejan en apartados posteriores del presente informe, así como las posibles medidas para remediar las anomalías derivadas de los mismos.

El proceso definitivo de generación de la cartografía de peligrosidad volcánica ha constado de una serie de fases destinadas a realizar el análisis estadístico de los resultados de simulación.

Generación de la base de datos de eventos

Una vez seleccionadas las simulaciones que han cumplido con todos los estándares de calidad establecidos, se ha procedido a importar los resultados almacenados en cada una de ellas en una base de datos en formato Access. El objeto de este proceso es el de disponer de un repositorio único en el que se almacenen los valores de espesor para cada uno de los píxeles o celdas que componen las simulaciones. De esta forma, cada píxel se identifica de forma unívoca y es posible recorrer el fichero Access identificando todos los valores de espesor existentes para el mismo. Puesto que el volumen de datos a manejar es muy grande y a que es necesario mantener un proceso eficaz de los datos, el almacenamiento de los resultados se ha realizado de forma secuencial.

Las bases de datos en las que se importan los valores del espesor de lava de cada píxel tienen la siguiente estructura:

- Tabla DatosSimN (N número de la tabla): esta tabla es la que contiene los valores resultado de importar el fichero resultado de cada simulación. Tiene varios campos:
 - id: identificador del registro
 - Píxel: número del píxel del modelo digital del terreno que tiene un espesor distinto de cero
 - Celda: número de la celda a la que pertenece la simulación
 - Simulación: número de la simulación

- Espesor: nivel de espesor de lava del píxel para la simulación indicada por el número de celda y el número de simulación.
- Tabla TablasDatos: esta tabla contiene el nombre de las tablas con los datos importados que existen y el número de registros que posee cada una. Habrá más de una tabla con las importaciones de los resultados debido al límite de capacidad de las tablas de Access. Sus campos son:
 - id: identificador del registro
 - nRegistros: número de registros de la tabla DatosSimN
 - nombre: nombre de la tabla DatosSimN

Generación de estadísticas por celda de malla

Puesto que para obtener el valor de peligrosidad de cada uno de los píxeles que componen la malla se debe de asociar una distribución de tipo estadístico con cada uno de ellos, es necesario a continuación determinar los parámetros que van a definir ésta en cada punto.

En estudios de peligrosidad generalmente se utilizan distribuciones Pareto para determinar la probabilidad de excedencia de un determinado valor.

La distribución Pareto, que recibe su nombre del economista Vilfredo Pareto, es una probabilidad de distribución potencial que coincide con un gran número de fenómenos observables. En ocasiones también se hace referencia a ella como la distribución Bradford.

Pareto originalmente utilizó esta distribución para describir la distribución de la riqueza entre los individuos, atendiendo a que un pequeño porcentaje de la sociedad es el que retiene la mayor proporción de la misma. Esta idea, se expresa de forma simple como la regla 80-20 de Pareto, que establece que el 20% de la población percibe el 80% de la riqueza. Esta distribución no se limita sin embargo en exclusiva a describir este tipo de variables, sino que en general se aplica cuando existe una distribución del “pequeño” al “grande”.

Según los principios de esta distribución, si se considera el espesor como una variable aleatoria X con una distribución Pareto, la probabilidad de que X sea mayor que un determinado número x viene dada por la función:

$$\Pr(X > x) = (x / k)^{-\theta}$$

Para todos los $x \geq k$, en donde k es el valor mínimo posible (necesariamente positivo) de X , y θ es un parámetro positivo. La familia de las distribuciones Pareto se parametriza por dos valores: k y θ . Las distribuciones Pareto son continuas.

Para obtener los parámetros k y σ que definen una distribución Pareto se debe determinar por tanto en primer lugar los valores de corte (umbral inferior y superior) de la población que representa cada uno de los píxeles, con el objeto de cumplir la regla 80-20 que las caracteriza las distribuciones. Estos valores de corte deberán ser los mismos para toda la población de píxeles con dato, ya que de otra forma el mapa resultante sería incoherente.

Por ello, en primer lugar se ha procedido a generar las estadísticas de la población de espesores para cada una de las celdas. Este proceso se ha llevado a cabo analizando para cada píxel el número de valores presentes para una serie de intervalos de espesor preestablecidos y su frecuencia acumulada. Puesto que en el proceso de generación de la tabla que utiliza como fuente no se han tenido en cuenta los valores cero, es necesario determinar para cada uno de los puntos el número de simulaciones sin dato con el objeto de obtener la población total real para cada uno de ellos. Por ello, el proceso de generación de estadísticas solicita la introducción del número total de simulaciones válidas, que son las almacenadas en la base de datos origen y una vez obtenido éste, procede a generar las estadísticas para cada píxel.

Los intervalos en los que se ha estructurado la información de estadísticas son un total de 39. De ellos, la amplitud del intervalo se ha definido en 1 metro para los valores comprendidos entre 0 y 10 y de 5 metros para el resto hasta el máximo, fijado en 150 metros. Si existen valores superiores a éste (escasos), se han asimilado todos ellos al máximo. Todos los intervalos son abiertos por la derecha (es decir de tipo $[0,1), [1,2), [2,3)$, etc.) y el objeto de definir una amplitud menor en los primeros se debe al hecho de que es en estos valores en donde previsiblemente se establecerá casi con toda seguridad el valor de corte inferior de la población, ya que son los que se presentan de forma más frecuente en todas las simulaciones.

