

EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN LA ISLA DE ISCHIA (ITALIA)

Mattera M.¹

RESUMEN

La actividad volcánica de la isla de Ischia se enmarca en la reciente historia geológica del área tirrénica, en el transcurso de la cual, desde hace diez millones de años, se ha producido un proceso de migración en dirección Sureste de la península italiana, responsable de la formación de profundas fracturas a través de las cuales se ha inyectado magma hacia la superficie.

En este artículo se realiza una primera aproximación a la evaluación del riesgo volcánico en la isla, considerando para ello la peligrosidad del potencial proceso eruptivo, los elementos en riesgo y la vulnerabilidad de dichos elementos ante el fenómeno volcánico.

El análisis de la peligrosidad se basa no sólo en el cálculo de la probabilidad de que tenga lugar una nueva erupción en una zona determinada de la isla, sino también en la estimación de la probabilidad con la que se desarrollarían las distintas fenomenologías eruptivas. Dichas tipologías condicionan a su vez el valor de la vulnerabilidad de los elementos del territorio, ya que el nivel de destrucción que provocarían es distinto. Al estimar el parámetro de la peligrosidad se han tenido en cuenta los resultados de un estudio precedente, en el cual se había calculado la probabilidad de ocurrencia de una nueva erupción en la isla.

A pesar de que el grado de riesgo no es elevado, se argumenta que éste no debería subestimarse en función de dos características peculiares de este territorio: el elevado flujo turístico que recibe y la insularidad.

Palabras clave: Ischia (Italia), peligrosidad natural, riesgo natural, riesgo volcánico.

ABSTRACT

The volcanic activity of the isle of Ischia is Unmarked in the recent geological history of the tirrenic area, during which, since ten million years ago, it has produced a process of migration in direction SW of the Italian peninsula, responsible of the formation of deep fractures by which magma has been injected to the surface.

In this paper is realized a first approximation to the evaluation of the volcanic risk in this isle, considering for this the dangerous of the potential eruptive process, the elements in risk and the vulnerability of these elements in front of the volcanic phenomenon.

The analyses of the dangerous is based not only in the calculation of the probability that a new eruption occurs in a determined zone of the isle, but also in the estimation of the probability with which the different eruptive phenomenology occurred. These typologies conditioned also the value of the vulnerability of the elements of territory, because the destruction level that will produce is different. When the parameter of dangerous is estimated the results of a previous study has been taken into account, in which the probability of occurrence of a new eruption in the isle had been calculated.

In spite of the grade of risk is not so high, it should not be underestimated in function of two peculiar characteristics of this territory: its high touristy flux and its insular character.

Key words: Ischia (Italy), natural hazard, natural risk, volcanic risk.

¹Dpto. de Geodinámica, Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense, C/ José Antonio Novais s/n, 28040 Madrid

INTRODUCCIÓN

La exigencia de introducir nuevos modelos de gestión y ocupación territorial en zonas susceptibles de ser afectadas por desastres naturales ha sido señalada ya por numerosos organismos internacionales. La ONU, por ejemplo, además de fundar algunas agencias internacionales (FAO, UNEP, UNESCO, UNDP, UNDRO) para intervenir en zonas afectadas por este tipo de desastres, decretó que el último decenio del siglo XX fuera declarado como Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales (*International Decade for Natural Disaster Reduction, IDNDR*), invitando a la comunidad internacional a cooperar con este fin.

La evaluación de los riesgos geológicos puede constituir una contribución inestimable a esta nueva forma de gestionar el territorio. Con el término 'evaluación de riesgos (geológicos)' se recogen toda una serie de estudios sobre la naturaleza y el carácter de un posible desastre natural, con el consecuente impacto que éste puede generar sobre el territorio y la población expuestos al mismo. Por lo tanto, tal evaluación puede representar una poderosa herramienta para desarrollar una planificación de áreas compatibles con la fenomenología geológica. El trabajo que se desarrolla a continuación tiene por objetivo la evaluación del riesgo volcánico en la isla de Ischia (Italia) coherentemente con los planteamientos que se acaban de exponer.

Contexto geológico y vulcanológico

Ischia se encuentra a 33 Km en dirección WSW de Nápoles y dista 34 Km de Capri. Se trata de la más grande de las islas del archipiélago napolitano, teniendo una superficie de 46.3 Km². Administrativamente está repartida en seis ayuntamientos, división que servirá de referencia para el cálculo del riesgo.

El geólogo Rittmann (1948) reconoció en el horst del Monte Epomeo (787 m) la estructura más relevante generada por la actividad volcano-tectónica de la isla. Dicho horst está bordeado por un sistema de fallas de dirección NS y EW, alrededor de las cuales se ha desarrollado casi toda la actividad volcánica posterior. El horst del M. Epomeo está compuesto,

esencialmente, por el 'Tufo Verde' (Toba Verde), una ignimbrita traquítica considerada por Rittmann (1948) la más antigua formación de la isla.

Sin embargo, a través de dataciones realizadas utilizando K-Ar, Chiesa y Vezzoli (1983) han estimado que el Tufo Verde tiene una edad de 55.000 años, mientras que los materiales asociados al Castello d'Ischia, Punta della Signora, Punta Pisciazza y Monte Vezzi tienen un edad nunca inferior a 100.000 años. En base a estos resultados, dichos autores han reconocido cinco etapas en la historia volcano-tectónica de la isla.

- *Fase 1 (anterior a hace 150.000 años)*. La isla, en particular su sector meridional (Punta S. Pancrazio, Scarrupata di Barano, Monte Vezzi, etc.), se ve afectada por una intensa actividad volcánica de carácter explosivo. La gran cantidad de productos expulsados genera un enorme aparato volcánico que recubre un área más extensa que la actual isla. Posteriormente, este volcán se ve afectado por un enorme hundimiento caldérico en correspondencia con la zona central de la isla. A la formación de la caldera se vinculan una serie de fracturas con desarrollo anular, a lo largo de las cuales se manifiesta la actividad volcánica posterior.

- *Fase 2 (hace entre 150.000 y 75.000 años)*. En esta fase se asiste a la formación de numerosos conos de escoria y domos (Sant Angelo, Capo Grosso, Punta Caruso, etc.). Sigue un periodo de inactividad que dura alrededor de 50.000 años.

- *Fase 3 (hace entre 55.000 y 33.000 años)*. Hace 55.000 años, la actividad se reanuda con impresionantes erupciones de tipo pliniano y ultrapliniano, responsables de la emisión del 'Tufo Verde'. La precedente caldera queda repleta de depósitos de dicha unidad estratigráfica que en algunos puntos superan centenares de metros. A esta temporada de intensa actividad, que condicionará posteriormente la morfología de la isla, le sigue una larga temporada de quiescencia.

- *Fase 4 (hace entre 28.500 y 18.000 años)*. En este intervalo la actividad se concentra en el sector occidental de la isla, con la formación de domos de lava y la emisión de espesas coladas de lava y lechos de escoria.

- Fase 5 (hace entre 10.000 años y el 1.302 d.C.). Como consecuencia de la llegada de nuevo magma a los conductos subterráneos, el sector central de la isla es empujado hacia arriba, provocando la formación de numerosas fracturas alrededor del horst central del Monte Epomeo. A lo largo de estas fracturas se manifiestan tanto fenómenos volcánicos como sísmicos; en particular, a lo largo de una fractura con dirección N-S, al Este del Monte Epomeo, se desarrolla una intensa actividad volcánica que empieza alrededor de hace 10.000 años y, a partir de la cual, se desarrolla la colada del Arso (1302), la última erupción de la isla de Ischia.

METODOLOGÍA

La evaluación de los riesgos naturales, aparte de realizar una zonificación del área de estudio con base en la actividad potencial del proceso objeto de análisis, considera el impacto que un fenómeno puede tener sobre el tejido socio-económico expuesto a la actividad del mismo. El fin último de esta evaluación es contribuir a una planificación territorial compatible con los fenómenos naturales característicos de una determinada región.

Aunque son numerosos los procedimientos desarrollados para la evaluación de riesgos naturales, quizás el que mayor difusión ha tenido en la comunidad científica internacional ha sido el establecido por la UNESCO en 1979. En las versiones más recientes, el riesgo queda cualificado mediante la siguiente expresión:

$$R = E * H * V \quad (1)$$

Siendo: R el riesgo total o número de pérdidas esperado, E indica el número de vidas humanas y bienes expuestos al riesgo en el área de estudio, H es el hazard o probabilidad de que un área determinada pueda verse afectada por un proceso potencialmente catastrófico en un cierto intervalo de tiempo, y V es la vulnerabilidad de las vidas y de los bienes expuestos al fenómeno natural objeto de análisis (varía en una escala que va de 0 a 1). Cabe destacar que el término hazard en (1) en la literatura científica se presta a múltiples traducciones e interpretaciones. En este

trabajo se ha adoptado el término 'peligrosidad', la traducción más empleadas en España (actualmente el país de residencia de quien escribe), sin embargo se hace particular énfasis que en la literatura de Colombia y de los otros países Latinoamericanos, se emplea el término 'amenaza' igualmente correcto y adecuado.

