



ABRIR CAPÍTULO V

VI. Implementación del Modelo Cartográfico

VI. IMPLEMENTACION DEL MODELO CARTOGRAFICO

Para completar el desarrollo de la metodología,- una vez establecidas las condiciones de implementación y conocidas las características del área de trabajo-, es necesario implementar el modelo cartográfico. Con el término de implementación se hace referencia al conjunto de operaciones que se deben llevar a cabo para construir la base de datos del GIS y desarrollar los módulos de proceso de datos que harán posible su funcionamiento.

La implementación del modelo cartográfico requiere la existencia de un software de base, especializado en la gestión de datos geográficos (en nuestro caso ILWIS), que permita el almacenamiento de las bases de datos que forman parte del modelo y que proporcione las capacidades de análisis espacial que se requieren para llevar a cabo las operaciones necesarias para el cálculo.

Como ya hemos indicado previamente, vamos a destinar el estudio piloto a la generación de escenarios comparativos de riesgo para manifestaciones de tipo efusivo básico en Tenerife a escala regional. Esta simplificación nos ha permitido centrarnos en la implementación de aquellas bases de datos, modelos físicos y operaciones necesarias exclusivamente para llevar a cabo el objeto de nuestro análisis.

En los siguientes apartados aparecen desarrollados los procedimientos que hemos seguido para generar la base de datos del GIS y, a continuación, se presentan los procesos de cálculo automático que hemos diseñado para la facilitar la generación reiterada de escenarios y su presentación gráfica. En último lugar, se presenta la estructura de la aplicación obtenida como resultado de la ejecución de estas tareas.

VI.1. Implementación de las bases de datos necesarias para la evaluación del riesgo.

En ILWIS, las operaciones de análisis espacial se ejecutan sobre mapas en modo ráster, lo que, unido a las ventajas que representa la gestión de la información en este formato (véase capítulo III), nos ha decidido ha almacenar las bases de datos que forman parte del modelo cartográfico según este modelo.

Para que las operaciones de análisis espacial se puedan llevar a cabo, es necesario que todos los datos gráficos se sitúen en un marco de referencia común y que el tamaño del *píxel* sea el mismo para todos ellos.

Por este motivo, hemos referenciado los datos con respecto al sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) tomando como origen el meridiano de Greenwich (algunos de los datos cartográficos de Canarias están referidos al meridiano de Madrid) y les hemos asignado un tamaño de píxel de 50 metros, lo que nos ha permitido llegar hasta un nivel de detalle en el análisis de 1:250.000.

La información de tipo alfanumérico asociada a las bases de datos gráficas, cuando existe, la hemos almacenado en forma de tablas con un formato ASCII estándar. Para que sea posible relacionar la información almacenada en éstas con los datos gráficos hemos establecido los nexos de conexión necesarios entre ambos tipos de datos.

ILWIS basa su funcionamiento sobre una estructura de base de datos de tipo relacional. Por ello, la forma en la que se ha establecido la conexión ha sido identificando en las columnas o *campos* de las tablas los valores que toman los atributos y en los *registros* o líneas la información correspondiente al código de mapa gráfico (valor digital) a que hacen referencia los atributos.

VI.1.1. Bases de datos volcanológicas.

Para generar la información necesaria sobre las características que presentan las manifestaciones de tipo efusivo básico en Tenerife, hemos analizado previamente: (1) las áreas fuente en las que pueden tener lugar cualquiera de los fenómenos que se presentan en la isla y (2) su distribución preferente en el espacio.

El primer análisis nos ha permitido establecer las zonas en las que con mayor probabilidad se desarrollarán erupciones en el futuro (e.d. el área probable de erupción) y el segundo nos ha servido para determinar las áreas en las que se han distribuido preferentemente los fenómenos objeto de estudio (e.d. la distribución de estilos eruptivos) .

Para la obtención de esta información hemos considerado la isla en su conjunto como un sistema volcánico, lo que nos ha permitido desarrollar procedimientos que tengan en cuenta el contexto espacial en el que se desarrollan los fenómenos volcánicos y que proporcionen a su vez información sobre las relaciones existentes entre ellos, evitándose de este modo la "parcialidad de enfoques" en la que se ha incurrido en estudios previos.

a) Area Probable de erupción.

Para el estudio del área probable de erupción hemos analizado la distribución de los centros emisores visibles pertenecientes a las series identificadas como III y IV en la cartografía MAGNA (escala 1:25.000) del Instituto Tecnológico y Geominero (figura 6.1).

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 las series III y IV varía de unos puntos a otros de la isla, 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.



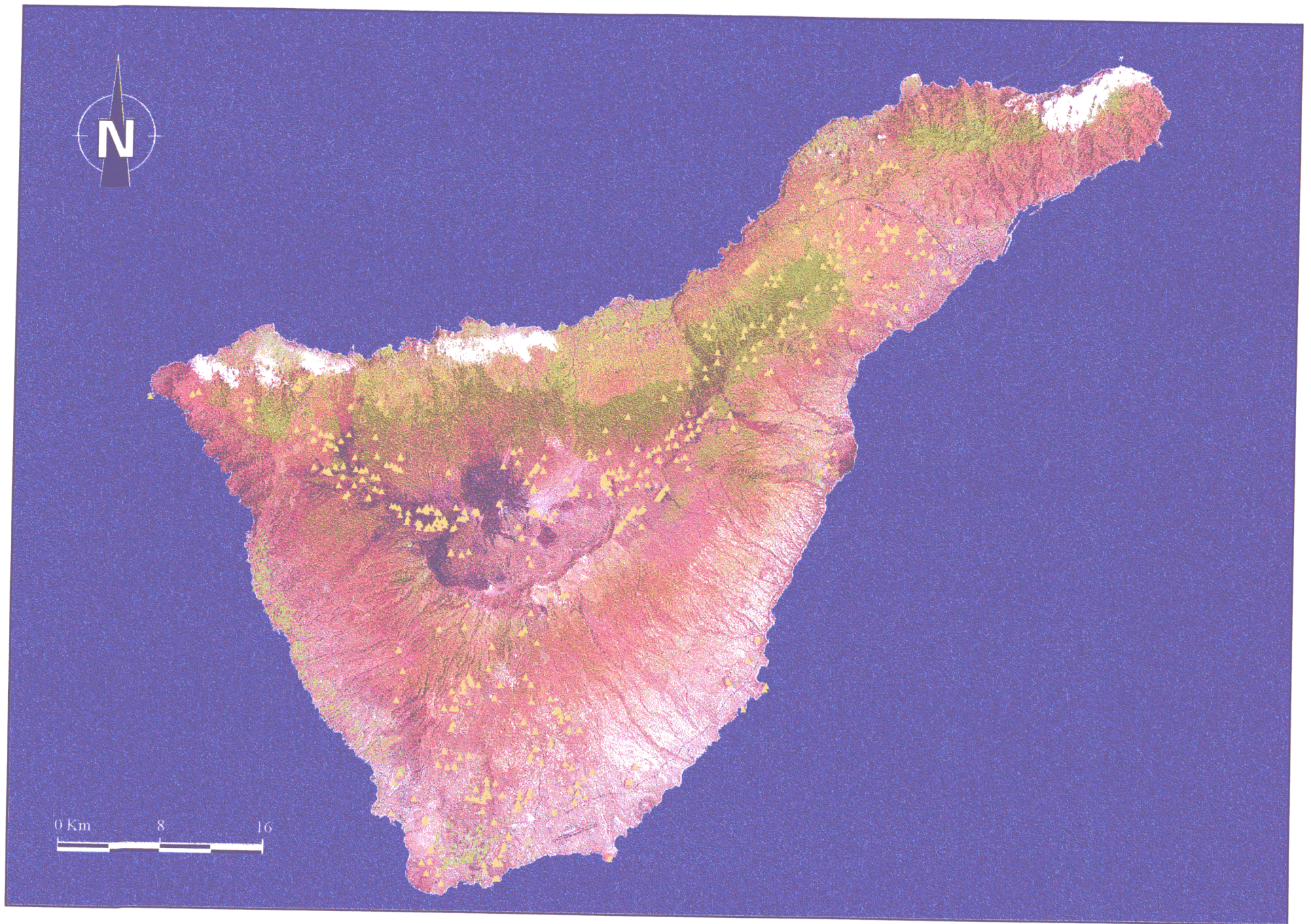


Figura 6.1. Distribución de los centros de emisión visibles pertenecientes a las series III y IV (triángulos). Imagen base: composición Landsat 5 TM 5-4-3 (RGB).