Los resultados de este proceso se han utilizado para definir los umbrales de corte de la población necesarios para generar los parámetros k y θ de la distribución Pareto. Para establecer los valores de corte se ha procedido a utilizar el método de los percentiles, que es por simple el que mejor se adapta a los requerimientos del post-proceso. Para ello, se ha tomado una muestra de los resultados del análisis de frecuencias y se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. En primer lugar se ha representado gráficamente la distribución acumulada de intervalos de valores de acuerdo con la distribución representada en la tabla (que dispone los valores con un mayor peso/frecuencia en primer lugar). A esta distribución se ha ajustado una distribución de tipo polinómico.
2. En segundo lugar se ha representado igualmente la frecuencia relativa de cada uno de los intervalos siguiendo el mismo criterio y se ha asociado una segunda curva polinómica.
3. Por último, se han determinado los valores de corte en la distribución acumulada, los cuales son equivalentes al 50% y 80% de la población. El que se haya podido seleccionar estos valores confirma que la población resultante de las simulaciones sigue la regla 20-50 de las distribuciones

Pareto, lo que demuestra que la población que se ha obtenido es coherente y que va a permitir generar un mapa de peligrosidad consistente, ya que no se presentan comportamientos anómalos. Los valores resultantes de la intersección de esta recta con cada una de las curvas marcan en principio los valores que se deberá asignar a los parámetros a y b de la distribución en cada uno de los píxeles.

Obtención de parámetros para distribuciones Pareto

Una vez que se ha tomado la decisión sobre los valores de corte que se deben de aplicar a cada uno de los píxeles de la distribución, se ha procedido a estimar los parámetros de la distribución Pareto de cada uno de ellos.

Las fórmulas que definen los valores de κ y θ son:

$$\hat{\kappa} = \left(\frac{P_b - P_a}{\left(\frac{1}{a^{\hat{\theta}}} \right) - \left(\frac{1}{b^{\hat{\theta}}} \right)} \right)^{1/\hat{\theta}}$$

$$\hat{\theta} = \frac{\log(1 - P_a) - \log(1 - P_b)}{\log(b) - \log(a)}.$$

Generación del mapa de peligrosidad volcánica

Los valores de k y θ se han generado para cada uno de los píxeles de la isla en los que ha llegado alguna simulación. El valor de la peligrosidad se expresa como la probabilidad de excedencia de un valor X (%) en un intervalo de tiempo (T) determinado. Ambas magnitudes están relacionadas por las siguientes magnitudes:

$$RP = T/r^*$$

Donde:

- Periodo de retorno (RP). En nuestro caso, el calculado a partir del modelo de recurrencia es de media de 396,22 años.
- T es el intervalo de tiempo que se representa y

$$r^* = r(1+0,5r)$$

en donde:

- r es la probabilidad de excedencia. Si por ejemplo fuera 0,10 representaría el 10% de los valores que se encuentran en la parte superior de la función de distribución Pareto, es decir, $F(x)=1-r$.

Puesto que el periodo de retorno es fijo, para estimar la peligrosidad volcánica en un píxel determinado es necesario fijar el T o el r ya que ambos son dependientes. Generalmente, puesto que los mapas de peligrosidad están destinados a apoyar a las Autoridades en la ordenación del territorio, se suele fijar el periodo de cálculo y a partir de él se extrae la probabilidad de excedencia correspondiente.

Para la generación de la cartografía de peligrosidad de Tenerife se ha determinado que el periodo de cálculo sea de 50 años ya que, por las características del fenómeno, la peligrosidad es muy baja en todo el territorio. En este caso, entonces, la ecuación que se ha resuelto es la siguiente:

$$RP(396,22) = T(50)/r(1+0,5r).$$

Una vez obtenido el valor de r , entonces la operación siguiente es la de obtener el valor $F(x)=1-r$ correspondiente de la distribución Pareto.

Finalmente, conocido $F(x)$, se ha despejado la ecuación de la distribución Pareto para obtener el valor de X (espesor) que se corresponde con esa probabilidad de excedencia utilizando para cada píxel los valores de k y σ calculados previamente. Los resultados de los modelos de simulación se expresan en metros, por lo que para facilitar la interpretación de los datos se ha transformado el resultado obtenido a milímetros y finalmente se ha aplicado un filtro de mediana al mapa resultante con el objeto de que se obtenga una superficie suavizada que facilite la interpretación del mapa.

Susceptibilidad frente a la caída de cenizas

Como resultado del cálculo de la susceptibilidad frente a la caída de cenizas se han obtenido los siguientes mapas:

- Mapas resultantes del cálculo en modo depósito: se ha generado un escenario individual para cada una de las cuatro zonas de emisión seleccionadas en los cuales los resultados reflejan la carga de piroclastos en Kg/m^2 que es esperable que se produzca en cada una de las celdas de 10 metros del mapa con las condiciones de simulación establecidas. Los cálculos se han realizado de manera individualizada para cada una de las estaciones del año, por lo que se ha obtenido un total de 16 mapas.
- Mapas resultantes del cálculo en modo probabilístico: para cada una de las zonas principales de emisión seleccionadas se ha obtenido una superficie de que representa la probabilidad de que se supere el umbral de 100 Kg/m^2 que se ha establecido en la simulación. Este umbral marca el límite habitual de carga en el que se suele comenzar a producir el colapso de tejados cuando la ceniza está seca. En el caso (común) de que se produzcan lluvias asociadas a la ocurrencia de erupciones

este umbral se reduce considerablemente, ya que la ceniza húmeda aumenta considerablemente su densidad.

Para los mapas generados en modo depósito se ha procedido a agregar los valores para cada una de las zonas de generación de columnas con el objeto de obtener las medias y los máximos anuales en cada una de ellas. El mapa de agregación de medias indica los valores que cabe esperar que se produzcan en el caso de una erupción para cada una de las zonas teniendo en cuenta la hipótesis de vientos dominantes. La agregación por medio de máximos indica por otra parte cuáles son los límites superiores esperables de carga en cada punto que es posible encontrar para el mismo tipo de evento.