De acuerdo con la fórmula (1), la evaluación del riesgo volcánico en la isla de Ischia ha consistido en la estimación de los tres parámetros referidos; de todos ellos, el más difícil de estimar es la peligrosidad. De hecho, para establecerlo ha sido necesario no sólo calcular la probabilidad con la cual se puede producir una erupción en un cierto intervalo de tiempo y en un espacio determinado, sino también formular hipótesis acerca de las fenomenologías con las cuales la erupción puede manifestarse potencialmente. Así, en el ámbito de un mismo distrito volcánico, una erupción puede desarrollarse según distintos mecanismos y con fenomenologías similares a las erupciones anteriores; cada fenomenología tiene una cierta capacidad de transformación y, por lo tanto, el riesgo es diferente.

ESTIMACIÓN DE PELIGROSIDAD

La estimación de los parámetros de (1) empezará con este, por muchos autores considerado el parámetro de más difícil evaluación.

Para realizar el cálculo de la Peligrosidad, partiremos de la hipótesis según la cual una manifestación volcánica futura tendría características similares a las ocurridas en periodos precedentes; esto implica que se debe calcular el valor de la probabilidad absoluta con la cual se puede desarrollar cada fenómeno considerado en el caso de que se produzca una erupción. Éste es un aspecto que se debe subrayar, porque para una correcta evaluación del riesgo es preciso conocer no sólo la probabilidad de que tenga lugar una erupción y el sitio más probable de ocurrencia, sino también estimar la probabilidad con la que se pueden desarrollar las distintas fenomenologías (columna pliniana, flujo piroclástico, ...). En relación a las características específicas de este estudio, dicho parámetro está definido por el producto de la probabilidad con la que

puede desarrollarse un nuevo evento volcánico en un cierto periodo de tiempo (Probabilidad Absoluta) por la probabilidad de que dicha erupción suceda según las distintas modalidades posibles (Probabilidad Relativa).

Probabilidad absoluta de erupción en la isla

Como se ha mencionado anteriormente, en este trabajo se han empleado los valores de probabilidad absoluta propuestos en un artículo anterior (Mattera, 2002). En aquella circunstancia se había establecido que Ischia pertenece a la categoría de los 'volcanes con memoria' (Scandone e Giacomelli, 1998). De esta forma, la probabilidad absoluta de que se pudiera producir una erupción en Ischia quedaba expresada mediante la fórmula:

$$P(n, t) = \frac{\{t * [a * 10^{-(b*VEI)}]\}^n}{n!} e^{-t*(a*10^{-(b*VEI)})} \quad (2)$$

donde n es el número de erupciones previstas en el intervalo de tiempo t , a constituye un índice de la frecuencia eruptiva del volcán, b representa un índice que define el estilo de la actividad del volcán y, finalmente, el VEI (*Volcanic Explosivity Index*; Newhall y Self, 1982) un índice de la intensidad de la actividad volcánica comprendido entre 0 y 8, asignado con base en evaluaciones tanto de tipo cualitativo (descripción del estilo de la erupción) como cuantitativo (determinación del volumen de material emitido o altura de la columna pliniana).

Con base en esta formulación y en función de las peculiaridades del volcanismo de la isla de Ischia, se había reconstruido un registro de erupciones que se remontaba a los últimos 55.000 años (fecha que corresponde a la emisión del Tufo Verde) y se había asociado a cada erupción un VEI, comprendido entre 1 y 6. De esta forma se habían calculado los valores de probabilidad absoluta de erupción correspondientes a cada clase de VEI considerada para un intervalo de tiempo de 10 años (TABLA 1). Se ha utilizado este valor tanto porque las variaciones de la población en la isla se registran en base a decenios,

como por tratarse de un intervalo de tiempo durante el cual las evaluaciones de riesgo no sufren variaciones consistentes tras los cambios urbanísticos. Cabe destacar que los valores de la probabilidad han sido calculados también para $t = 100$ años, de manera que se puedan comparar los datos (ver TABLA 1).

TABLA 1. Valores del Age Specific Eruption Rate y de la Probabilidad Absoluta de erupción (10 y 100 años) que corresponden a cada clase de VEI (según Mattera, 1995).

VEI	Age Specific Eruption Rate	P(1.10) _{VEI}	P(1.100) _{VEI}
1	0,00379915	0,03657522	0,25983129
2	0,00131687	0,01299642	0,11543884
3	0,00045646	0,00454381	0,04360928
4	0,00015822	0,00157970	0,00155736
5	0,00005440	0,00054810	0,00545400
6	0,00001901	0,00019006	0,00189739

Con base en dichos resultados matemáticos se ha podido proceder a la determinación de los mapas de Peligrosidad correspondientes a cada una de las cuatro fenomenologías consideradas en este estudio.

Peligrosidad por apertura de nuevos centros eruptivos

La isla de Ischia no presenta una vía preferencial de salida del magma, por lo tanto, como 'campo volcánico' (Scandone e Giacomelli, 1998), toda la isla y los fondos marinos contiguos pueden verse potencialmente afectados por la apertura de nuevas bocas eruptivas.

Una de las finalidades del presente trabajo es individualizar, en el interior de la superficie insular, la distribución de las zonas con diferentes probabilidades de apertura de nuevas bocas eruptivas. Para la evaluación de dicha Peligrosidad se emplea como base topográfica la hoja n° 183 del Instituto Geográfico Militar (IGM) italiano, a escala 1:25.000, dividida con una cuadrícula de 1 km de lado. Estas cuadrículas constituyen una red de celdas con dimensiones significativas para referir a ellas los cálculos de los indicios detectados (ver FIGURA 1). Para la determinación de la Peligrosidad se han

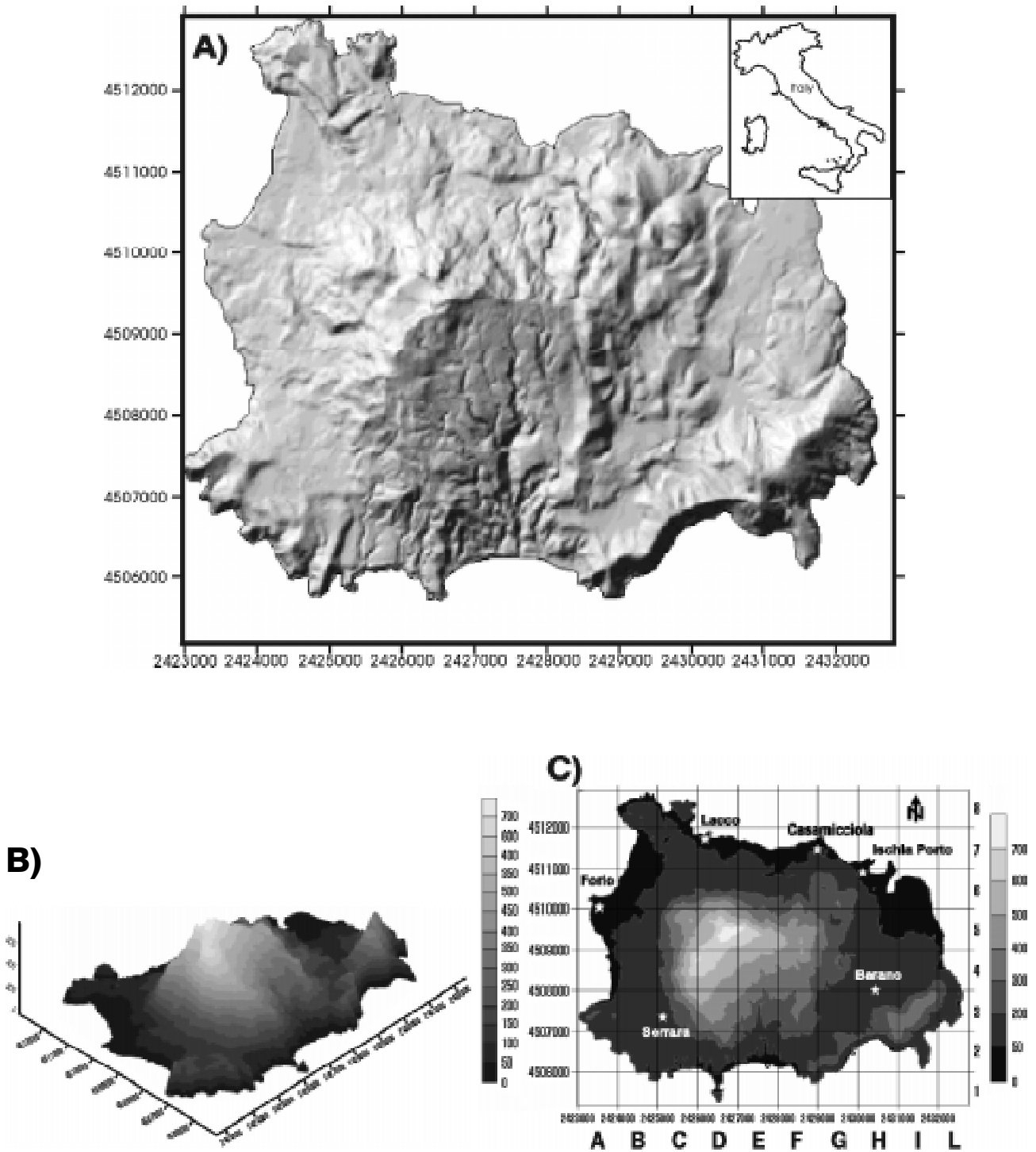


FIGURA 1. Modelo Digital de Elevaciones de la isla de Ischia, obtenido a partir de un grid de 25 m. A, modelo de relieve sombreado; B, representación tridimensional; C, sistema de cuadrículas de referencia (UTM) considerado en los cálculos.