Para realizar el análisis del área probable de erupción hemos introducido en el sistema las coordenadas del "*centro teórico*" que representa el punto principal de emisión identificado en la cartografía MAGNA y se ha comprobado su correcto posicionamiento haciendo uso de una composición en falso color (5-4-3 RGB) de una imagen del satélite Landsat 5 TM (*Thematic Mapper*), la cual hemos corregido geométricamente con anterioridad para que se ajuste a la malla geográfica de referencia elegida con un error medio menor del tamaño del píxel.

El número total de centros considerados es de 459, de los cuales 304 pertenecen a la serie III, 138 a la serie IV y 17 a erupciones históricas (tabla B1, Anexo B). Para estimar el área probable de erupción a partir de estos datos debemos primero establecer si la distribución de los centros obedece a algún tipo de patrón definido o es aleatoria.

Este análisis es necesario porque, si la distribución de los centros fuese aleatoria, significaría que las erupciones pueden tener lugar en cualquier punto de la isla y que, 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 proximo (*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*), el cual se estima a partir de una serie de patrones pre-establecidos.

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.

En nuestro caso, los resultados obtenidos del análisis parecen indicar que el patrón de distribución es de tipo agrupado (tabla 6.1):

Tabla 6.1. Resultados del análisis de vecinos reflexivos.

| Orden | Valor observado | Valor esperado en situación de aleatoriedad absoluta |
|-------|-----------------|--|
| 1 | 272 | 285.27 |
| 2 | 138 | 151.06 |
| 3 | 106 | 111.58 |
| 4 | 66 | 92.49 |
| 5 | 62 | 80.78 |
| 6 | 46 | 72.61 |

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 (Boot & Getis, 1988). Los resultados obtenidos al aplicar este método para la distribución de centros eruptivos son conformes con los que se han obtenido para las medidas de agrupamiento (tabla 6.2).

Debido a la falta de un test que permita establecer el nivel de significación de los resultados, el procedimiento que se utiliza comunmente 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.

Tabla 6.2. Resultados del análisis de la distancia media al vecino más próximo.

| Orden | Valor observado | Valor esperado en caso de aleatoriedad absoluta |
|-------|-----------------|---|
| 1 | 661.87 | 1437.91 |
| 2 | 995.44 | 2156.87 |
| 3 | 1281.55 | 2696.09 |
| 4 | 1548.35 | 3145.29 |
| 5 | 1795.50 | 3538.71 |
| 6 | 2083.86 | 3892.43 |

Los resultados obtenidos siguiendo este procedimiento (tablas B2 a B5, Anexo B) indican que los valores observados por cualquiera de los dos métodos para la distribución aleatoria se aproximan bastante a los que proporciona el estimador y los de la regular superan claramente éstos, por lo que se puede 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 pueden 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 (véase cap. II, Antecedentes).

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 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 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.

La elección de la distancia que se va a utilizar como parámetro de ponderación varía de unos estudios a otros. En nuestro caso hemos utilizado como estimador la distancia media entre todos los centros seleccionados.

Para llevar a cabo el cálculo de la intensidad de erupción hemos rasterizado el fichero de centros indicando como "área de influencia" de cada uno de ellos la media de las distancias inter-centros (aprox. 2.500 m) y hemos contabilizado, para cada píxel que compone la imagen, el número de centros que ejercen influencia sobre el mismo.

Para facilitar la interpretación de los resultados hemos aplicado un *filtro o algoritmo de medias locales*, con una ventana de trabajo equivalente al área de influencia, el cual produce un efecto de "suavizado" sobre la representación gráfica de los datos. Este filtro asigna como valor al píxel sobre el que se encuentra situado el resultado de calcular la media de los valores de todos los píxeles incluidos en la ventana de cálculo.

Esta serie de procesos ha generado 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 (figura 6.2).

b) Tipología eruptiva y frecuencia relativa.

Una vez obtenidas las áreas preferentes de erupción, el siguiente paso del estudio ha consistido en establecer la distribución de los estilos eruptivos principales que se presentan en la isla. Para ello, hemos utilizado como dato de partida la información disponible sobre la localización de los centros eruptivos utilizada en el apartado anterior.

Cada centro eruptivo seleccionado se ha asociado con el evento al que pertenece utilizando como referencia su posición en la cartografía MAGNA, la información generada por el proyecto Teide y las fuentes de datos bibliográficas disponibles. Para facilitar la interpretación de los datos, hemos establecido un orden cronológico aproximado para los eventos.

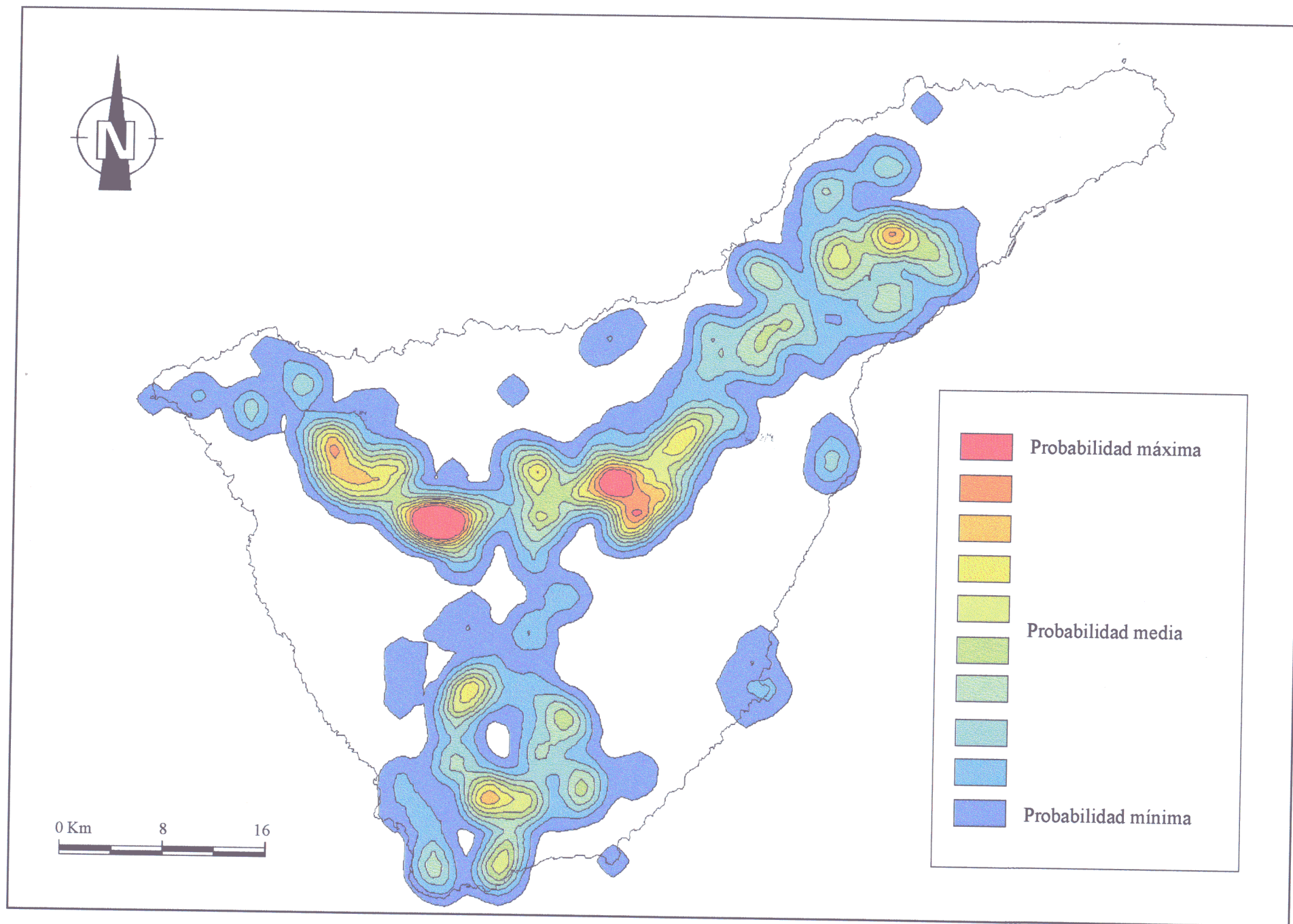


Figura 6.2. Localización potencial de futuros centros eruptivos en Tenerife. En valores intensos de rojo aparecen representadas las áreas más probables.