Por último, para generar los escenarios de susceptibilidad frente a la caída de cenizas se ha procedido a agregar los resultados obtenidos para cada una de las zonas de emisión seleccionadas con el objeto de obtener un mapa de síntesis para cada una de los escenarios contemplados que indique la susceptibilidad frente a la ocurrencia de eventos en la zona de influencia de Teide-Pico Viejo (MAPAS 8 y 9).

Puesto que existe una correlación directa entre la carga de cenizas en cada punto y la potencia de cenizas acumuladas en el mismo, se ha generado una doble escala de referencia en la que quedan representadas ambas magnitudes con el objeto de facilitar la interpretación de los mapas. Para ello, se ha tenido en cuenta la distribución de la población de partículas que se han utilizado para la simulación y las densidades en Kg/m^3 asociadas con cada una de ellas y se ha calculado la densidad media ponderada para la población. Estos son los valores que se han utilizado como base para establecer la relación entre espesor y carga.

La escala que se ha utilizado para representar los eventos se ha generado utilizando varios umbrales que sirven como referencia de forma general para identificar hasta qué punto los tejados de las edificaciones pueden soportar la carga de la ceniza seca. En términos generales, se establece que el umbral de $100 \text{ Kg}/\text{m}^2$ es el que suelen soportar la mayor parte de los tejados antes de sufrir daños estructurales que puedan producir un colapso. Puesto que este umbral depende fundamentalmente de las características de las construcciones y de la forma de los tejados, se ha incluido en la representación de los mapas un umbral inferior con el objeto de identificar aquellas áreas que pueden verse dañadas por la caída de cenizas. En aquellas áreas en las que se alcanzan más de $300 \text{ Kg}/\text{m}^2$ es previsible que se produzca el colapso completo de los tejados. Existen numerosos ejemplos de erupciones ocurridas en las últimas décadas que verifican ambos umbrales.

Asimismo, se ha extraído a partir de los resultados otros dos umbrales característicos que resultan útiles en términos de planificación:

- Por una parte se ha identificado la zona límite para la realización de operaciones de tráfico aéreo (en tierra), que generalmente se establece en 2 mm. Espesores superiores a éste generalmente crean graves problemas en la realización de maniobras en tierra de los aparatos, así como daños en elementos como turbinas y motores.

- El segundo límite que se establece es el de maniobra de tráfico terrestre, que se ha marcado en 1 cm. En este caso, aunque los vehículos pueden operar habitualmente con espesores algo superiores de ceniza, es aconsejable que sólo aquellos especialmente diseñados realicen desplazamientos, ya que las características corrosivas de la ceniza volcánica afectan tanto a partes móviles como a los motores, por lo que deben estar especialmente protegidos.

Los mapas de susceptibilidad frente a la caída de cenizas muestran que existe una clara tendencia a la acumulación de los principales espesores hacia el Oeste de la isla en situación de vientos anuales dominantes. Sin embargo, al analizar los resultados estacionales individualmente se observa claramente que existe una diferencia en la distribución de los espesores en función de cuál de ellos se considere.

Cabe destacar que el análisis que se ha realizado se basa en la toma de una serie de decisiones estadísticas en cuanto al tratamiento de los datos y refleja los resultados de una serie de escenarios específicos. Pese a ello, la base de datos de vientos que se ha generado y la aplicación asociada permitirá a los usuarios el analizar una gran variedad de escenarios posibles.

Referencias bibliográficas

- Abdel-Monem, A., Watkins, N.D. y Gast, P.W. (1972): Potassium-Argon ages, volcanic stratigraphy and geomagnetic polarity history of the Canary Islands: Tenerife, La Palma and Hierro. *American Journal of Science*, v. 272: p. 805-825.
- Ablay, G.J. (1997): Evolution of the Teide volcano (Tenerife, Canary Islands). Tesis Doctoral. Instituto Geológico y Minero de España.
- Ablay, G.J. y Martí, J. (2000): Stratigraphy, structure, and volcanic evolution of the Pico Teide-Pico Viejo formation, Tenerife, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 103: p. 175-208.
- Ablay, G.J. ; Ernst, G.G.J. ; Martí, J. ; Sparks, R.S.J. (1995): The 2 Ka subplinian eruption of Montaña Blanca, Tenerife. *Bull. Volcanol.* 57: p. 337-357
- Alaniz-Alvarez, S.A., Nieto Samaniego, A.F., Ferrari, L. (1998): Effect of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican volcanic belt. *Geology* 26, no. 7, p. 591-594.
- Albarede, F. (1992): How deep do basaltic magmas form and differentiate? *J. Geophys. Res.* 97, p. 10997-11009.
- Alonso, J.J. (1986): Riesgo volcánico explosivo en Canarias. En: V. Araña (ed.) *Riesgo Volcánico. Seminario de la UIMP*, Sta. Cruz de Tenerife. p. 88-100.
- Alonso, J.J. (1989): Estudio volcanoestratigráfico y volcanológico de los piroclastos sálicos del sur de Tenerife. Tesis doctoral. Univ. de La Laguna, 356 pp.
- Ancochea, E., Anguita, F., Fúster, J.M., Hernán, F., Coello, J.C. y Sagredo, J. (1978a): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1104, III, La Orotava.
- Ancochea, E., Anguita, F., Fúster, J.M., Hernán, F., Coello, J.C. y Sagredo, J. (1978b): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1111, III, Fasnia.
- Ancochea, E., Anguita, F., Fúster, J.M., Hernán, F., Coello, J.C. y Sagredo, J. (1978c): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1111, IV-I, Güímar.
- Ancochea, E., Fúster, J.M., Ibarrola, E., Coello, J., Hernán, F., Cantagrel, J.M., Jamond, C. & Cendrero, A. (1989): Cronoestratigrafía de las series antiguas de Tenerife. E.S.F. meeting on Canarian Volcanism. Lanzarote, 367 pp.
- Ancochea, E., Fúster, J.M., Ibarrola, E., Cendrero, A., Coello, J., Hernán, F., Cantagrel, J.M. y Jamond, C. (1990): Volcanic evolution of the island of Tenerife (Canary Islands) in the light of new K-Ar data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 44 p. 231-249.