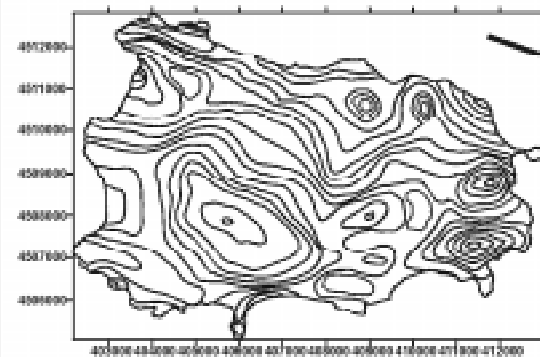
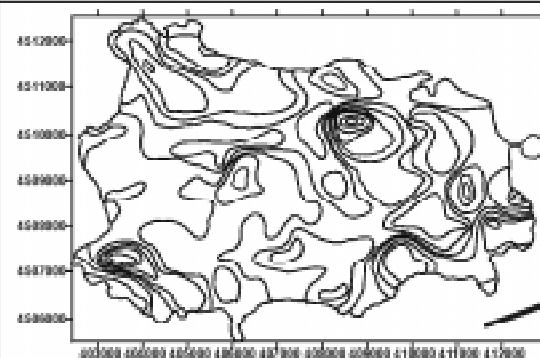
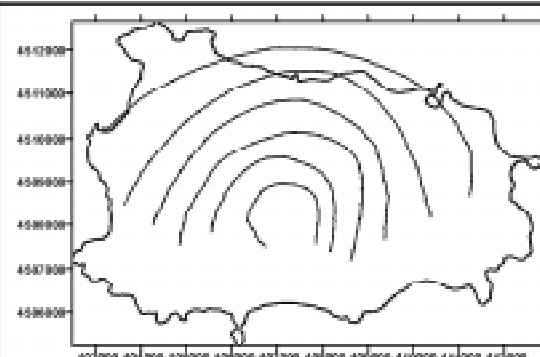
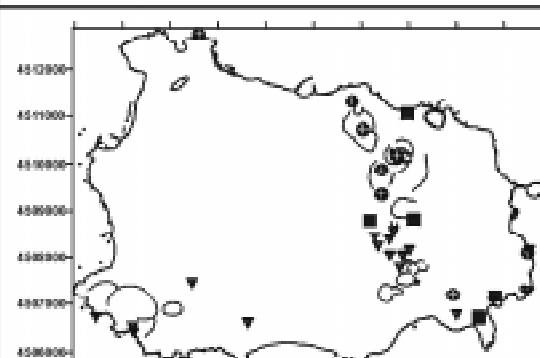
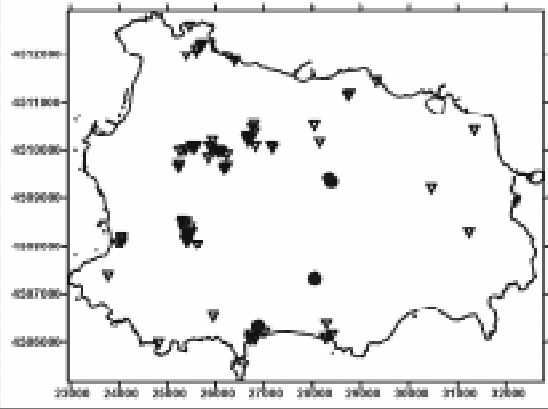
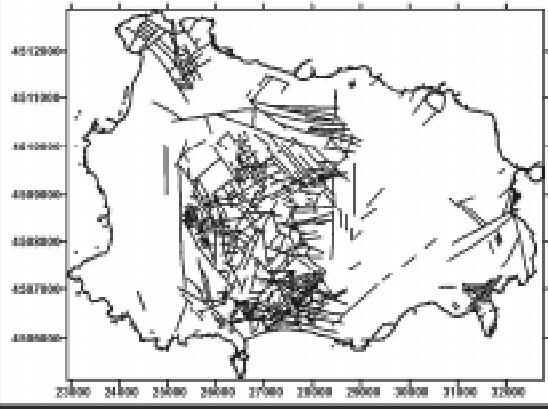
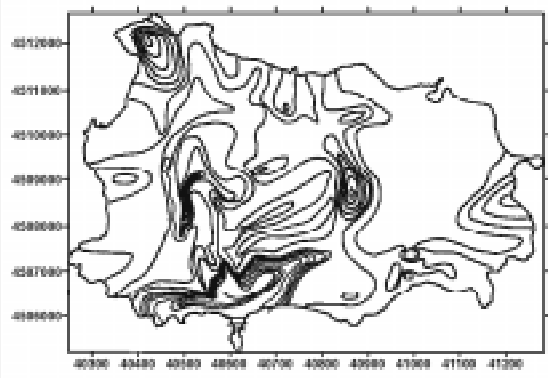
Tipo de Datos		Información Digital	Método
Geofísicos	Anomalías Gravimétricas		<p>Se ha considerado el levantamiento gravimétrico realizado por Maino y Tribalto (1971). Para poder destacar la existencia del gradiente gravimétrico se ha utilizado el siguiente procedimiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> - en cada sub-área se han trazado por lo menos dos perfiles ortogonales entre ellos y paralelos a la cuadrícula kilométrica del mapa del I.G.M.
	Anomalías Magnéticas		<ul style="list-style-type: none"> - se han elegido (en cada sector) las anomalías de Bouguer que superaban, por lo menos, una desviación estándar del valor medio estimado para cada sector; - se han incluido en una tabla las variaciones de gradientes más relevantes.
	Deformaciones		<p>En el transcurso de su historia geológica, la isla de Ischia ha estado sujeta a varios movimientos verticales. Las nivelaciones topográficas realizadas en este siglo indican que estos movimientos, aunque imperceptibles, continúan produciéndose. Para medir dichas deformaciones se ha considerado un mapa que se ha obtenido mediante la comparación de los movimientos del suelo que se han producido entre 1913-1967. Los indicios han sido detectados trazando en el punto de máxima deformación una corona circular de radio $r = 2.7 \pm 1.0$ km, que corresponde a la máxima deformación horizontal establecida a través de un simple modelo de deformación elástico (Maino y Tribalto, 1971).</p>
	Edificios Volcánicos		<p>La presencia de un edificio volcánico antiguo dentro de una cuadrícula indica que en dicha zona, en el pasado, han concurrido una serie de condiciones que han favorecido el desarrollo de actividad volcánica y que en esos mismos sectores se podrían verificar una vez más con mayor probabilidad que en otros sitios.</p>

FIGURA 2. Técnicas de investigación y procedimiento para establecer los distintos 'indicios'.

Tipo de Datos		Información Digital	Método
Volcanológicos	Fumarolas y Fuentes Termales		La presencia de fumarolas y fuentes termales debe considerarse como evidencias de la presencia de masas magmáticas en profundidad. Ambos fenómenos se han determinado a causa de la interacción de estas masas con el agua. Las aguas, modificadas en contacto con el magma, suben después a la superficie aprovechando vías preferenciales de salida. Por lo tanto, su presencia indica una cierta propensión a la apertura de una boca eruptiva.
	Fallas		Casi todos los cráteres están situados en asociación directa con fallas. Las cuadrículas donde se encuentran diversas fallas representan zonas donde es más probable el desarrollo de un evento volcánico.
Geoquímicos	Anomalías de Radon		Se ha considerado que las cuadrículas donde se detecta un alto valor del gradiente son aquellas donde con mayor probabilidad puede verificarse la apertura de un nuevo cráter.

Continuación FIGURA 2. Técnicas de investigación y procedimiento para establecer los distintos 'indicios'.

considerado aquellos trabajos en los cuales las evaluaciones de carácter geofísico, volcanológico, geológico-estructural y geoquímico del área objeto de análisis son de carácter preeminente. A través del análisis de estos trabajos se ha podido evaluar la presencia de 'indicios', que se referirán a cada una de las cuadrículas que componen la hoja N° 183.

El término 'indicio' adquiere diferente sentido según la técnica de investigación particular (FIGURA 2); por ejemplo, desde un punto de vista estructural se ha considerado que un indicio es la presencia en un cuadrado de una falla, mientras que desde un punto de vista gravimétrico se ha entendido la variación del gradiente de la anomalía de Bouguer. Al no ser posible ponderar la influencia de los diferentes indicios, se ha asignado la misma relevancia a cada uno de ellos. Para cada uno de los conjuntos de datos referidos, a partir de la hoja N° 183 del IGM, se ha realizado el correspondiente mapa booleano; con esta particular nomenclatura nos referimos a un tipo específico de mapas que pueden tener sólo valor 0 y 1, donde 0 se asocia a las áreas en las que no se verifica el evento en cuestión, mientras que el 1 indica el suceso. Por este motivo, en el caso de la imagen booleana correspondiente a los aparatos volcánicos, si en la cuadrícula tenemos el valor 1 esto quiere decir que en la misma se encuentra un cráter, o sea, se verifica el evento en cuestión.

