



**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA**  
**INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

**MODELO PARA A AVALIAÇÃO DE *HAZARD* E RISCO  
VULCÂNICO NA ILHA DO FOGO, CABO VERDE**

**LÍDIA MARIA AMARAL RAPOSO DO QUENTAL**

(Licenciada em Geologia)

**Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
GEORRECURSOS**

**Orientadores Científicos:** Doutor Amílcar de Oliveira Soares  
Doutor João Luís Roque Gaspar

**Júri:**

**Presidente:**

**Vogais:**

Engenheiro Luís António Aires Barros (Prof. Catedrático)  
Doutor Amílcar de Oliveira Soares (Prof. Auxiliar c/ Agregação.)  
Doutor João Luís Roque Gaspar (Prof. Auxiliar)

Julho de 1999

## AGRADECIMENTOS

Ao orientador científico, Professor Amílcar Soares, sem o qual esta tese não teria sido possível. Pelas sugestões, críticas e apoio no decurso do trabalho.

Ao co-orientador científico, Professor João Luís Gaspar, cuja participação no sector da Vulcanologia dinamizou o projecto inicial.

Ao Centro de Modelização de Reservatórios Petrolíferos/Laboratório de Mineralurgia e Planeamento Mineiro onde o trabalho foi desenvolvido. A todos os elementos deste Centro/Laboratório, que contribuíram para a minha formação e que se disponibilizaram a ajudar-me. Em especial ao José António Almeida, por sugestões e apoio na resolução de problemas informáticos. À Maria João Pereira.

Aos elementos do Centro de Vulcanologia da Universidade dos Açores, pela resposta imediata sempre que solicitados.

Ao Instituto de Investigação Científica e Tropical em particular ao Fernando Costa, pelo tempo dispendido nas buscas bibliográficas e sugestões sobre o Fogo assim como pela cedência de dados em formato digital.

Ao Instituto Geológico e Mineiro, pela ausência a Cabo Verde em 1995. Ao Luís Martins, pelas facilidades concedidas na execução da tese. Aos colegas deste Instituto pela pronta disponibilidade, em especial ao Daniel Oliveira pelas conversões fotográficas e variações \*.dxf.

Ao Grupo da Física da Terra e do Ambiente, do Instituto Superior Técnico, entidade que proporcionou as observações *in situ* durante a erupção de 1995.

Ao Deptº. de Cooperação da Embaixada de Cabo Verde, pela facilidade na aquisição de credenciais e bibliografia cedida.

À Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica que financiou este projecto (BM/8771/96) e a edição desta tese.

A todas as pessoas que de algum modo contribuíram para a concretização deste trabalho.

À Maria Lídia e ao Zé Carlos, por tudo.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para avaliar o *hazard* e risco vulcânico inerente à instalação de escoadas lávicas com aplicação à ilha do Fogo, Cabo Verde.

Um modelo de simulação de fluxo de lava baseado em Autómatos Celulares é desenvolvido e implementado num Sistema de Informação Geográfica. As escoadas lávicas são visualizadas como um sistema dinâmico de células que evoluem no espaço, discretizado num Modelo Digital de Terreno com células de 15x15 m, e no tempo, de acordo com regras de transição estocásticas dependentes das propriedades físicas de cada célula e da sua relação espacial com as células vizinhas. As simulações são condicionadas à topografia, focos eruptivos, viscosidade empírica, taxa de efusão e volume total de lava. O modelo é aferido e calibrado com a erupção de 1995, usando um conjunto teste de simulações.

Pela análise da geomorfologia e história vulcanológica, focos eruptivos são seleccionados para geração de cenários *hazard*, usando condições semelhantes às da validação do modelo. Elementos sujeitos a *hazard* como ocupação potencial e actual de solos, infraestruturas e edificações são utilizados para avaliar o impacto que as escoadas lávicas poderão ter sobre o meio, elaborando cenários potenciais de risco.

## ABSTRACT

This work presents a methodology for hazard and volcanic risk assessment due to lava flows with application to Fogo Island, Cabo Verde.

A lava flow simulation model based on Cellular Automata is developed and implemented in a Geographic Information System. Lava flows are visualised as a dynamic system of cells that evolve in space, discretized in a Digital Terrain Model of 15x15 m, and time. Stochastic transition rules are used to establish lava flow transition amongst cells, dependent of physical properties of each cell and its spatial relationship with neighbour cells. Simulations are conditioned to topography, eruptive centres, empirical viscosity, effusion rate and total volume of lava. The model is validated and calibrated with 1995 eruption, using a set of simulation tests.

By geomorphologic analysis and volcanic history, eruptive centres are selected in the eastern side of the island for hazard scenarios using conditions similar to the validation of the model. Factors such as potential soil occupation, infrastructures and houses are used to evaluate the impact of lava flows, by the development of risk scenarios.