Ancochea, E. ; Brandle, J.L. ; Huertas, M.J. (1995): Alineaciones de centros volcánicos en la isla de Tenerife. *Geogaceta* 17, p. 56-59

Ancochea, E., Huertas, M.J., Fuster, J.M., Cantagrel, J.M., Coello, J. e Ibarrola, E. (1995b): Geocronología de la Pared de la Caldera de las Cañadas (Tenerife, Islas Canarias). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geología)*, v. 90, Nº 1-4: p. 107-124.

Andronico, D. & Cioni, R. (2002): Contrasting styles of Mount Vesuvius activity in the period between the Avellino and Pompeii Plinian eruptions, and some implications for assessment of future hazards. *Bull. Volcanol.* 64, p. 372-391.

Araña, V. (1988): Riesgo Volcánico en el área de Santiago del Teide. En: *Memoria Geológica de la Hoja 1110-IV, Santiago del Teide (1:25.000)*. ITGE, Madrid. 91 pp.

Araña, V. (1995): Notes on Canarian Volcanism. En: J. Martí & J. Mitjavila (eds.) *A field guide to the central volcanic complex of Tenerife (Canary Islands)*. Serie Casa de Los Volcanes nº 4, p. 3-17.

Araña, V. & Coello, J. (eds.) (1989): *Los volcanes y la Caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)*. ICONA, Serie Técnica nº 7, 443 pp.

Araña, V. & Ortiz, R. (1986): Marco geodinámico del volcanismo canario. *Anales de Física, serie B*, nº 82, p. 202-231.

Araña, V., Carracedo, J.C., Caraballo, J.M., Fúster, J.M., García, L., Pignatelli, R. y Pellicer, M.J. (1978a): *Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1096, II, Tejina*.

Araña, V., Carracedo, J.C., Caraballo, J.M., Fúster, J.M., García, L., Pignatelli, R. y Pellicer, M.J. (1978b): *Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1096, III, Valle Guerra*.

Araña, V., Carracedo, J.C., Caraballo, J.M., Fúster, J.M., García, L., Pignatelli, R. y Pellicer, M.J. (1978c): *Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1104, II, Barranco Hondo*.

Araña, V., Carracedo, J.C., Caraballo, J.M., Fúster, J.M., García, L., Pignatelli, R. y Pellicer, M.J. (1978d): *Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1104, IV, Tacoronte*.

Araña, V., Carracedo, J.C., Caraballo, J.M., Fúster, J.M., García, L., Pignatelli, R. y Pellicer, M.J. (1978e): *Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1104-1105 I-IV, Santa Cruz de Tenerife*

Araña, V., Martí, J., Aparicio, A., García-Cacho, L. & García-García, R. (1994): Magma mixing in alkaline magmas: An example from Tenerife (Canary Islands). *Lithos* 32, p. 1-19.

Armienti, P., Macedonio, G. & Pareschi, M.T. (1988): A numerical model for the simulation of tephra transport and deposition: applications to May 18, 1980 Mt. St. Helens eruption, *J. Geophys. Res.* 93, B6, p. 6463-6476.

- Baloga, S. & Pieri, D. (1986): Time-dependent profiles of lava flows. *J. Geophys. Res.*, 91 (B9), p. 9543-9552.
- Barca, D., Crisci, G.M., Di Gregorio, S. y Nicoletta, F. (1993): Cellular automata methods for modelling lava flows: simulation of the 1986-1987 eruption, Mount Etna, Sicily. En C.R.J. Kilburn y G. Luongo (Ed.). *Active lavas*. UCL Press Limited, London, p. 291-309.
- Barca, D., Crisci, G.M., Di Gregorio, S. y Nicoletta, F. (1994): Cellular automata methods for simulating lava flows: a method and examples of the etnean eruptions. *Transport Theory and Statistical Physics*, 23 (1-3), p. 195-232.
- Barrera, J.L., Gómez, J.A., Bellido, F., Ruiz, M.T., Araña, V., Cueto, L.A., Coello, J. y Hernández-Pacheco, A. (1988): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1110, IV, Santiago del Teide.
- Bellido, F., Brandle, J.L., Fúster, J.M., Hernández-Pacheco, A. y Fernández, S. (1978a): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1118, I, Granadilla de Abona.
- Bellido, F., Brandle, J.L., Hernández-Pacheco, A. y Fernández, S. (1978b): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1118-1124, II-I, Valle de San Lorenzo.
- Bellido, F., Gómez, J.A., Ruiz, M.T., Cueto, L.A., Araña, V., Coello, J. y Hernández-Pacheco, A. (1988a): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1103, II, Puerto de la Cruz.
- Bellido, F., Gómez, J.A., Ruiz, M.T., Cueto, L.A., Araña, V., Coello, J. y Hernández-Pacheco, A. (1988b): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1103, III, Icod de los Vinos.
- Boots, B.N. & Getis, A. (1988): *Point pattern analysis*. SAGE publications. 93 pp.
- Booth, B. (1984): Cartographic representation of volcanic hazards. Examples: Tenerife. En: D.R. Crandell, B. Booth, K. Kusumadinata, D. Shimozuru, G.P.L. Walker & D. Westercamp (eds.) *Source-book for volcanic hazards zonation*. UNESCO, p. 67-72.
- Bravo, T. (1980): Riesgo de erupciones volcánicas en las Canarias. Univ. de La Laguna. Informe para la D.G. de Protección Civil. 6 pp.
- Bryan, S. (1995): The Bandas del Sur pyroclastics. En: J. Martí & J. Mitjavilla (eds.) *A field guide to the central volcanic complex of Tenerife (Canary Islands)*. Serie Casa de los Volcanes nº 4, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, p. 39-46.
- Bryan, S.E., Martí, J. y Cas, R.A.F. (1998): Stratigraphy of the Bandas del Sur Formation: an extracaldera record of Quaternary phonolitic explosive eruptions from the Las Cañadas edifice, Tenerife (Canary Islands). *Geological Magazine*, v. 135, p. 605-636.