Después de haber realizado las siete imágenes booleanas, se ha pasado a realizar un mapa final, también éste obtenido a partir de la hoja N° 183 del mapa del IGM, y cuyas cuadrículas tienen un valor comprendido entre 0 y 7. Es evidente que en las cuadrículas donde se encuentra 0, es decir, donde hay una total ausencia de eventos, la probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos es mínima, mientras donde se encuentre 7, es decir, donde se verifica una gran presencia de los eventos considerados, la probabilidad de que se verifiquen estas fenomenologías es máxima.

La evaluación de la probabilidad relativa se basa en la hipótesis de que la probabilidad de formación de nuevos cráteres sobre todo el área objeto de análisis es igual a 1, que en términos de porcentajes indica que existe el 100% de probabilidad de que se abra un

nuevo cráter.

La suma de todos los elementos presentes en los cuadrados representaría una probabilidad de uno, y el número de indicios por cada cuadrícula dividido por la suma total daría el valor de las probabilidades correspondientes; dichos valores, expresados en términos de porcentaje, serían los siguientes: 0,4329, donde hay un solo indicio; 0,8605, donde hay dos indicios; 1,2987, donde hay tres indicios; 1,7316, donde hay cuatro indicios; 2,1645, donde hay cinco indicios; 2,5974, donde hay seis indicios; y 3,0303, donde hay siete indicios. La representación gráfica aparece en la FIGURA 3, mientras la TABLA 2 propone los valores de probabilidad para cada cuadrado. Para el cálculo de la probabilidad absoluta simplemente implementamos los valores que le corresponden en la siguiente fórmula:

$$P_{A,VEI} = P_{VEI} * P_R \quad (3)$$

Por medio de ésta se obtienen los valores de la TABLA 3.

Peligrosidad de los flujos piroclásticos

En este trabajo se entienden por 'flujos piroclásticos' todos aquellos eventos que provocan el deslizamiento por el suelo de ingentes cantidades de mezclas de diversos magmas y gas, a temperaturas superiores a 800° C y velocidades elevadas (> 100 km/h), y cuyos productos se pueden encontrar a notables distancias del centro eruptivo. Por lo tanto, en el término se incluyen además de los flujos piroclásticos propiamente dichos también otras fenomenologías como los *surges* y los *blasts*.

Para el cálculo de la peligrosidad correspondiente a los flujos piroclásticos, en cada cuadrícula del mapa topográfico de referencia se han simulado erupciones según las tipologías propias de esta clase de fenomenología. Las simulaciones han sido realizadas sólo para las erupciones que contienen VEI > 3, porque las erupciones que se sitúan en las clases de VEI inferiores no determinan el desarrollo de flujos piroclásticos. Al realizar las simulaciones, se ha tenido la oportunidad de valorar que las erupciones con VEI

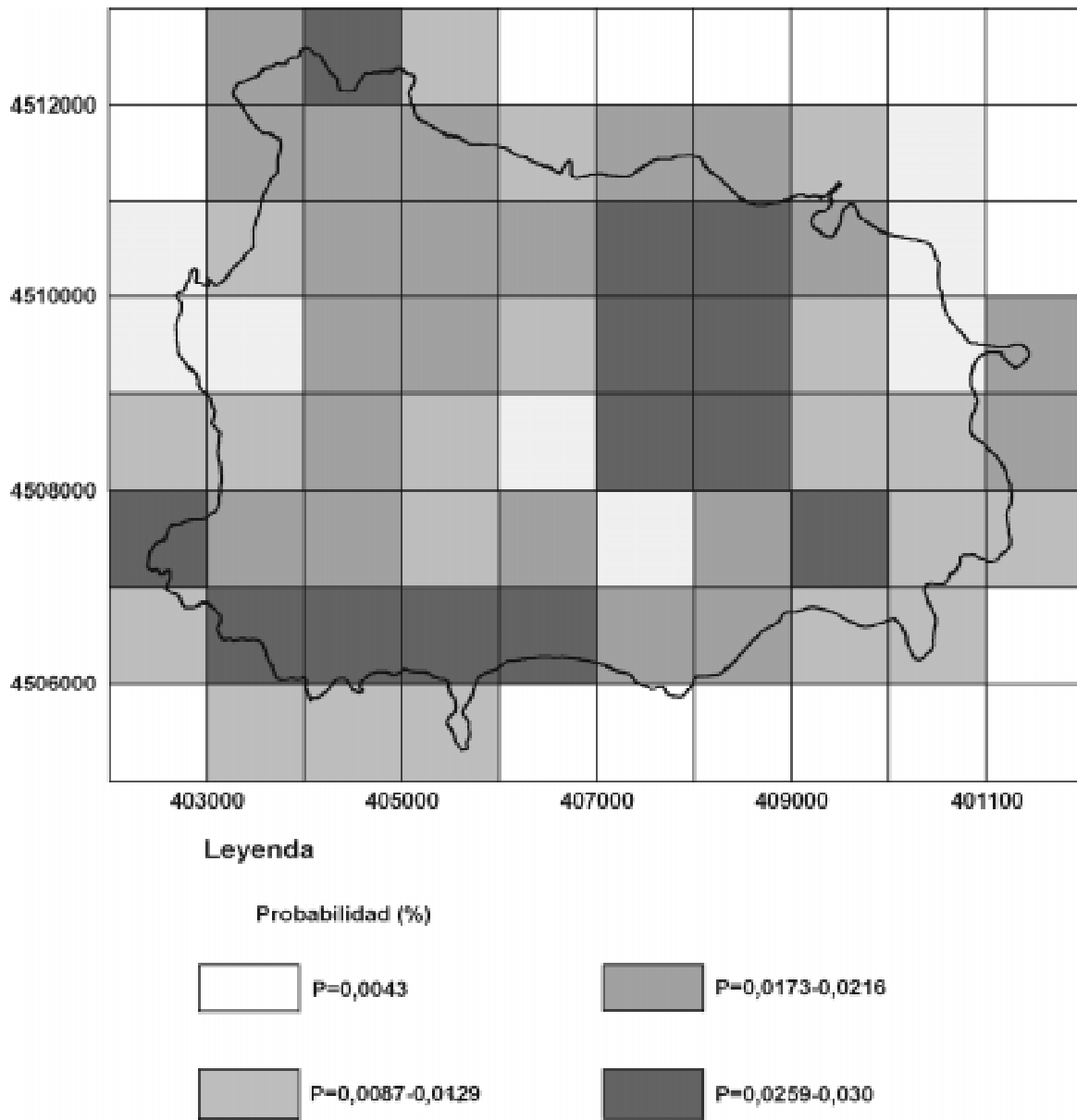


FIGURA 3. Esquema de los datos empleados para el cálculo del mapa de peligrosidad para 'nuevos centros eruptivos'.

> 6, a causa de su elevado poder explosivo, tienen la capacidad de abarcar cualquier zona de la isla, independientemente de donde se produzca la apertura del cráter.

Para realizar las simulaciones para erupciones que se sitúan en clases de VEI incluidas entre 3 y 5 se ha tomado como referencia el concepto de 'cono de energía' (Sheridan, 1979). En el modelo (ver FIGURA

4) se ha considerado que la distribución de los productos tiene lugar en el interior del área definida por la circunferencia del cono.

Los parámetros que definen la forma del cono varían en función de la clase de erupción considerada (es decir, de la clase de VEI) y de la altitud a la cual se encuentra el cráter. Por esta razón, para cada clase de VEI ha sido necesario calcular la altura mínima de

TABLA 2. Probabilidad relativa de apertura de nuevos centros eruptivos (ver FIGURA 3 y FIGURA 1C para sistema de cuadrículas).

Cuad.	Probabilidad relativa	Cuad.	Probabilidad relativa	Cuad.	Probabilidad relativa
1B	0,00865801	3L	0,00865801	6A	0,00432900
1C	0,01298701	4A	0,01298701	6B	0,00865801
1D	0,00865801	4B	0,00865801	6C	0,02164502
2A	0,01298701	4C	0,02164502	6D	0,02164502
2B	0,03030303	4D	0,01298701	6E	0,02164502
2C	0,02597402	4E	0,00432900	6F	0,02597402
2D	0,03030303	4F	0,02597402	6G	0,02597402
2E	0,02597402	4G	0,02597402	6H	0,02164502
2F	0,01731602	4H	0,00865801	6I	0
2G	0,01731602	4I	0,01298701	7B	0,01731602
2H	0,00865801	4L	0,02164502	7C	0,02164502
2I	0,01298701	5A	0,00432900	7D	0,01731602
3A	0,02597402	5B	0,00432900	7E	0,00865801
3B	0,02164502	5C	0,02164502	7F	0,01731602
3C	0,01731602	5D	0,01731602	7G	0,01731602
3D	0,01298701	5E	0,01298701	7H	0,01298701
3E	0,01731602	5F	0,03030303	7I	0
3F		5G	0,02597402	8B	0,01731602
3G	0,01731602	5H	0,01298701	8C	0,02597402
3H	0,02597402	5I	0,01731602	8D	0,00865801
3I	0,01298701	5L	0,01731602		

colapso de la columna eruptiva que ha generado los 'flujos piroclásticos', correspondiente a la altura OV del cono representado en la FIGURA 4, y luego, sumar a éste el valor de la cota altimétrica media del cuadrado correspondiente sobre el que se situaría (Mattera, 1995).