De cada evento identificado hemos 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 (tabla B1, Anexo B).

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 e intermedia y composición sálica.

En cuanto a la historia evolutiva, hemos 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 (utilizando como criterio su relación con el circo de Las Cañadas) 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, por lo que hemos analizado la influencia de este factor por separado.

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 puede desarrollarse cada una de las tipologías obtenidas, hemos aplicado un algoritmo de medias móviles con el que se ha interpolado la clasificación obtenida a la totalidad de la isla (figura 6.3).

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:

$$Z = \sum_1^n (P_i \times Z_i) / \sum_1^n (P_i)$$

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 de la función de probabilidad, la media de las distancias inter-centros y como método de ponderación se ha aplicado una función exacta de tipo $(1/d^n - 1)$ que toma los siguientes valores:

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

y para $D \geq d_0$ $P = 0$

donde:

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

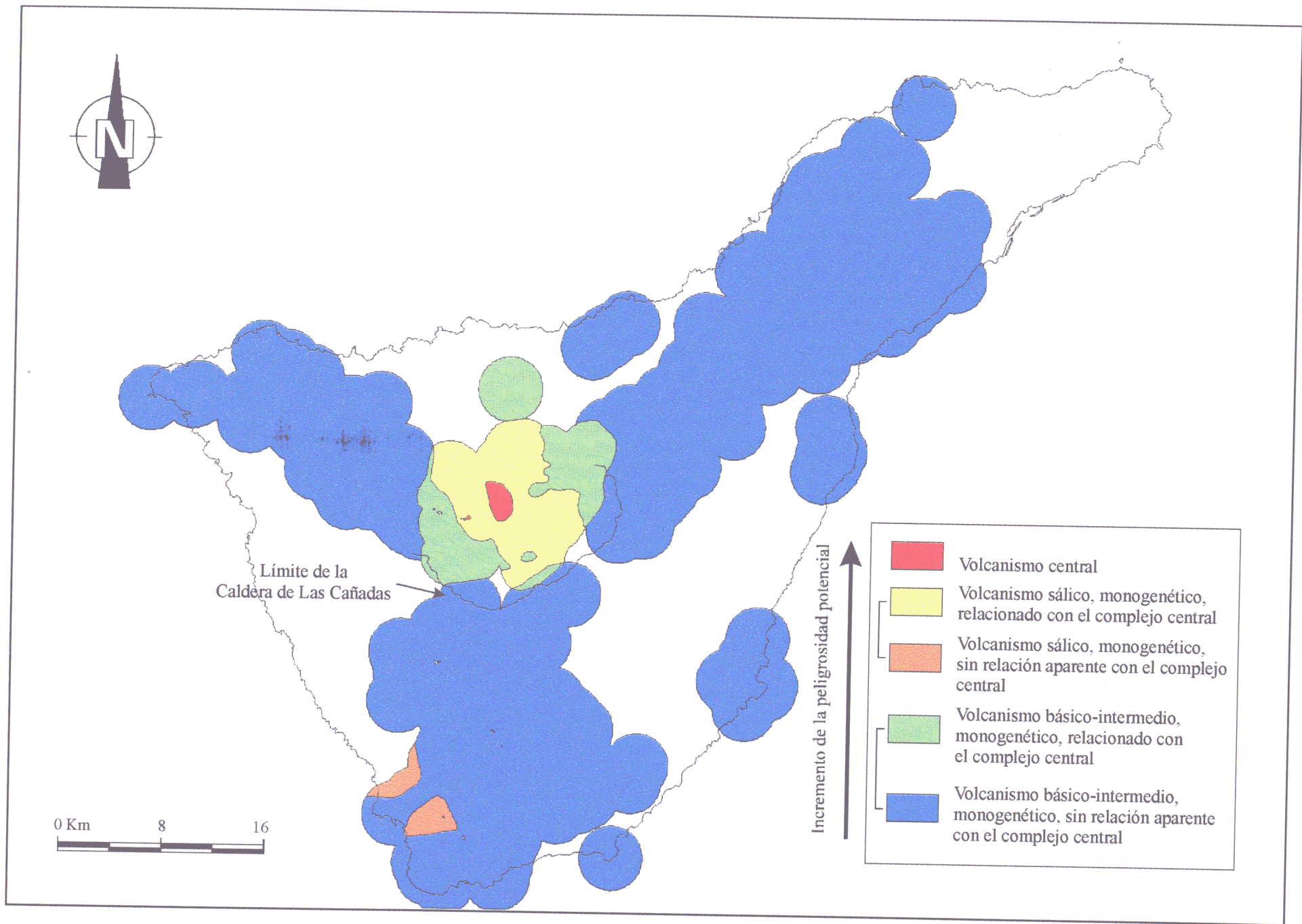


Figura 6.3. Distribución de los estilos eruptivos identificados en Tenerife.

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.

La frecuencia relativa de cada uno de los estilos identificados la hemos calculado estableciendo la proporción de centros pertenecientes a cada una de las clases. Los resultados obtenidos indican que las erupciones con mayor probabilidad de producirse en el futuro son las que pertenecen al tipo básico-intermedio, monogenético y localizadas fuera del área de influencia del complejo Teide-Pico Viejo (aprox. un 79% del total). El resto de las categorías, de acuerdo con el orden en que las hemos presentado, tienen una frecuencia relativa de ocurrencia del 11, 7,5, 0,5 y 2%.

Teniendo en cuenta que el intervalo de tiempo que abarca el estudio supera los 100.000 años en muchas áreas, la probabilidad en cualquier caso de que se produzca una erupción en un plazo próximo de tiempo es baja, aunque no se puede estimar con exactitud debido a la que no conocemos con precisión el valor de este intervalo en muchas zonas de la isla.

La posibilidad de intervención de agua en la erupción con el consecuente incremento de la explosividad que esto puede suponer, hace necesario conocer cuáles son las áreas susceptibles de que se presente este fenómeno. Por ello, a título indicativo, hemos analizado la relación que existe entre éstas y los estilos eruptivos identificados.

Para llevar a cabo este análisis, nos hemos basado en la zonación hidrogeológica elaborada por el Plan Hidrológico Insular del Cabildo de Tenerife, la cual hemos traducido en términos de susceptibilidad utilizando la información disponible sobre el estado de saturación de los acuíferos en cada una de las zonas que el Plan Hidrológico identifica.

Para contemplar la posibilidad de que se produzcan erupciones freáticas en las áreas costeras, hemos introducido un límite exterior de 1 Km en torno a la isla como área máxima de influencia en la que pueden tener lugar estas erupciones. En función de todas estas características, se distinguen cuatro zonas de susceptibilidad (figura 6.4):