- Bryan, S.E., Cas, R.A.F. y Martí, J. (2000): The 0.57 Ma plinian eruption of the Granadilla Member, Tenerife (Canary Islands): an example of complexity in eruption dynamics and evolution. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 103, p. 209-238.
- Carey, S. (1996): Modeling of tephra fallout from explosive eruptions. En: Scarpa y Tiling (Ed.). *Monitoring and mitigation of volcano hazard*. Springer-Verlag, Berlin, p. 429-461.
- Carey, S. y Sigurdson, H. (1982): Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens volcano. *J. Geophys. Res.* 87 (B8), p. 7061-7062.
- Carracedo, J.C. (1975): Estudio paleomagnético de la Isla de Tenerife. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid: 265 pp.
- Carracedo, J.C. (1979): Paleomagnetismo e historia volcánica de Tenerife. *Aula cultura de Tenerife*: 82 pp.
- Carracedo, J.C. (1988): El riesgo volcánico. En: *Riesgos Geológicos. Serie Geología Ambiental*. Pub. Inst. Geol. Minero de España, Madrid, p. 83-97
- Carracedo, J.C. (1993): Volcanismo activo y medio ambiente en las Islas Canarias. *Tierra y Tecnología* 6, p. 61-70.
- Carracedo, J.C., Soler, V., Rodríguez Badiola, E. & Hoyos, M. (1990): Zonificación de riesgo para erupciones de baja magnitud en la isla de Tenerife. IV Reunión Nal. de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio (Gijón), p. 65-72.
- Carracedo, J.C., Pateme, M., Guillou, H., Pérez Torrado, F.J., Paris, R., Rodríguez Badiola, E. y Hansen, A. (2003): Dataciones radiométricas (^{14}C y K/Ar) del Teide y el Rift Noroeste, Tenerife, Islas Canarias. *Estudios Geológicos* 59, p. 15-29.
- Carracedo, J.C., Pateme, M., Guillou, H., Pérez Torrado, F.J., Paris, R., Rodríguez Badiola, E. y Hansen Machin, A. (2004): Análisis del Riesgo Volcánico asociado al flujo de lavas en Tenerife (Islas Canarias), *Estudios Geológicos* 60, p. 63-93
- Chester, D.K. ; Degg, M. ;Duncan, A.M. ;Guest, J.E. (2002): Volcanic hazard assessment in Western Europe. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 115, p. 411-435.
- Coello, J. (1973): Las series volcánicas de los subsuelos de Tenerife. *Estudios Geológicos*, v. 29: p. 491-512.
- Coello, J. y Bravo, J. (1989): Lineamientos volcano-tectónicos en la región central de Tenerife. En: Araña, V., Coello, J. (Eds.), *Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)*. ICONA, Madrid: p. 127-135.
- Cole, P.D., Guest, J.E., Queiroz, G., Wallenstein, N., Pacheco, J.M., Gaspar, J.L., Ferreira, T. & Duncan, A.M. (1999): Styles of volcanism and volcanic hazards on Furnas volcano, São Miguel, Azores. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* 92(1-2), p. 39-53.

- Connor, C.B. (1990): Cinder cone clustering in the TransMexican Volcanic Belt: Implications for structural and petrologic models. *Jour. Geophys. Res.* 95, no B12, p. 19395-19405.
- Connor, C.B. (2000): PVHA_YM Version 2.0 - Probabilistic Volcanic Hazard Assessment Methods for a Proposed High-Level Radioactive Waste Repository at Yucca Mountain, Nevada." ML033640083 2002-09-11 22 WM-00011 PRE NRC-02-97-009 Q200209170003 2002-09-11 2004-01-30 Prepared for U. S. Nuclear Regulatory Commission Contract NRC- 02- 97- 009
- Connor, C. y Hill, B. (1995): Three nonhomogeneous Poisson models for the probability of basaltic volcanism: Application to the Yucca Mountain region . *J. Geophys. Res.* 100, p.10.107-10.125.
- Connor, C., Stamatakos, J., Ferrill, D., Hill, B., Ofoegbu, G., Conway, F. (2000): Volcanic hazards at the proposed Yucca Mountain, Nevada, high-level radioactive waste repository. *J. Geophys. Res.*, p. 417-432.
- Crandell, D.R. & Mullineaux, D.R. (1978): Potential hazards from future eruptions of Mount St. Helens Volcano, Washington. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 1383-C, 26 pp.
- Cronin, S.J., Bebbington, M. & Lai, C.D. (2001): A probabilistic assessment of eruption recurrence on Taveuni volcano, Fiji. *Bull. Volcanol.* 63, p. 274-288.
- De la Cruz Reyna, S. & Carrasco Núñez, G. (2002): Probabilistic hazard analysis of Citlaltepétl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 113 (1-2), p. 307-318.
- De la Nuez, J.; Alonso, J.J. ; Quesada, M.L. ; Macau, M.D. (1993): Edificios hidromagmáticos costeros de Tenerife (Islas Canarias). *Rev. Soc. Geol. España*, 6, p. 1-2.
- Diggle, P.J. & Milne, R.K. (1983).- Bivariate Cox processes: some models for bivariate spatial point patterns. *Jour. R. Stat. Soc., Serie B* nº45, p. 11-21.
- Dobran, F. & Macedonio, G. (1992): Lava modeling contributions of the volcanic simulation group during the 1991-1992 eruption of Mt. Etna. VSG report no. 92-7. 32 pp.
- Dóniz Páez, F. J. (2001). La influencia de la topografía en las características morfológicas y morfométricas de los volcanes basálticos monogénicos de Tenerife (Islas Canarias). *Rev. C. & G.*, 15 (3-4), 125-129. © SEG. AEQUA. GEOFORMA Ediciones
- Dragoni, M. (1989): A dynamical model of lava flows cooling by radiation. *Bull. Volcanol.* 51, p. 88-95.
- Dragoni, M., Bonafede, M. y Boschi, E. (1986): Downslope flow models of a Bingham liquid: implications for lava flows. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 30, p. 305-325.
- Dragoni, M., Pondrelli, S., y Tallarico, A. (1992): Longitudinal deformation of a lava flow: the influence of Bingham rheology. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 52, p. 247-254.