Para la determinación se ha calculado una formulación que relaciona la altura de colapso de una columna eruptiva en función del flujo volumétrico F :

$$H_{Col} = 2.9043 + F^{0.5187} \quad (4)$$

Si al ángulo F de la FIGURA 4 (identificado como ángulo de rozamiento), de acuerdo con la estimación de Siebert et al. (1987), se le atribuye un valor de 6° , a través de una simple relación trigonométrica es posible calcular para cada clase de VEI considerada, el radio de la circunferencia de base del cono (Mattera, 1995). Los resultados se encuentran en la FIGURA 4.

Al realizar las simulaciones en cada cuadrado ha sido necesario añadir a la cota de colapso de los flujos piroclásticos correspondientes a la clase de VEI considerada, la cota altimétrica media (H media) de la cuadrícula, calculada a partir del mapa topográfico. Posteriormente, se han realizado las simulaciones

superponiendo el 'cono de energía correcto' (cono de energía obtenido teniendo en cuenta la altura de colapso y la cota altimétrica media) al mapa topográfico. Claramente, al realizar las simulaciones se supone que en cada cuadrado se debe producir una erupción y que los flujos piroclásticos se distribuirán según el 'cono de energía' correcto. El cono se ha superpuesto al cuadrado de manera que el vértice coincida con el centro del cuadrado considerado. Comparando los valores de las isóneas del cono con aquéllos del mapa topográfico, ha sido posible detectar las áreas que pueden quedar fuera del alcance de los flujos, es decir, aquéllas que por su altitud o porque están protegidas por barreras naturales, no deberían resultar vulnerables.

Este procedimiento ha sido realizado para cada clase de VEI considerada y para cada cuadrado, para los cuales se ha estimado una Peligrosidad de apertura de nuevos cráteres.

Al finalizar las simulaciones, sumando los valores de la probabilidad para cada clase de VEI, se ha calculado para cada cuadrado del mapa originario el valor de la probabilidad absoluta de invasión de los flujos piroclásticos.

Peligrosidad por productos de caída

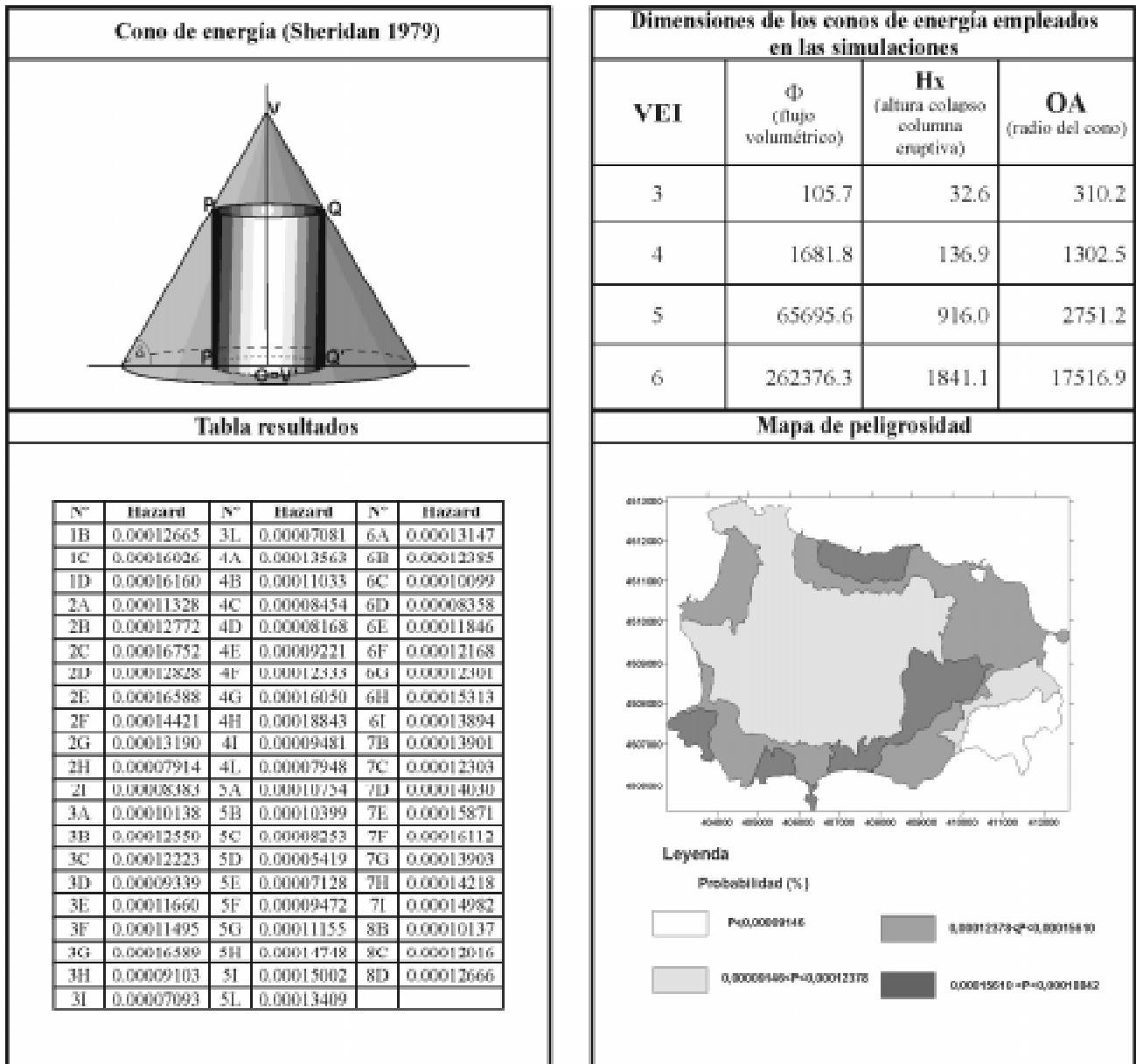


FIGURA 4. Procedimiento para el cálculo del mapa de peligrosidad para ‘flujos piroclásticos’

Con la expresión 'producto de caída' se indican aquellos productos que, impulsados hacia arriba por columnas eruptivas plinianas, caen en el suelo por efecto de la gravedad.

La geometría y el espesor del depósito correspondiente están ligados tanto a la altura de las columnas como a la velocidad y a la dirección de los vientos de altura.

La altura de la columna eruptiva depende

fundamentalmente del radio del conducto, de la cantidad de gases, de su velocidad de salida y de la eficiencia de la conversión de la energía térmica en contacto con el aire más frío.

Los depósitos de los productos de caída suelen presentar una distribución espacial elíptica, con el volcán ocupando uno de los focos y el eje mayor orientado según la dirección del viento dominante. Dichos depósitos se caracterizan por la capacidad de mantener un espesor constante tanto en los valles

Evaluación del riesgo volcánico en la Isla de Ischia (Italia)

TABLA 3. Probabilidad absoluta; ver FIGURA 1C para sistema de cuadrículas.

Cuad.	VEI 2	VEI 3	VEI 4	VEI 5	VEI 6
1B	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164
1C	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
1D	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164
2A	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
2B	0,00039643	0,00013801	0,00004791	0,00001661	0,00000576
2C	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
2D	0,00039643	0,00013801	0,00004791	0,00001661	0,00000576
2E	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
2G	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
2H	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164
2I	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
3A	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
3B	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
3C	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
3D	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
3E	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
3F	0,00005663	0,00001971	0,00000684	0,00000237	0,00000082
3G	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
3H	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
3I	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
3L	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164
4A	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
4B	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164
4C	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
4D	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
4E	0,00005663	0,00001971	0,00000684	0,00000237	0,00000082
4F	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
4G	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
4H	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164
4I	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
4L	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
5A	0,00005663	0,00001971	0,00000684	0,00000237	0,00000082
5B	0,00005663	0,00001971	0,00000684	0,00000237	0,00000082
5C	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
5D	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
5E	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
5F	0,00039643	0,00013801	0,00004791	0,00001661	0,00000576
5G	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
5H	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
5I	0,00005663	0,00001971	0,00000684	0,00000237	0,00000082
5L	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
6A	0,00005663	0,00001971	0,00000684	0,00000237	0,00000082
6B	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164
6C	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
6D	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
6E	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
6F	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
6G	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
6H	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
6I	0	0	0	0	0
7B	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
7C	0,00028317	0,00009857	0,00003422	0,00001187	0,00000411
7D	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
7E	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164
7F	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
7G	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
7H	0,00016990	0,00005914	0,00002053	0,00000712	0,00000247
7I	0	0	0	0	0
8B	0,00022653	0,00007886	0,00002737	0,00000949	0,00000329
8C	0,00033980	0,00011829	0,00004106	0,00001424	0,00000494
8D	0,00011327	0,00003943	0,00001369	0,00000475	0,00000164

como en los interfluvios. Según lo establecido por evaluaciones estadísticas recogidas en la literatura (Alexander, 1990), la caída de los piroclastos causa una tasa de mortandad no muy elevada. Materiales con un espesor inferior a 10 cm pueden causar daños en los cultivos, pero no en las construcciones; por el contrario, materiales con un espesor superior a 1 m obligan a retirar estos productos de los tejados.