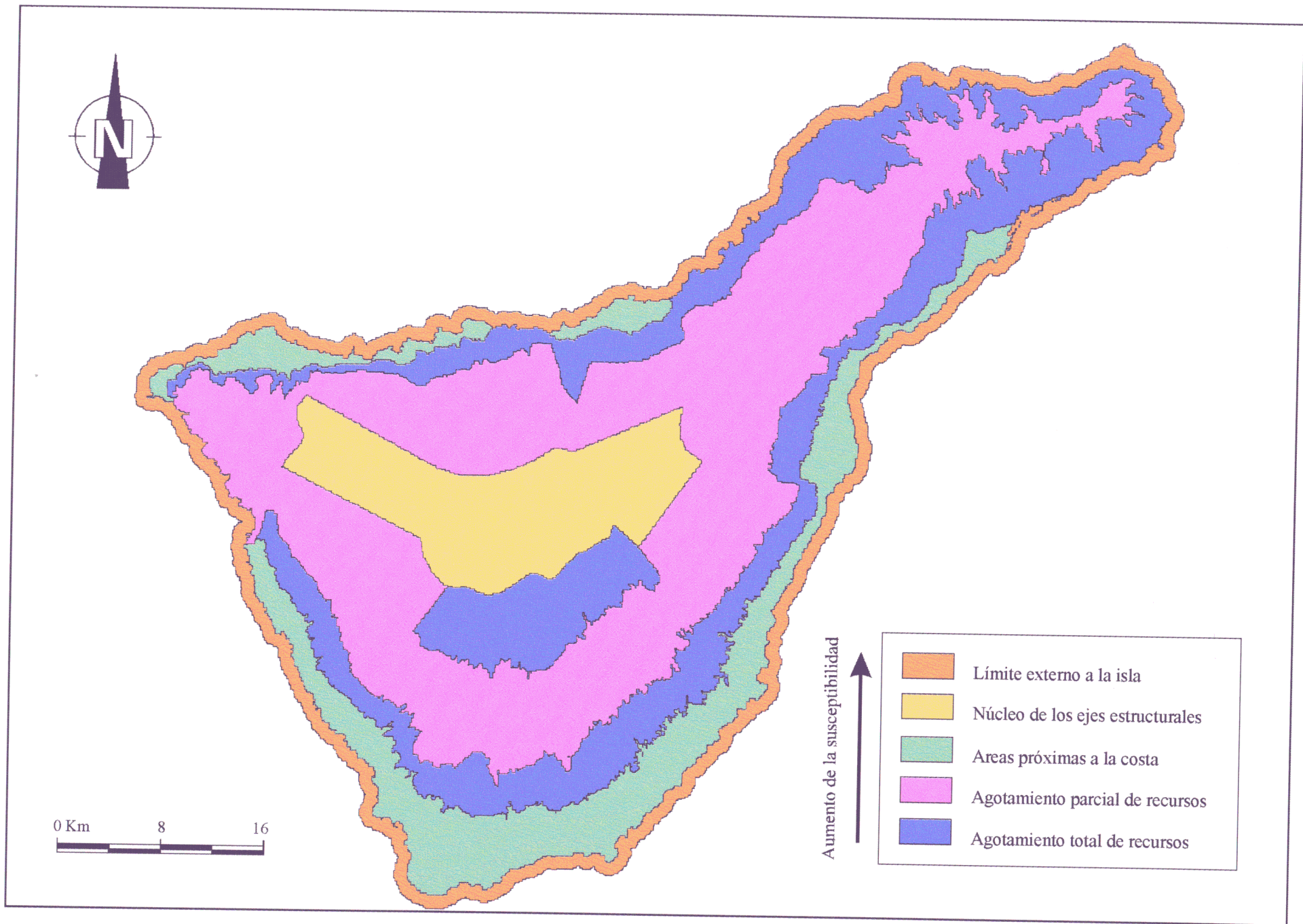


Figura 6.4. Clasificación en zonas de susceptibilidad a la intervención de agua.

- Núcleo de los ejes estructurales: son zonas donde existe un elevado volumen de reservas y la superficie freática está sobre-elevada, lo que hace que la zona saturada se sitúe muy próxima a la superficie topográfica.
- Areas con agotamiento paulatino de los acuíferos: corresponde al macizo de Tigaiga, grandes áreas de la vertiente sur de la isla y la mayor parte de las vertientes de las Dorsales.
- Areas próximas a la costa: la superficie freática se encuentra a poca profundidad y *no está controlada por el nivel del mar*, lo que permite una mayor acumulación de reservas en la franja litoral, siempre que la costa no sea acantilada.
- Límite externo a la isla de 1.000 metros (erupciones en el mar).

El mapa que representa la distribución de las tipologías eruptivas existentes en la isla incluye de forma implícita información sobre el grado de explosividad potencial máximo que puede adoptar cada una de ellas. De acuerdo con esto, podemos identificar tres tipos de mecanismos predominantes: efusivos, explosivos y de alta explosividad.

Al analizar la relación existente entre las áreas susceptibles a la intervención de agua en la erupción y la distribución espacial de estos mecanismos hemos obtenido la localización de las zonas en las que cada uno de los mecanismos puede ver incrementada su explosividad potencial debido a la intervención de agua (figura 6.5). Este dato es relevante porque permite conocer la localización de las áreas en las que pueden tener lugar erupciones de tipo freático a freatomagmático.

Según la distribución obtenida, las zonas donde predominan las erupciones de tipo efusivo básico pueden verse afectadas por la intervención de agua en el área correspondiente al núcleo de los ejes estructurales y en toda la franja costera. En este tipo de erupciones sólo en el segundo de los casos el volumen de agua que puede intervenir en la erupción es lo bastante significativo como para incrementar de forma importante el grado de explosividad. En el primer caso, salvo alguna excepción, la intervención de agua no va a alterar la evolución de los fenómenos de forma importante.

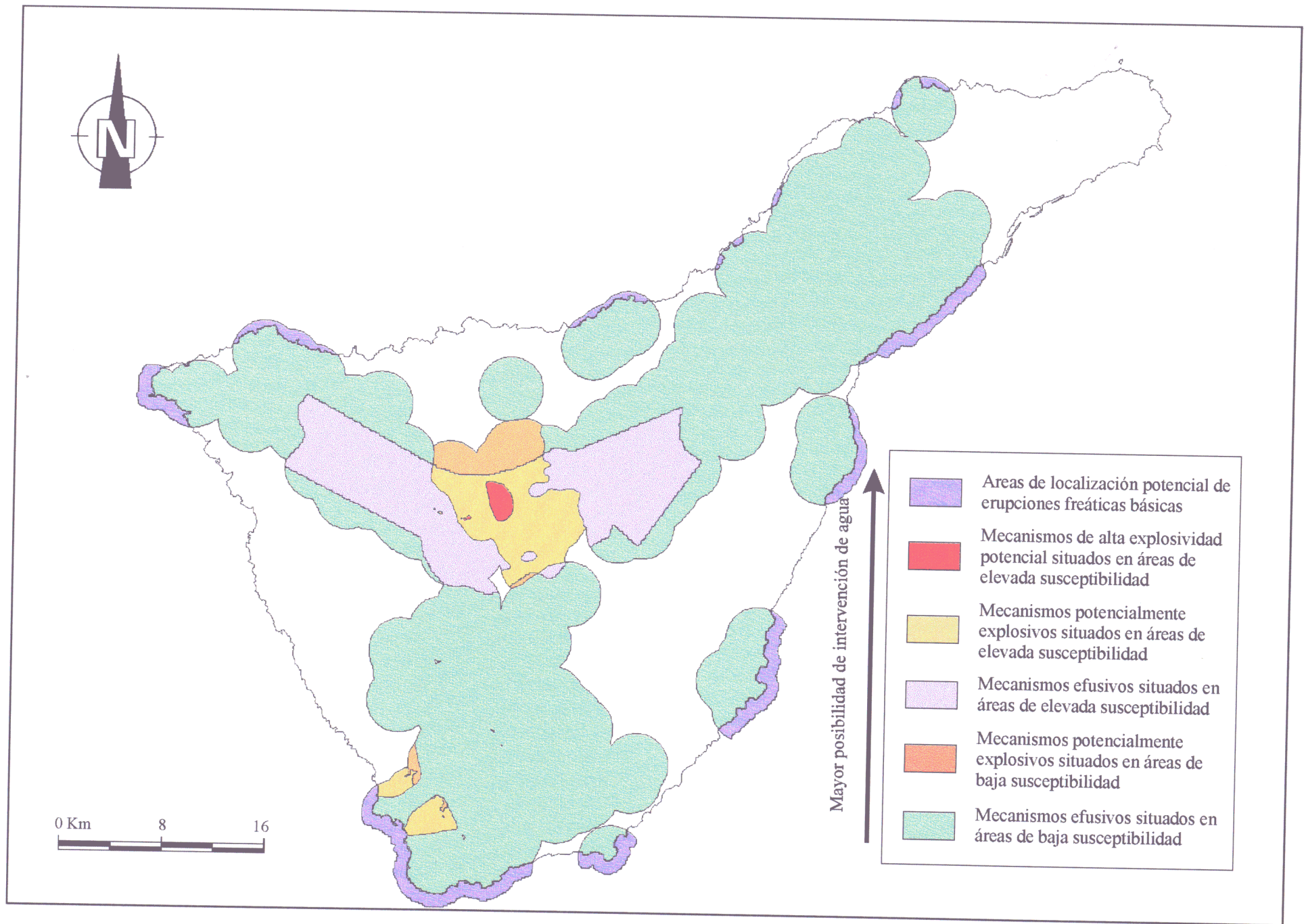


Figura 6.5. Clasificación de estilos eruptivos en función de su susceptibilidad a la intervención de agua.