- Edgar, C.J. (2003): Stratigraphy, eruption dynamics and pyroclastic flow emplacement of Quaternary phonolitic plinian eruption. The Fasnía Member of Diego Hernández Formation, Tenerife, Canary Islands (Spain). Tesis Doctoral, Universidad de Monash, Australia: 258 pp.
- Edgar, C.J., Wolf, J.A., Olin, P.H., Nichols, H.J., Pittari, A., Cas, R.A.F., Reiners, P.W., Spell, T.L. y Martí, J. (2007): The late Quaternary Diego Hernández Formation, Tenerife: a cycle of repeated voluminous explosive phonolitic eruptions. *Bull. Volcanol.* 57: p. 337-355.
- Esnaola, J.M., Martín, M., Bravo, T., Coello, J.C. y Nodal, T. (1984): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1110, III, Guía de Isora.
- Felpeto, A. (2002): Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica. Tesis doctoral (Inédita). Univ. Complutense.
- Felpeto, A.; García, A. y Ortiz, R., (1996): Mapas de riesgo. Modelización. En: R. Ortiz (Ed.) Riesgo Volcánico. Serie Casa de los Volcanes, 5. Cabildo de Lanzarote, Lanzarote, p. 67-98.
- Felpeto, A.; Araña, V.; Ortiz, R.; Astiz, M. y García, A., (2001): Assessment and modelling of lava flow hazard on Lanzarote (Canary Islands). *Natural Hazards* 23, p. 247-257.
- Fúster, J.M., Martín, M. y Fernández, S. (1978): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1118, IV, Adeje.
- Fúster, J.M., Araña, V., Brandle, J.L., Navarro, M., Alonso, U. y Aparicio, A. (1968): Geología y volcanología de las Islas Canarias: Tenerife. Instituto 'Lucas Mallada', CSIC, Madrid: 218 pp
- Fúster, J.M., Ibarrola, E., Snelling, N.J., Cantagrel, J.M., Huertas, M.J., Coello, J. y Ancochea, E. (1994): Cronología K-Ar de la Formación Cañadas en el sector Suroeste de Tenerife: Implicaciones de los episodios piroclásticos en la evolución volcánica. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, v. 89, Nº 1-4, p. 25-41.
- Galindo, I., Soriano, C., Martí, J., Pérez, N., (2005). Graben structure in the Las Cañadas edifice (Tenerife, Canary Islands): implications for active degassing and insights on the caldera formation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 144, p. 73– 87
- Galindo, I., (2005b). Estructura volcano-tectónica y emisión difusa de gases de Tenerife (Islas Canarias). PhD thesis, University of Barcelona, Spain, 350 pp.
- García Moral, R. (1989): Erupciones históricas en Tenerife. En: V. Araña & J. Coello (eds.) Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias). ICONA, Serie Técnica nº 7, p. 235-249.
- Glaze, L. y Self, S. (1991): Ashfall dispersal from the 16 September 1986, eruption of Lascar, Chile, calculated by a turbulent diffusion model. *Geophys. Res. Lett.* 18(7), p. 1237-1240.