El procedimiento adoptado para evaluar la peligrosidad de los productos de caída es parecido al utilizado para los flujos piroclásticos.

En cada cuadrícula del mapa del IGM se ha realizado una simulación de erupciones para las clases de VEI 3, 4, 5 y 6. De hecho las erupciones que corresponden a dichas clases determinan columnas con tal altura que sus productos están expuestos al régimen de los vientos de altura.

Para cada clase de VEI considerada se ha construido una elipse (FIGURA 5). Cabe destacar que la distribución de los productos en las zonas proximales al volcán no está condicionada por el régimen de los vientos de altura; por esa razón los depósitos no adquieren forma elíptica sino concéntrica en el centro de emisión (Mattera, 1995).

En la FIGURA 5 se ha representado la metodología empleada para realizar las simulaciones y los parámetros geométricos que la definen para cada clase de VEI considerada. Dichos parámetros han sido establecidos analizando algunas erupciones volcánicas (erupciones de Baia, Pomici Principali y Tufo Giallo, a las cuales se han atribuido VEI = 4, 5 y 6, respectivamente), clasificadas por algunos autores en base al esquema de Newhall y Self (1982). Además, cabe destacar, que tanto el círculo como la elipse que definen las metodologías empleadas en las simulaciones se refieren a depósitos con 1 metro de espesor, los cuales, como ya se ha dicho, pueden provocar daños relevantes en el tejido socio-económico expuesto.

En cada simulación se ha colocado la boca eruptiva en el foco de la elipse y se ha indicado por medio del segmento AB la distancia máxima que pueden alcanzar los productos de caída.

Al considerar que los vientos de altura pueden afectar

a las modalidades de deposición de los productos de caída, también ha sido necesario evaluar la influencia de la acción de los vientos; respecto a este tema se han considerado los registros de los vientos a cotas de 5,500 m (para erupciones con clase de VEI = 3) y 12.000 m para VEI > 3.

Al finalizar las simulaciones, mediante la suma de los valores de la probabilidad para cada clase de VEI se ha calculado para cada cuadrícula del mapa originario el valor de la probabilidad absoluta de invasión por productos de caídas.

Peligrosidad por la actividad efusiva

La actividad efusiva está condicionada por la viscosidad del magma. Si la viscosidad es alta, el magma encuentra cierta dificultad para subir por el conducto y determina la formación de un domo. Esta estructura puede subir a superficie o quedarse en las profundidades, 'taponada' por la costra de los productos piroclásticos a los cuales está asociada (domos endógenos).

Si la viscosidad es baja, entonces el magma tiene la facultad de subir por el conducto produciendo una colada de lava: la distancia que consigue alcanzar la colada depende no sólo de la viscosidad, sino también de la tasa de emisión y de la pendiente de la superficie por la cual se desliza.

A través del análisis de dos erupciones históricas de la isla de Ischia (reconstrucción de la dinámica eruptiva y de los parámetros geométricos que definen la misma - volumen de material emitido, duración de los eventos, longitud de la coladas -), a las cuales se les ha asignado VEI 2 y 3 (Rotaro III y Arso respectivamente), y de algunas evaluaciones trigonométricas, ha sido posible calcular los parámetros necesarios para realizar las simulaciones.

Para ello, ha sido determinante la implementación de un modelo propuesto por Walker (1973), según el cual la geometría de la lava varía en función de su quimismo. La geometría estaría condicionada tanto por H (representa la extensión horizontal expresada en términos del diámetro del círculo cuya superficie

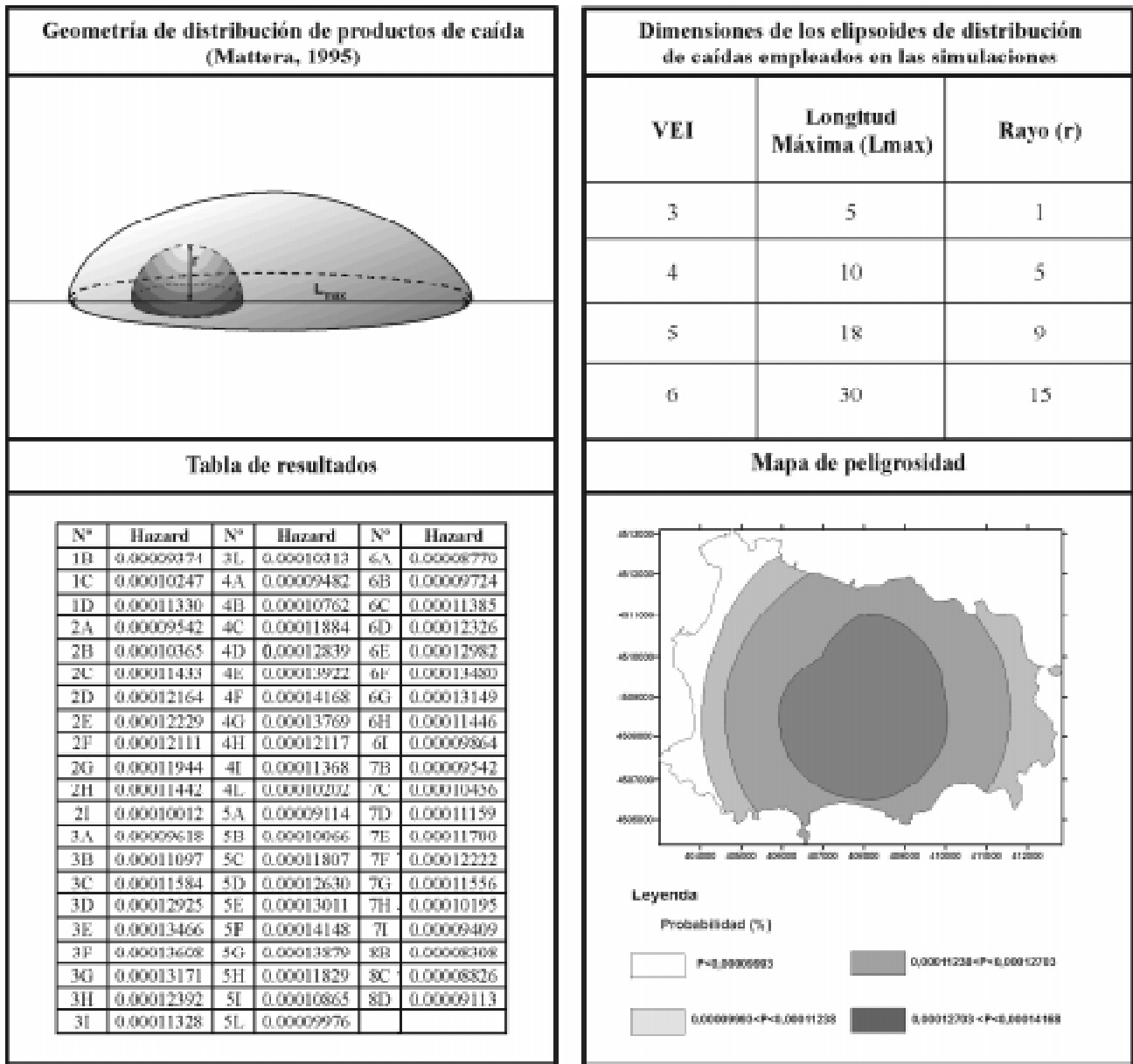


FIGURA 5. Procedimiento para el cálculo del mapa de peligrosidad para 'productos de caída'.

equivale a la colada de lava) como por V (representa el espesor medio). A través de la división de estos dos parámetros se llega a definir el *Aspect Ratio*.

La determinación del *Aspect Ratio* para todas las clases de VEI consideradas, ha sido realizada con base en los trabajos de Chiesa et al. (1986) y Vezzoli (1988), y la implementación de un modelo matemático (Mattera, 1995), que han permitido establecer para la isla de Ischia los hipotéticos parámetros geométricos

que definen las metodologías empleadas en las simulaciones para las dos clases de VEI consideradas (FIGURA 6).