Si nos ajustamos al primero de los casos, las manifestaciones de este tipo en Tenerife se han caracterizado, prácticamente siempre, por la generación de conos piroclásticos de pequeña envergadura con coladas de lava asociadas. Las emisiones que han tenido lugar pertenecen a dos tipos principales: centros monogénéticos aislados y erupciones fisurales.

El área que se puede ver afectada por la emisión de productos piroclásticos suele ser de reducidas dimensiones y depende principalmente de la dirección y velocidad de los vientos, aunque comunmente se acumulan en la proximidad de los centros eruptivos. La misma distribución reducida presentan los proyectiles en caída balística.

Sin duda, el factor de riesgo más significativo de este estilo es la emisión de coladas lávicas. Aunque en las erupciones históricas el volumen y extensión de materiales no ha sido muy importante, las fuertes pendientes de la isla y el carácter fluido de los materiales han favorecido grandes desplazamientos que, en numerosas ocasiones (de acuerdo con el registro geológico), han llegado hasta al mar e incluso le han ganado terreno.

VI.1.2. Bases de datos del medio físico.

El hecho de que, de los tres factores de riesgo asociados con las manifestaciones efusivas básicas, el más significativo y que produce efectos de mayor consideración sea la emisión de coladas de lava, ha motivado que sea éste sobre el que hayamos centrado el desarrollo de los modelos físicos de erupción.

Los modelos utilizados, como se verá más adelante en este capítulo, requieren como único elemento para ejecutar los cálculos la topografía de la isla, la cual hemos expresado en forma de Modelo de Elevación Digital (DEM). En este modelo, cada píxel o unidad de superficie representa la altitud media del terreno en ese área.

Para generar el DEM de Tenerife hemos utilizado como datos de partida las curvas de nivel digitalizadas a partir del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:100.000. La información digitalizada se corresponde con las líneas maestras, las cuales presentan un espaciado de 100 metros. Esta discretización ha proporcionado un conocimiento suficiente de las características de la topografía, dada la escala de trabajo y lo abrupto del terreno de la isla.

Las curvas de nivel se han almacenado en el sistema en modo vectorial utilizando pares de coordenadas UTM para localizar cada uno de los puntos que las definen. Para que la información topográfica adopte el formato del resto de las bases de datos, se ha rasterizado con un tamaño de píxel de 50 metros.

El mapa resultante de este proceso contiene información sobre la elevación del terreno en los "puntos" sobre los que se sitúa una curva. Para obtener el DEM de la isla (figura 6.6), se ha llevado a cabo un proceso de interpolación espacial en el que el valor de elevación de cada píxel se calcula mediante un algoritmo que calcula la media ponderada de los valores de las curvas entre las que se sitúa utilizando como factores de calibrado la media de las distancias euclídeas entre esas dos curvas. Este proceso se denomina *transformada de distancia de Borgefors* (Gorte & Koolhoven, 1990).

VI.1.3. Bases de datos socioeconómicas.

Para completar la implementación de las bases de datos que utiliza el modelo cartográfico hemos introducido en el GIS la información necesaria para caracterizar el valor de los elementos bajo riesgo. Las bases de datos seleccionadas para este propósito son las siguientes:

a) *Términos municipales, núcleos urbanos y estadísticas de población.*

Los términos municipales de Tenerife se han digitalizado a partir de los límites trazados en el Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000. Cada uno de los términos se ha identificado teniendo en cuenta el código que les asigna el Instituto Nacional de Estadística (INE) y se han rasterizado con respecto al resto de bases de datos.

En cuanto a los núcleos urbanos, la información correspondiente a los mismos se ha incorporado a partir de los ficheros digitales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) pertenecientes a la BCN200 (Base Cartográfica Numérica 1:200.000), donde cada núcleo aparece identificado gráficamente por el polígono que demarca su perímetro. Al igual que para los términos, hemos identificado cada núcleo con un código numérico exclusivo equivalente al que presentan en la BCN200 y este fichero se ha rasterizado.

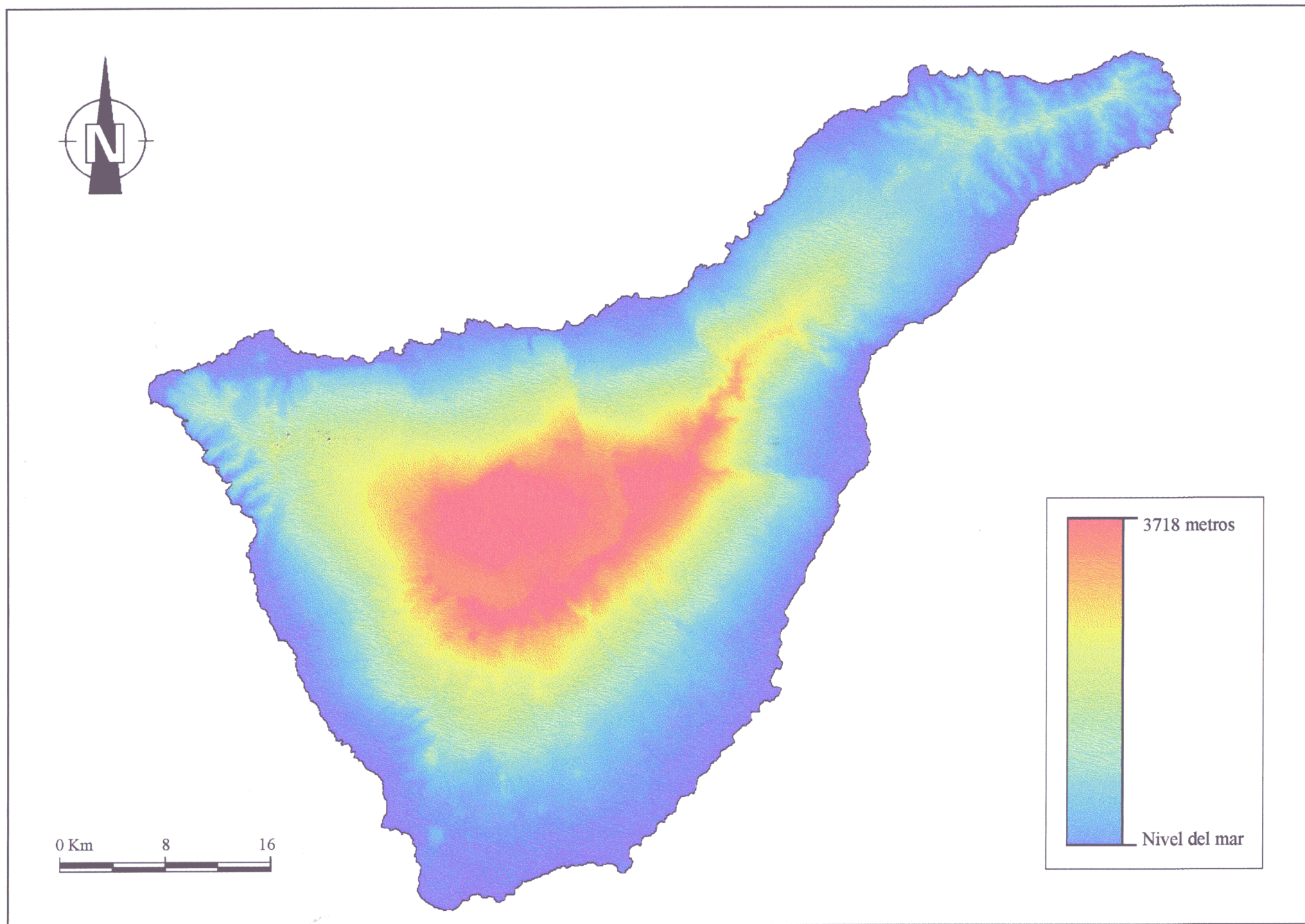


Figura 6.6. Modelo de elevación digital de Tenerife.