- Gómez Fernández, F. (1997): Desarrollo de una Metodología para el Análisis del Riesgo Volcánico en el marco de un Sistema de Información Geográfica. Tesis doctoral (Inédita). Univ. Complutense, 255 pp.
- Gómez Fernández, F. (1998): Development of a Volcanic Risk Assessment Information System for the prevention and management of volcanic crises: stating the fundamentals. En C.A. Brebbia & P. Pascolo (eds.): GIS technologies and their environmental applications. Computational Mechanics Pubs., p. 111-120.
- Gómez Fernández, F. (2000a): Contribution of Geographical Information Systems to the Prevention and Management of Volcanic Crises. *Natural Hazards*, p. 347-360.
- Gómez Fernández, F. (2000b): Application of a GIS algorithm to delimit the areas protected against basic lava flows invasion at Tenerife Island. *Journal Volcanol. Geotherm. Res.*, 103/1-4, p. 409-423.
- Guillou, H., Carracedo, J.C., Paris, R. y Pérez Torrado, F.J. (2004): Implication for the early shield-stage evolution of Tenerife from K/Ar ages and magnetic stratigraphy. *Earth and Planetary Sciences Letters* 222: p. 599-614.
- Hernández-Pacheco, A. y Rodríguez-Losada, J.A. (1996): Geología y estructura del arco de Taganana (Tenerife, Canarias). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, v. 9, Nº 3-4, p.169-181.
- Herzog, M., Graf, H.F., Textor, C. y Oberhuber, H.M. (1998): The effect of phase changes of water on the development of volcanic plumes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 87, p. 55-74.
- Hill, B.E., Connor, C.B., Jarzempa, M.S., La Femina, P.C., Navarro, M. & Strauch, W. (1998): 1995 eruptions of Cerro Negro volcano, Nicaragua, and risk assessment for future eruptions. *GSA Bull.* 110-10, p. 1231-1241.
- Hopkins, A. y Bridgman, C. (1985): A volcanic ash transport model and analysis of Mount St. Helens ashfall. *J. Geophys. Res.* 90, p. 10.620-10.630.
- Huertas, M.J., Ancochea, E., Cantagrel, J.M., Coello, J., Fúster, J.M. e Ibarrola, E. (1994): Un episodio volcánico pre-Cañadas en la Isla de Tenerife. *Geogaceta.* 15, p. 113-116.
- Huertas, M.J., Arnaud, N.O., Ancochea, E., Cantagrel, J.M. y Fúster, J.M. (2002): ⁴⁰Ar/³⁹Ar Stratigraphy of pyroclastic units from the Cañadas Volcanic Edifice (Tenerife, Canary Islands.) and their bearing on the structural evolution. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 115, p. 351-365.
- Hürlimann, M. (1999): Geotechnical analysis of large volcanic landslides: The La Orotava events on Tenerife, Canary Islands. Tesis Doctoral, Universidad Técnica de Cataluña, Barcelona, 217 pp.
- Ibarrola, E., Ancochea, E., Fuster, J.M., Cantagrel, J.M., Coello, J., Snelling, N.J. y Huertas, M.J. (1993): Cronoestratigrafía del Macizo de Tigaiga: evolución de un sector del edificio Cañadas (Tenerife, Islas Canarias). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 88, p. 57-72.

- Ishihara, K., Iguchi, M., y Kamo, K. (1990): Numerical simulation of lava flows in some volcanoes in Japan. En J.H. Fink (Ed.). Lava flows and domes. Emplacement mechanisms and hazard implications. Springer-Verlag, Berlin, p. 174-207.
- Lam, D.C.L. & Swayne, D.A. (1991): Integrating database, spreadsheet, graphics, GIS, statistics, simulation models and expert Systems: experiences with the Raison system on microcomputers. NATO ASI Series G26, pp. 429-459.
- Larson, R. & Pitman, W. (1972): World-wide correlation of Mesozoic magnetic anomalies, and its implications. Geol. Soc. Am. Bull. 83, pp. 3645-3662.
- McBirney, A.R.; Murase, T. (1984): Rheological properties of magmas. Ann. Rev. Earth Planet Sci., 12: 337-357.
- Macedonio, G. (1996): Modeling lava flow hazard. En: F. Barberi, R. Casale & R. Fantechi (Ed.) The mitigation of volcanic hazards. Proceedings of the course. European Commission. p. 89-95.
- Macedonio, G. (1998): Modelling of effusive eruptions. Course on "Volcanic Hazard Assessment, Monitoring and Mitigation". S. Miguel Island, Azores, Portugal.
- Macedonio, G., Pareschi, M.T. y Santacroce, R. (1988): A numerical simulation of the plinian fall phase of 79 A.D. eruption of Vesuvius. J. Geophys. Res. 93 (B12), p. 14.817-14.827.
- Macedonio, G., Pareschi, M.T. & Santacroce, R. (1990): A simple model for lava flow hazard assessment: Mount Etna, International Volcanological Congress (IAVCEI), Mainz (Germany).
- Macedonio, G. & Costa, A. (2005): A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard. Computer & Geosciences 31, 7, p. 837-845
- Martí, J. (1996): Volcanological evolution of the Cañadas-Teide volcanic system. Definition of the volcanological guidelines for the evaluation of the potential volcanic risk in Tenerife. Final report of the European Union project European Laboratory Volcanoes, Teide: Subproject 2, contract EV5V-CT-0823, 64 pp.
- Martí, J., Mitjavila, J. y Villa, I.M. (1990): Stratigraphy and K-Ar ages of the Diego Hernández wall and their significance on the Las Cañadas Caldera formation (Tenerife, Canary Islands). Terra Research: p. 148-153.
- Martí, J., Mitjavila, J. y Araña, V. (1994a): Stratigraphy, structure and geochronology of the Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Island). Geological Magazine 131, N° 6, p. 715-727.
- Martí, J., Araña, V., Ablay, G., Bryan, S., Mitjavila, J., Raposo, S., Pujadas, A. & Romero, C. (1994b): Caracterización de la actividad eruptiva en Tenerife durante los últimos 200.000 años. En: A. García & A. Felpeto (eds.) In Memoriam Dr. José Luis Díez Gil, Serie Casa de los Volcanes nº 3, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, p. 157-178.