También en este caso se han realizado simulaciones, superponiendo a cada clase de VEI la metodología correspondiente en cada cuadrícula del mapa del IGM. La suma de los valores de probabilidad obtenidos para cada clase de VEI considerada ha permitido establecer, en cada cuadrado del mapa originario, el

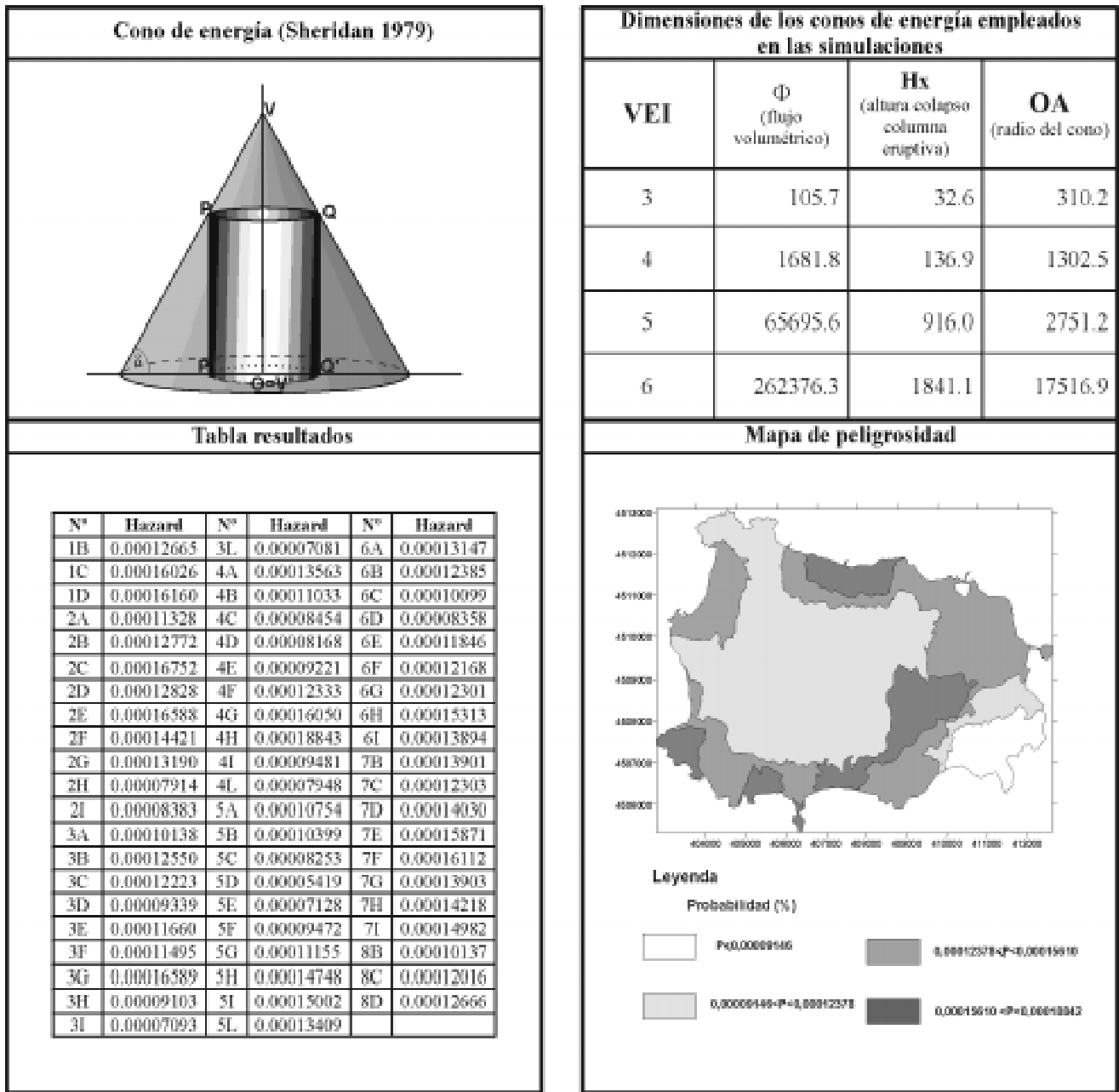


FIGURA 6. Procedimiento para el cálculo del mapa de peligrosidad para 'coladas de lava'.

correspondiente valor de probabilidad absoluta de invasión de coladas de lava.

Elementos de riesgo

Como ya se mencionó con anterioridad, el análisis de los elementos en riesgo tiene por objetivo establecer el daño socio-económico que puede producir una

erupción en el área de estudio. Una estimación correcta de este parámetro supondría no sólo calcular el valor económico que posee cada zona del territorio, sino también establecer las repercusiones que una erupción podría tener sobre las costumbres y los usos que tradicionalmente se desarrollan en el mismo; a este respecto es interesante destacar que en el transcurso de la colonización griega de la isla (s. VII a.C.) algunas erupciones destruyeron poblados y

TABLA 4. Población residente y evolución reciente en los seis municipios de la isla de Ischia (datos proporcionados por el ISTAT, Istituto Nazionale di Statistica (Italia).

Municipio	1951	1961	1971	1981	1991
Barano d'Ischia	6003	5769	5862	6346	7681
Casamicciola	4469	4983	5399	5945	6571
Forio d'Ischia	6603	7209	8142	9642	11562
Ischia	10385	11416	14339	16038	16443
Lacco Ameno	2060	2513	3055	3523	3935
Serrara Fontana	2293	2323	2365	2595	2904

obligaron a los habitantes a buscar otros lugares donde establecer sus colonias.

Para el caso que nos ocupa, el parámetro 'elementos en riesgo' ha sido referido únicamente al número de ciudadanos residentes en cada ayuntamiento de la isla en 1991; de hecho, este índice permite señalar con cierto detalle los bienes que corresponden a cada ayuntamiento, tomando como hipótesis de partida el hecho de que no existe una diferencia excesiva de renta entre los habitantes de la isla. Con el fin de destacar el incremento del riesgo volcánico producido por el desarrollo económico, se ha considerado también la evolución de la población en décadas anteriores (como indica la tabla 4, los datos van de 1951 a 1991).

ESTIMACIÓN DE VULNERABILIDAD

En el transcurso de una erupción volcánica, en función de la naturaleza del magma y de las características del centro eruptivo, se desarrollan distintas fenomenologías geológicas. En el caso de Ischia, las erupciones volcánicas se han caracterizado por la generación de una gran variedad de procesos (apertura de centros eruptivos, coladas de lava, emisión de flujos piroclásticos, formación de columnas plinianas...); por esta razón, para la evaluación de la vulnerabilidad ha sido necesario atribuir un valor a cada una de las tipologías eruptivas que con mayor probabilidad se pueden desarrollar en la isla.

Para ello, se ha considerado la incidencia, en términos de muertos, que el impacto de los distintos eventos volcánicos podría tener sobre el territorio. A continuación se proponen los valores empleados, así como se indica en la TABLA 5:

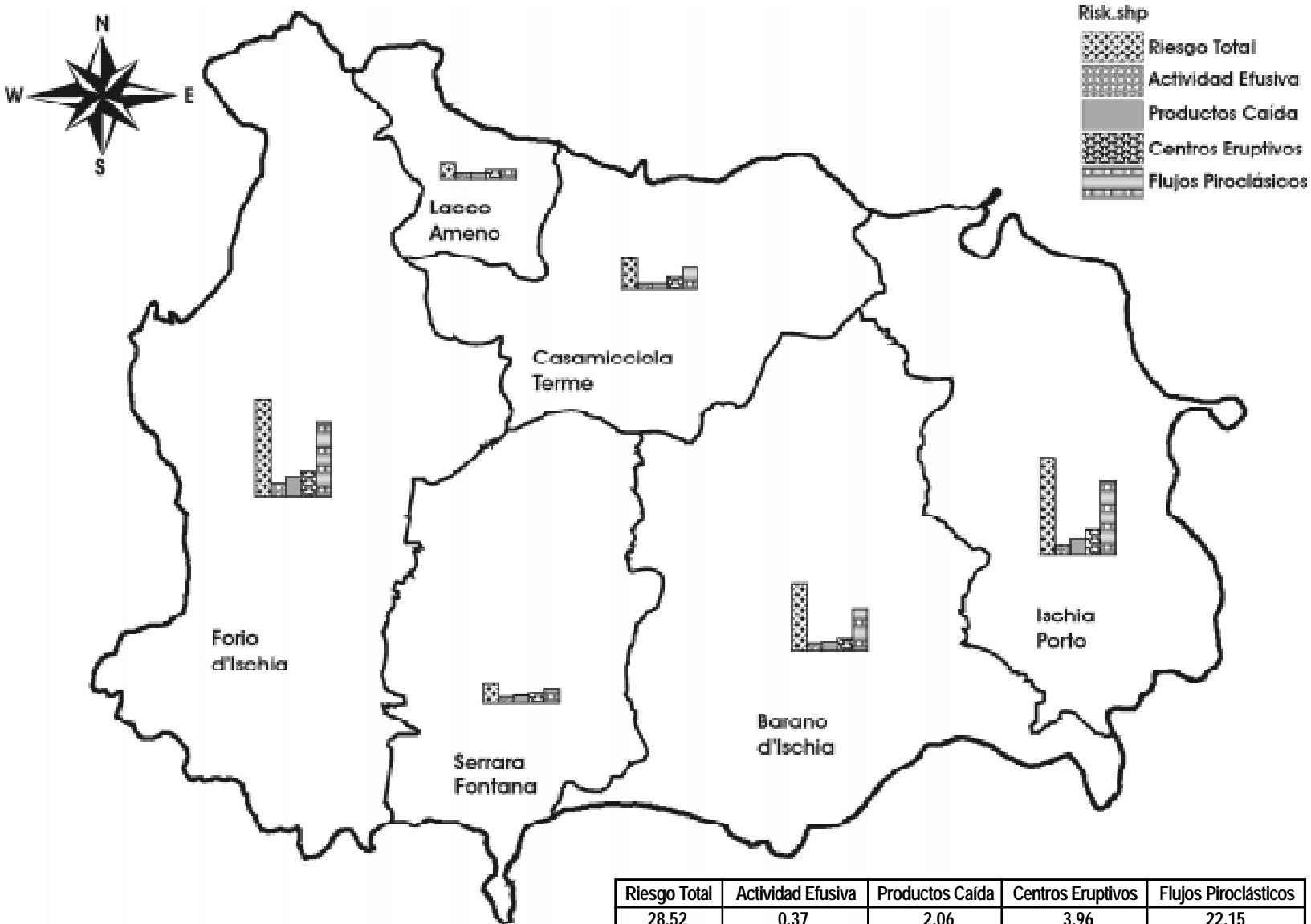
- Apertura de nuevos centros eruptivos. Se ha