Los datos de tipo estadístico necesarios para llevar a cabo la evaluación del riesgo se han almacenado en tablas. Estos datos proceden de las estadísticas para el año 1994 sobre el número de viviendas y nivel de ocupación de las mismas en la práctica totalidad de los núcleos urbanos de la isla (Instituto Canario de Estadística) y se han estructurado de acuerdo con el formato indicado al inicio de este capítulo (tabla B6, Anexo B).

b) Redes de comunicación viaria.

Las carreteras de la isla se han digitalizado a partir del MTN 1:50.000 y posteriormente se han rasterizado siguiendo el mismo procedimiento que en los casos anteriores. Las carreteras se han identificado utilizando un código numérico compuesto que proporciona información sobre la titularidad de las mismas, su categoría y su número en la red.

Este código aparece reflejado en una tabla asociada que se ha creado para establecer la conexión entre el código asignado y el nombre en clave de cada una de ellas (según el mapa de carreteras del Gobierno Autónomo de Canarias) (tabla B7, Anexo B).

c) Redes de distribución de agua.

Como hemos visto en el capítulo dedicado al estudio de las características de la isla, Tenerife está surcada por una densa red de galerías de las que se extrae un elevado porcentaje del agua utilizada en la isla.

El Plan Hidrológico Insular del Cabildo Insular de Tenerife está elaborando una base de datos digital que incluye información sobre la distribución de las mismas, de los canales principales de distribución de agua y de las presas y balsas entre otros, la cual ha puesto a disposición del proyecto Teide (figura 6.7).

Esta información, aunque ha sido incorporada al sistema, ha resultado útil sólo a efectos de presentación gráfica, puesto que no se disponía de los datos correspondientes a la identificación de cada uno de los elementos digitales. Por este motivo no se ha utilizado en los cálculos.

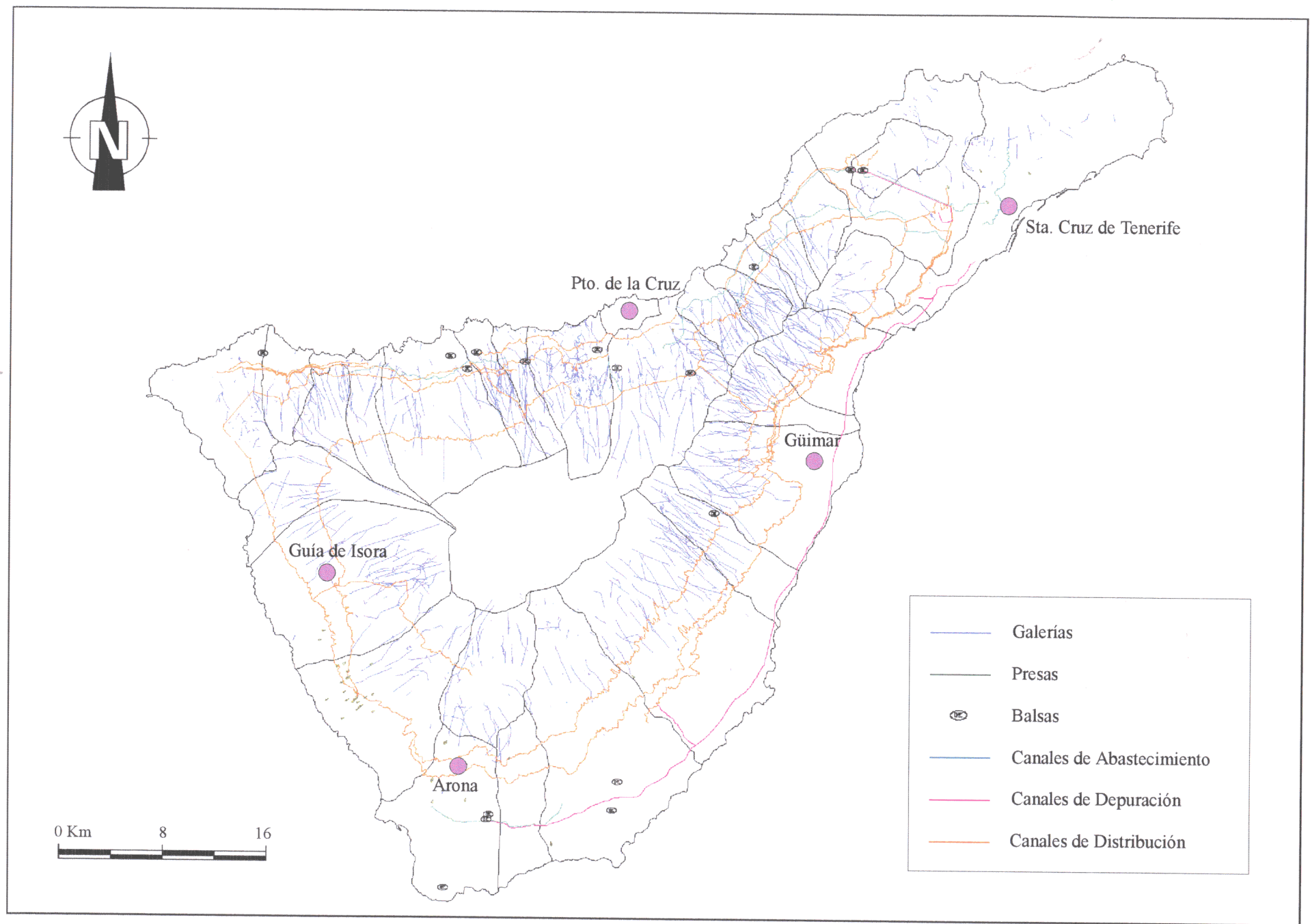


Figura 6.7. Localización de las galerías, canales principales de distribución, presas y balsas (fuente: Plan Hidrológico Insular, Cabildo de Tenerife).

d) Elementos estratégicos.

Para completar la información sobre los bienes y propiedades hemos introducido en el sistema datos sobre algunos elementos estratégicos. Estos se han agrupado de acuerdo con la categoría o tipo a la que pertenecen y son los siguientes (tabla B8, Anexo B):

- Aeropuertos y puertos
- Hospitales y centros de salud
- Establecimientos colectivos (hoteles, escuelas, centros municipales...)
- Estaciones de servicio
- Estaciones de radio o TV y repetidores de comunicaciones

Para la realización del estudio piloto hemos considerado suficiente integrar en la base de datos exclusivamente la localización de cada uno de estos elementos aunque, posteriormente, será posible añadir aquellas características que se deseen reflejar de cada uno de ellos.

e) Agricultura.

Para representar los usos y aprovechamientos de la isla hemos utilizado el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:200.000 de la provincia de Tenerife (MAPA, 1988), del que hemos digitalizado y rasterizado el área correspondiente a la isla siguiendo el mismo proceso que en los casos anteriores.

VI.1.4. Vulnerabilidad.

Los efectos directos más perjudiciales derivados de la acción de coladas lávicas se producen por la destrucción total por enterramiento, impacto o ignición de cualquier elemento que se encuentre en su trayectoria.

El riesgo para la población es muy bajo y, salvo excepciones (como el desbordamiento del lago cratérico del Nyiragongo), estos fenómenos no producen la pérdida de vidas humanas por acción directa. Esto se debe a su baja velocidad de dispersión que, para las lavas básicas, es del orden de pocos Km/h. Por este motivo tampoco resultan una amenaza grave para

cualquier tipo de maquinaria móvil.

Estas características se traducen en que la vulnerabilidad por efecto directo de las lavas sobre la población se sitúa en torno al 0%, mientras que la de los demás elementos incluidos en la base de datos es del 100% (carreteras, usos del suelo, canales de conducción, etc.).

En cuanto a los efectos indirectos que pueden derivarse de la interacción de los elementos bajo riesgo con las coladas destacan los incendios, ya que pueden extender los efectos catastróficos a zonas bastante alejadas del área por la que fluyen.

Las lavas también funden la nieve y el hielo y pueden provocar avalanchas y avenidas. Sin embargo, debido a que la mezcla no se produce de forma turbulenta, la magnitud de estos efectos suele ser bastante reducida.

También, debido a que las lavas tienden a circular por los fondos de valles, pueden llegar a obstruirlos y retener el agua que por ellos vierta, produciendo como consecuencia la anegación de las áreas inmediatas.