- Martí, J. Mitjavila, J. & Araña, V. (1995): The Las Cañadas Edifice and caldera. En: J. Martí & J. Mitjavila (eds.) A field guide to the central volcanic complex of Tenerife (Canary Islands), Serie Casa de los Volcanes nº 4, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, p. 19-38.
- Martín, M., Esnaola, J.M., Bravo, T., Coello, J.C. y Argüelles, A. (1984a): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1110, I, Las Cañadas del Teide.
- Martín, M., Esnaola, J.M. y Nodal, T. (1984b): Mapa Geológico de España, 1:25.000, IGME, Hoja 1110, II, Llano de Ucanca.
- Mazzarini, F. & Armienti, P. (2001): Flank Cones at Mount Etna Volcano: Do they have a power-law distribution? Bull. Volcanol. 62, p. 420-430.
- Mezcua, J., Ortiz, R., Buforn, E., Galán, J., Herraiz, M., Martínez Solares, J.M., Rueda, R. & Sánchez Venero, M. (1989): Estudio de la actividad sísmica en la isla de Tenerife. En: V. Araña & J. Coello (eds.) Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias). ICONA, Serie Técnica nº 7, p. 397-403.
- Miller, C. Dan (1989): Potential Hazards from Future Volcanic Eruptions in California. U.S. Geol. Survey Bull. 1847, 17 pp.
- Miyamoto, H. ; Sasaki, S. (1997): Simulating lava flows by an improved cellular automata method. Computers and Geosciences 23, 283-292.
- Newhall, C.G. & Hoblitt, R.P. (2002): Constructing event trees for volcanic crises. Bull Volcanol 64: 3-20
- Newhall, C.G. & Self, S. (1982): The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. Jour. of Geophys. Res. 87, nº C2, pp. 1231-1238.
- Oberhuber, H.M., Herzog, M., Graf, H.F., y Schwanke, K. (1998): Volcanic plume simulation on large scales. J. Volcanol. Geotherm. Res. 87, p. 29-53.
- Ortiz, R., Alguacil, G., Olmedillas, J.C, García, A. & Felpeto, A. (1995): Teide Decade Volcano: development of instrumentation for volcano monitoring. Per. Mineral 64, pp. 53-54.
- Park, S. y Iversen, J.D. (1984): Dynamics of lava flows: thickness growth characteristics of steady two dimensional flow. Geophys. Res. Lett. 11 (7), p. 641-644.
- Pfeiffer, T., Costa, A., Macedonio, G. (2005): A model for the numerical simulation of tephra fall deposits. J. Volcanol. Geotherm. Res. 140 (4), p. 273-294.
- Pitman, W. & Talwani, M. (1972): Seafloor spreading in the North Atlantic. Bull. Geol. Soc. Am. 83, p. 619-646.

- Rodríguez-Losada, J.A., Martínez-Frías, J., Bustillo, M.A., Delgado, A., Hernández-Pacheco, A. y Krauss, F. (2000): The hydrothermally altered ankaramite basalts of Punta Poyata (Tenerife, Canary Islands). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 103, p. 367-376.
- Romero, C. (1990): Resumen de la Tesis Doctoral "Manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario". Universidad de La Laguna: 55 pp.
- Romero, C. (1991): Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario. Tesis Doctoral, Departamento de Geografía, Univ. de La Laguna. Gobierno de Canarias (ed.). 2 vols., 1391 pp.
- Romero, C. (1992): Estudio geomorfológico de los volcanes históricos de Tenerife. Aula de Cultura de Tenerife, Cabildo Insular: 265 pp.
- Schmincke, H. (1982): Volcanic and chemical evolution of the Canary islands. En: von Rad, Hinz, Sarnthein & Seibold (eds.) *Geology of the NorthWest Africa Continental Margin*. Berlín: Springer-Verlag, pp. 273-306.
- Sclater, J., Hellinger, S. & Tapscott, C. (1977): The paleobatimetry of the Atlantic Ocean from the Jurassic to present. *Jour. Geology* 85, pp. 509-552.
- Simkin, T. & Sieber, L. (1994): *Volcanoes of the World*. Geoscience Press. Tucson.
- Small, C. & Naumann, T. (2001): The global distribution of human population and recent volcanism. *Environmental Hazards* 3, p. 93-109.
- Solana Garcia, M.C. (1997): Evaluación de la peligrosidad volcánica en Tenerife a partir de la reconstrucción de cuatro erupciones históricas. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Suzuki, T. (1983): A theoretical model for the dispersion of tephra. En : D. Shimozuru y I. Yokoyama (Eds.) *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, p. 95-113.
- Thirlwall, M.F., Singer, B.S. y Marriner, G.F. (2000): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and geochemistry of the basaltic shield stage of Tenerife, Canary Islands, Spain. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 103, p. 247-297.
- Tilling, R.I. (ed.) (1989): *Volcanic Hazards. Short Course in Geology: volume 1*. American Geophysical Union, 198 pp.
- Tomblin, J. (1986): *Canary Islands: Volcanic risk evaluation, monitoring and emergency planning*. Ginebra: UNDRO
- Vieira, R. & Sevilla, M. (1989): Red geodésica de la Caldera de Las Cañadas. En: V. Araña & J. Coello (eds.) *Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)*. ICONA, Serie Técnica nº 7, p. 423-426.
- Wadge, G., Young, P.A.V. & McKendrick, I.J. (1994): Mapping lava flow hazards using computer simulation. *Jour. Geophys. Res.* 99, no B1, p. 489-504.

Walter, T.R. y Schmincke, H.-U. (2002): Rifting, recurrent landsliding and Miocene structural reorganization on NW-Tenerife (Canary Islands). *International Journal of Earth Science* 91, p. 615-628.

Wilson, L. y Huang, T.C., (1979): The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles. *Sarth Planet. Sci. Lett.* 44, p. 311-324.

Woo, G. (1999): *The Mathematics of Natural Catastrophes*. Imperial College Press. 358 pp.

Young, P. y Wadge, G. (1990): FLOWFRONT: simulation of a lava flow. *Computers & Geosciences* 16(8), p. 1171-1191.

Zafrilla, S. (2001): *Relaciones entre la evolucion magmatica y la actividad volcanica en el edificio Cañadas (Tenerife)*. Tesis Doctoral. Instituto Jaime Almera.