establecido la hipótesis de que la formación de un nuevo centro de erupción provocaría la destrucción de un área de aproximadamente 1 km de lado. Por lo tanto, se ha asignado el valor máximo de vulnerabilidad, es decir 1 (100 %). Para referirlo a los distintos ayuntamientos, se ha considerado como valor de vulnerabilidad $1/N$, donde N es igual al número de cuadrados pertenecientes al ayuntamiento correspondiente.

- Flujos piroclásticos. También en este caso se ha considerado que en las áreas afectadas por esta fenomenología la supervivencia sería nula, y por lo tanto, la vulnerabilidad puede considerarse 1.
- Productos de caída. Como indica la baja mortandad asociada a este proceso, los productos de caída son unas de las fenomenologías geológicas menos peligrosas. Por esa razón se ha asociado a la misma un valor igual a 0,1.
- Actividad efusiva. Las lavas de Ischia se caracterizan por un bajo valor de fluidez, que hace poco probable un evento de alto riesgo. Por lo tanto, conforme a otros trabajos similares (D'Andrea, 1993) se ha asignado un valor igual a 0,01 a la vulnerabilidad relacionada con esta fenomenología.

RESULTADOS

El producto de los tres parámetros que componen la fórmula de riesgo (1) ha permitido calcular los distintos Riesgos Parciales (es decir, aquellos correspondientes a cada fenomenología considerada) para cada ayuntamiento de la isla. Mediante la suma de los Riesgos Parciales ha sido posible calcular el valor del Riesgo Total en cada ayuntamiento insular. Tomando como base dichos valores se ha realizado



Riesgo Total	Actividad Efusiva	Productos Caída	Centros Eruptivos	Flujos Piroclásticos
28.52	0.37	2.06	3.96	22.15
17.17	0.36	1.39	2.76	12.68
7.89	0.18	0.50	2.47	4.74
2.98	0.05	0.13	1.39	1.41
3.77	0.06	0.28	0.95	2.48

FIGURA 7. Mapa de riesgo total, con las tablas correspondientes.

TABLA 5. Valores de vulnerabilidad asociados a cada fenomenología considerada.

FENOMENOLOGÍA	VULNERABILIDAD
Apertura centro eruptivo	1
Flujo piroclástico	1
Productos de caída	0,1
Actividad efusiva	0,01

la cartografía del Riesgo Total (FIGURA 7). En dicho mapa, a cada ayuntamiento de la isla se le ha asociado un valor del grado de Riesgo. Dicho valor ha sido calculado comparando los valores del Riesgo Total, propuestos en la tabla de la figura 7, con la subdivisión en clases del grado de Riesgo, lo cual comporta la siguiente distinción: bajo (<10%), medio (de 10 a 100), alto (de 100 a 1000) y muy alto (>1000).

INTERPRETACIÓN

Gracias al análisis del conjunto de datos que muestra la FIGURA 7 puede establecerse que ningún ayuntamiento insular posee un grado de riesgo alto o muy alto; los únicos ayuntamientos que tienen un grado de riesgo medio son: Barano d'Ischia, Forio d'Ischia e Ischia Porto. En los restantes se registran valores de riesgo bajos.

Para hacer más cómoda la visualización y el análisis, los valores tabulares del riesgo han sido utilizados para la construcción del Mapa de Riesgo Total (FIGURA 7) y han permitido la elaboración de un histograma que representa el valor del grado de riesgo para cada Ayuntamiento.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Si la estimación del riesgo se limita a considerar los valores del parámetro 'Elementos en Riesgo' proporcionados por el Istituto Nazionale di Statistica italiano, el riesgo volcánico en los distintos ayuntamientos de la isla de Ischia no resulta alto.

Sin embargo, el riesgo existente no debería ser subestimado ni por los organismos y entidades locales ni por los servicios de Protección Civil. Cada uno, en el ámbito de sus propias competencias, tendría que

proponer entre los objetivos prioritarios la reducción del riesgo. Una política enfocada a ese fin se traduciría, casi automáticamente, en una mejora de las condiciones ambientales: gestionar un territorio sometido a un determinado riesgo implica imponer limitaciones en el uso de los recursos; por otra parte, las características geológicas y paisajísticas provenientes de la actividad volcánica (fumarolas, aguas termales, etc.) constituyen un patrimonio cultural inestimable.

Por otro lado, los datos obtenidos deben tomarse con una cierta cautela, porque no tienen en cuenta dos características peculiares de la isla de Ischia: el elevado flujo turístico que recibe y su insularidad.

El 'flujo turístico', importante en muchas temporadas del año (fines de semana, 'puentes' y estación veraniega), tiene una incidencia sobre el parámetro 'Elementos en Riesgo' difícil de estimar; si tomamos como base la información proporcionada por la Agencia Local de Turismo, que cuantifica en al menos 350.000 los turistas presentes sobre la isla en el transcurso del verano, sólo este dato bastaría para elevar a *alto* o incluso *muy alto* el grado de riesgo en algunos ayuntamientos.

La 'insularidad' crearía problemas al elaborar planes de evacuación, ante la eventualidad de una erupción volcánica; puesto que Ischia sólo tiene salida por mar, los medios de transporte con los que cuenta actualmente resultarían insuficientes, incluso para evacuar a la población estable.

REFERENCIAS

- Alexander, D.E. (1990). *Calamita naturali*. Pitagora Editore, Bologna, p. 284.
- Chiesa, S., Vezzoli, L. (1983). *Guida dell'escursione all'isola d'Ischia*. Gruppo Vulcanologico (C.N.R.), Reunión del 18-19-0-5-1983.
- Chiesa, S., Poli, S., Vezzoli, L. (1986). *Studio dell'ultima eruzione storica dell'isola d'Ischia: la colata dell'Arso 1302*. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano, Centro Alpi Centrali, CNR, Milano.

D'Andrea, M. (1993). Valutazione del Rischio Vulcanico nei Campi Flegrei. Tesi, Università di Napoli.

Luongo, G., Cubellis, E., Obrizzo, F. (1987). Ischia. Liguori Editore. Napoli, 165 p.

Maino, A., Tribalto, G. (1971). Rilevamento gravimétrico di dettaglio dell'isola d'Ischia (Napoli). Boll. Serv. Geol. d'Ital., Vol. 92, pp. 109-123.

Mattera, M. (1995). Valutazione del Rischio Vulcanico Nell'isola D'Ischia, Tesi di Laurea, Facolta di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Universita Federico II, Napoli, 128 p.

Newhall, C.G., Self, S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. J. Volcanol. and Geotherm., Vol. 87, pp. 1231-1238.

Nunziata, C., Rapolla, A. (1987). A gravity and magnetic study of the volcanic island of Ischia, Naples (Italy). J. Volcanol. and Geotherm., Vol. 31, pp. 333-344.

Rittmann, A. (1948). Origine e differenziazione del magma ischitano. Bull. Suisse. Mineral. Petrogr., Vol. 28, pp. 643-698.

Scandone, R., Giacomelli, L. (1998). Vulcanologia, principi fisici e metodi d'indagine. Liguori Editore. Napoli, 642 p.

Sheridan, M.F. (1979): Emplacement of pyroclastic flows: a review. In: Ash-flow tuffs (C.E. Chapin and W.E. Elston, Eds.), Geol. Soc. of Am., Special Paper, Vol. 180, pp. 125-136.

Siebert, L., Glicken, H., Ui, T. (1987). Volcanic hazards from Bezymianny and Banday-tipe eruptions. Bull. Vulcanol., Vol. 49, pp. 435-459.

Smithsonian Institution/SEAN (1989). Global Vulcanism. Smithsonian Institution, Prentice Hall, New Jersey.

Vezzoli, L. (Ed.) (1988). Island of Ischia. CNR Quaderni de La Ricerca Scientifica, N° 114, Vol. 10, 133 p.

Walker, G.P. (1973). Explosive volcanic eruptions, a new classification scheme. Geol. Rund., Vol. 62, pp. 431-446.

Trabajo recibido: noviembre 26 de 2001

Trabajo aceptado: mayo 8 de 2002