Por último, la desgasificación que puede producirse de forma repentina en las coladas puede liberar gases altamente tóxicos, aunque su área de influencia suele ser reducida.

VI.2. Implementación de las operaciones necesarias para la evaluación del riesgo.

Los tres procesos o pasos principales que, para llevar a cabo la evaluación del riesgo, hemos distinguido en el diseño del modelo cartográfico, se han traducido en la fase de implementación como módulos independientes de cálculo dedicados a: extraer los parámetros de peligrosidad y probabilidad de erupción, generar los escenarios de riesgo y estimar el riesgo potencial.

VI.2.1. Extracción de parámetros de simulación.

Para extraer los parámetros de simulación, hemos utilizado como base el programa para la lectura de la información de mapas implementado ya en ILWIS.

Este programa utiliza el principio de superposición de mapas en un GIS según el cual, si todas las bases de datos están referenciadas a un marco común, es posible extraer la información que se desee de cada una de ellas de forma simultánea. Las características de los atributos ligados a estos mapas que se hayan almacenado en tablas se pueden obtener por el mismo procedimiento.

Para obtener la información correspondiente a la tipología eruptiva más probable en el punto que se seleccione para realizar la simulación y conocer la probabilidad de erupción en ese punto hemos diseñado un procedimiento automático de captura de datos.

El programa de lectura de información de ILWIS requiere que se despliegue un *mapa base* en la pantalla que proporcione el marco geográfico. Para ello hemos seleccionado el mapa de estilos eruptivos sobre el que, para evitar posibles confusiones, hemos resaltado las áreas en las que potencialmente pueden tener lugar los fenómenos que nos interesan.

El programa de lectura de datos permite al usuario obtener información sobre las coordenadas UTM de cada uno de los píxeles sobre los que se posiciona. Simultáneamente, el programa proporciona información sobre la probabilidad de erupción en ese punto y su altitud (que se extrae a partir del mapa de área probable de erupción y del modelo de elevación digital respectivamente), lo que permite conocer las características del punto que se seleccione para llevar a cabo la simulación.

VI.2.2. Generación de escenarios de riesgo.

La importancia mayor de las coladas lávicas de entre todos los fenómenos asociados con el volcanismo monogenético nos han motivado a implementar en el GIS modelos que sean capaces de reproducir su comportamiento en la isla.

El desarrollo de un flujo de lava depende de múltiples factores. Entre ellos, los principales son el volumen y ritmo de emisión, las características reológicas del magma y la topografía (Hulme, 1974; Dobran et al., 1990). A lo largo del desarrollo de un flujo de lava pueden tener lugar los siguientes fenómenos:

- a) Comportamiento no newtoniano del fluido.
- b) Pérdida de calor por conducción, radiación y convección.
- c) Transiciones entre diferentes regímenes de flujo.
- d) Solidificación de la parte superior de la colada y formación de labios y túneles.
- e) Cambios en la topografía original durante el flujo.
- f) Bifurcaciones del flujo.

Hoy en día no existe un modelo físico que sea capaz de simular todos estos fenómenos, describiendo conjuntamente sólo tres de ellos como máximo. Los modelos existentes son de muy diversa índole según el modo de aproximación al problema y abarcan desde los que resuelven las ecuaciones de transporte a probabilísticos, desde analíticos a empíricos.

Los modelos más empleados en riesgo volcánico son los probabilísticos, los cuales se utilizan comunmente para la generación de mapas de peligrosidad y para el seguimiento y actuación en caso de crisis (Barberi et al., 1993). Un modelo sencillo que puede emplearse para la generación de mapas de peligrosidad para erupciones efusivas es el *modelo de máxima pendiente*, que es el que hemos utilizado en nuestro caso.

En éste modelo se asume que la topografía juega el papel principal en la determinación del camino seguido por la colada. El modelo requiere para su funcionamiento la existencia de un modelo digital de elevación de la zona de estudio y el conocimiento del punto que se ha seleccionado como emisor del flujo (Felpeto et al., 1996).

Desde el píxel que representa el punto emisor, se considera que el flujo puede extenderse hacia cualquiera de los vecinos que lo rodean. La probabilidad de que la colada se desplace hacia un píxel determinado es proporcional a la diferencia de alturas entre éste y el píxel en el que se encuentra situado, teniendo en cuenta que si la diferencia es negativa la probabilidad será cero, es decir, que la colada no puede propagarse en contra de la pendiente (figura 6.8).

Aplicando un algoritmo de Monte Carlo, el modelo calcula un posible camino para la colada. Este proceso se repite un gran número de veces y finalmente se hace un recuento de la cantidad de veces que cada píxel ha sido atravesado por la colada. Los píxeles que hayan sido atravesados muchas veces serán los que tengan una mayor probabilidad de ser invadidos.

Este procedimiento se enfrenta con un problema de difícil solución: en el cálculo no se tiene en cuenta a priori la distancia máxima que puede alcanzar la colada, por lo que si ésta entra en una zona llana el cálculo permanecerá retenido indefinidamente en ella y, en caso contrario, la longitud obtenida será infinita.

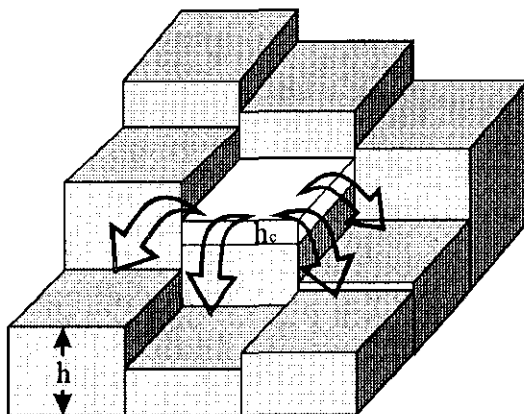


Figura 6.8. Representación esquemática del modelo de máxima pendiente.

Para evitar este efecto se ha introducido en el modelo un parámetro denominado *longitud máxima del flujo* (l_{max}), cuya misión es detener la colada cuando ha recorrido una distancia determinada (es decir, un número determinado de píxeles).

Otro parámetro que se ha considerado es la *altura crítica* (h_c), que es un término que se suma a la altura de cada una de los píxeles que recorre el flujo. Este parámetro simula el efecto de la altura de la colada u otros efectos como la rugosidad del terreno en la celda. El modelo permite fijar también el número de iteraciones que se desee realizar.

El escenario de riesgo que se genera aplicando el modelo se almacena en dos ficheros: un fichero de imagen que se almacena en formato binario y otro de documentación en formato ASCII. El primero asigna a cada píxel implicado en el cálculo un valor o código relacionado con la probabilidad de que esté afectado por el fenómeno y el segundo incluye información sobre los parámetros que han intervenido en la simulación y las características del fichero de imagen (tabla B9, Anexo B).

Estos ficheros proporcionan la interfase para que sea posible encadenar los procesos de cálculo que tienen lugar en este módulo y los que se llevarán a cabo para la estimación del riesgo potencial que se deriva del escenario generado. La interfase entre este módulo y el de extracción de parámetros de riesgo no se ha establecido, por lo que la introducción de los datos en el modelo se realiza de forma manual.

VI.2.3. *Estimación del riesgo potencial.*

Como hemos visto en el capítulo IV, el tipo de operaciones requeridas para obtener la estimación del riesgo potencial a partir del escenario de riesgo pertenecen principalmente a la categoría de funciones de análisis espacial. Estas operaciones se han implementado utilizando exclusivamente las herramientas existentes en ILWIS para este propósito.

Con el fin de evitar los procedimientos manuales, hemos aprovechado la capacidad de ILWIS para encadenar operaciones utilizando *ficheros de procesamiento por lotes* (ficheros batch), en los que hemos contemplado la forma y orden en los que debe tener lugar la interacción entre las bases de datos que intervienen en el proceso de evaluación.

En cada una de las fases que componen el proceso de estimación del riesgo (aptdo. IV.2.2) participan distintos tipos de información que se pueden clasificar de forma general como datos de partida, resultados parciales y resultados finales.

El primer grupo o categoría engloba al escenario de riesgo (que es a su vez el resultado final de los procedimientos anteriores), a las bases de datos socioeconómicas y a la vulnerabilidad. Dentro del segundo grupo están incluidos el valor expuesto y el riesgo específico y en el tercero el riesgo potencial y el total.

Para hacer comprensibles los procedimientos que se llevan a cabo de forma automática en la evaluación del riesgo potencial, hemos proporcionado a los ficheros de procesamiento por lotes la capacidad de representar gráficamente parte de la información que generan durante los cálculos. Para este propósito hemos seleccionado el escenario de riesgo, los mapas que informan sobre el valor expuesto y el mapa de riesgo potencial.

Son muchos los métodos mediante los cuales es posible expresar la información contenida o relativa a cada uno de estos mapas. La condición principal que debe cumplir cualquiera de ellos es que sea capaz de reflejar, de la forma más sencilla y clara posible, lo que se pretende mostrar y que incluya todas las claves necesarias para su interpretación, informando, en el caso de que sea oportuno, sobre los procedimientos que se han seguido para obtenerlo.

El mapa de peligrosidad o escenario de riesgo, según se obtiene como resultado del proceso de simulación, expresa exclusivamente las áreas que potencialmente se verán afectadas por los productos de la erupción.

Para su correcta interpretación, hemos programado la inclusión en los gráficos de algunos datos adicionales que permitan valorar la información que el mapa nos proporciona, sin que ello la enmascare. Los elementos básicos que se han seleccionado para la representación han sido los siguientes:

- 1) Contexto espacial en el que se distribuyen los productos (base topográfica).
- 2) Descripción del tipo de fenómeno representado (coladas lávicas en nuestro caso), incluidos los valores que han adoptado las variables utilizadas en el proceso de generación del mapa.
- 3) Leyenda interpretativa de los valores que el fenómeno representado adopta.
- 4) Localización del centro o los centros de emisión en relación con la probabilidad de erupción.

A título informativo hemos representado también en forma de mapas la información disponible sobre las características que adoptan los elementos bajo riesgo en la zona afectada por el fenómeno (información sobre el valor expuesto).

Para evitar que la interpretación se haga confusa, hemos utilizado dos mapas para este propósito. El primero de ellos se ha destinado a representar los datos sobre la red viaria, núcleos de población y elementos estratégicos existentes en el área cubierta por el escenario de riesgo en relación con la probabilidad de que se vean afectados por las coladas lávicas. El segundo ha tenido como propósito informar sobre los usos de suelo existentes en esa zona y la distribución de la red de distribución de agua.

En cuanto al riesgo potencial, la técnica mediante la que se expresan las áreas afectadas por el mismo grado de riesgo frente a un fenómeno determinado se denomina *microzonificación* (Alexander, 1993).

El mapa mediante el que se expresa esta microzonificación pertenecerá a distintos tipos dependiendo del número de peligros considerado y del número de elementos que va a representar (uso del mapa). Básicamente se distinguen mapas de peligro único y uso simple, peligro único y uso múltiple y peligro múltiple y uso múltiple.

De las tres categorías, la que resulta más apropiada para representar los resultados de la aplicación del modelo cartográfico es la de peligro único (puesto que sólo se ha tenido en cuenta un tipo de fenómeno en la simulación) y uso múltiple, ya que la evaluación se realiza simultáneamente para el conjunto de elementos bajo riesgo.

En este caso, como para el del escenario de riesgo, se ha decidido incorporar información en forma de leyendas explicativas de los resultados obtenidos. Como resultado de los procesos de análisis espacial, se obtiene información sobre el riesgo potencial también en forma de tablas que complementan y apoyan las representaciones gráficas.

VI.3. Estructura del sistema resultante de la implementación.

Como resultado de la implementación del modelo cartográfico, la aplicación para el cálculo del riesgo en Tenerife ha quedado estructurada de la siguiente forma (figura 6.9):

- Un módulo de extracción de parámetros en el que intervienen el conjunto de bases de datos volcanológicas y del medio físico, las cuales se utilizan como apoyo en la selección del centro de emisión teórico y para el funcionamiento del módulo de simulación.
- Un módulo de generación de escenarios, del que forma parte fundamental el modelo físico de simulación y que produce como resultado un escenario de riesgo en función de los parámetros seleccionados para el cálculo.

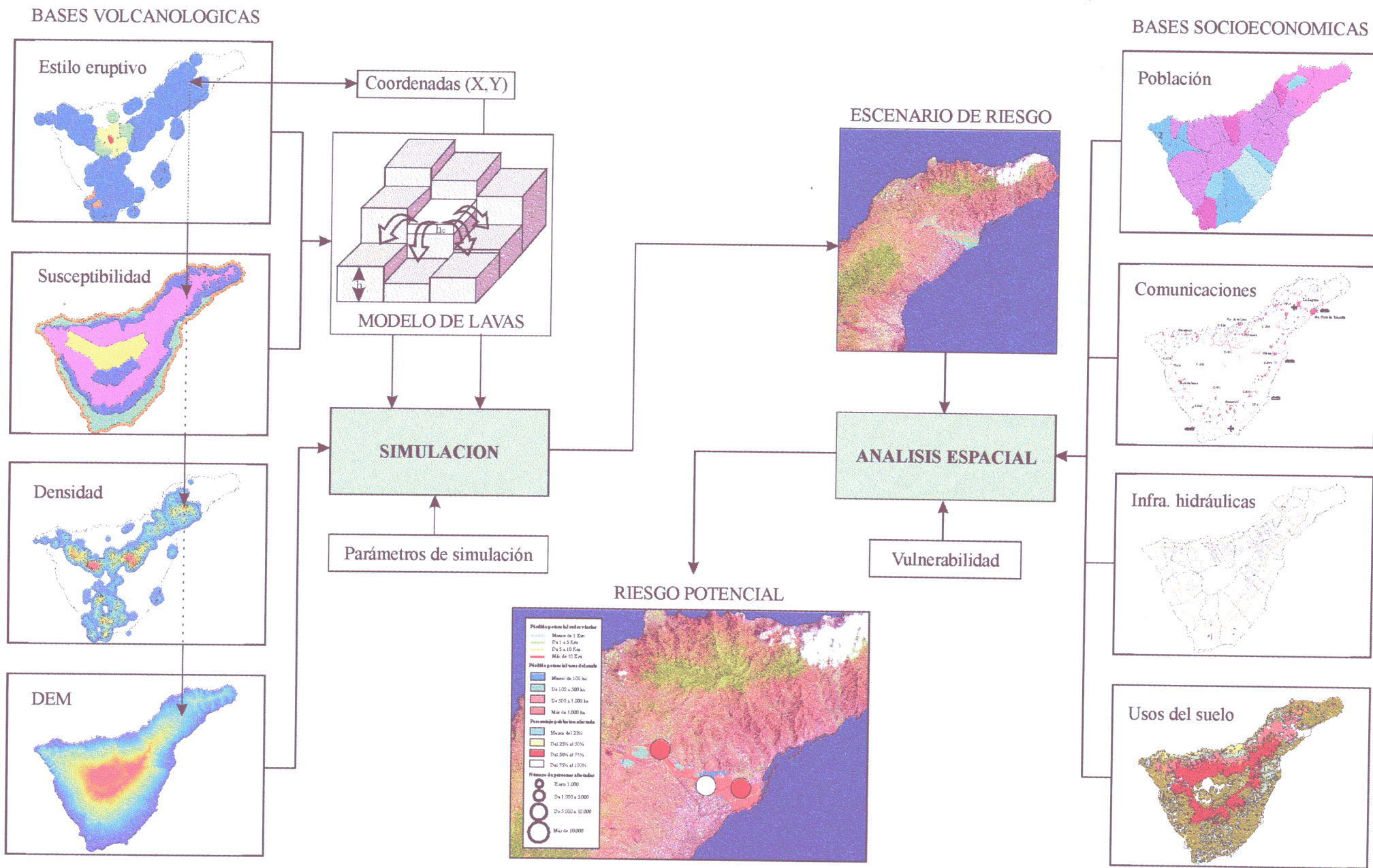


Figura 6.9. Estructura del sistema resultante de la implementación del modelo cartográfico en Tenerife.

- Un módulo de estimación del riesgo basado en operaciones de análisis espacial, el cual utiliza como entradas el escenario de riesgo, los datos socioeconómicos y la vulnerabilidad y que conduce a la obtención de un conjunto de mapas y tablas que proporcionan información sobre los resultados del cálculo.

ABRIR CAPÍTULO VII