## PALAVRAS CHAVE

- *HAZARD* VULCÂNICO
- RISCO VULCÂNICO
- ESCOADAS LÁVICAS
- MODELO DE SIMULAÇÃO
- AUTÓMATOS CELULARES
- SIG

## KEY WORDS:

- VOLCANIC HAZARD
- VOLCANIC RISK
- LAVA FLOW
- SIMULATION MODEL
- CELLULAR AUTOMATA
- GIS

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Generalidades	2
1.2. <i>Hazard</i> e risco vulcânico	3
1.3. Predição vulcânica	4
1.4. Modelação de estilos eruptivos	7
1.5. Objectivo do trabalho	8
2. CASO DE ESTUDO: ILHA DO FOGO	11
2.1. Localização	12
2.2. Geomorfologia	12
2.3. História vulcanológica	15
2.3.1. Dados pré-históricos	15
2.3.2. Dados recentes	16
2.3.3. Tipologia eruptiva	22
2.4. População, infraestruturas básicas e recursos económicos	23
3. MODELAÇÃO DE FLUXO DE ESCOADAS LÁVICAS	27
3.1. Escoadas lávicas	28
3.2. Método de simulação por Autómatos Celulares (AC)	31
3.3. Simulação de fluxo de lava	35
3.4. Implementação do modelo de simulação	39
3.5. Avaliação da incerteza do fluxo de lava	47
3.6. Validação e calibração do modelo	49
4. ANÁLISE DE RISCO NO SECTOR LESTE DA ILHA	52
4.1. Escoadas lávicas como factor de risco	53
4.2. Selecção da área	54
4.3. Cenários vulcânicos	56
4.4. Cenários de risco	59
4.4.1. Elementos sujeitos a <i>hazard</i>	61
4.4.2. Desenvolvimento de cenários	62

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXOS	84
I. Distribuição populacional por idades na ilha do Fogo e pessoas por unidade de alojamento (fonte CENSOS90)	85
II. Sistema de abastecimento de água (fonte CENSOS90)	86
III. Energia utilizada em função do tipo de iluminação (fonte CENSOS90)	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Metodologia desenvolvida.	10
Figura 2.1. Traços morfológicos do Fogo evidenciados por mapa de declives (gerado a partir do MDT, 74.6% da ilha). MT-Monte Amarelo, M-Mosteiros, Bo-Bombardeiro, C-Chã das Caldeiras, B/B-Bordeira, P-Pico.	13
Figura 2.2. I) Erupções Históricas e Formações Encaixantes da ilha do Fogo Sector Leste (adaptado de Torres <i>et al.</i> , 1997). II) Áreas ocupadas por algumas escoadas lávicas baseado em I), extraídas de SIG.	17
Figura 2.3. Períodos de repouso na actividade vulcânica e características desta quando ocorre. Síntese de erupções baseada em Ribeiro (1960) e Torres <i>et al.</i> , (1997).	18
Figura 2.4. Aspectos da erupção de 1995. I) Fase havaiana com fontes de lava e formação de escoada lávica. II) Fase estromboliana. III) Aspecto do cone na vertente do Pico e a aldeia da Portela. IV) Cone em 1997.	21
Figura 3.1. Comportamento reológico de alguns tipos de materiais (adaptado de Chester <i>et al.</i> , 1985).	29
Figura 3.2. Aspecto das escoadas lávicas da erupção de Abril de 1995, Fogo. I) Aa, rugosas e aguçadas. II) Pahoehoe, superfícies lisas e arredondadas. III) Frente de lava aa, com avanço típico em bulldozer.	30
Figura 3.3. Evolução de um AC unidimensional num intervalo de tempo $t$ (adaptado de Wolfram, 1994).	33
Figura 3.4. Exemplo de probabilidades de transição de fluxo de lava e construção da função de distribuição cumulativa.	36
Figura 3.5. Mecanismo de evolução de um volume de lava nas células a partir de um foco eruptivo.	37
Figura 3.6. Fluxograma do programa VULCÃO.	38
Figura 3.7. Efeito da topografia nos mapas simulados. I) e II) Mesma simulação usando MDTs gerados por diferentes métodos de interpolação. III) e	43

IV) Mesma simulação com MDTs com diferentes dimensões de células.	
Figura 3.8. Relação entre volume de lava, por iteração e total, e número de iterações. Valores de I) a IV) expressos na Tabela 3.1.	44
Figura 3.9. Efeito do parâmetro de viscosidade empírica (S).	45
Figura 3.10. Simulações em diferentes focos eruptivos (extraídos de Torres <i>et al.</i> , 1995) distanciados 230 m.	45
Figura 3.11. Simulações com diferentes vizinhanças.	46
Figura 3.12. Mapas de probabilidades para diferentes espessuras de lavas.	48
Figura 3.13. Validação do modelo com dois dias da erupção de 1995. I) Mapa de probabilidades resultantes de imagens simuladas equiprováveis. II) Relação do modelo com a lava real.	51
Figura 4.1. Aspectos de risco das escoadas lávicas. I) Enterramento e recuperação de Cova Matinho (1951). II) Destruição de Boca Fonte (1995). III) Retirada de bens da Portela face à proximidade das escoadas lávicas (1995). IV) Estrada recuperada das escoadas lávicas de 1995.	54
Figura 4.2. Focos eruptivos seleccionados e relação com as erupções da ilha (adaptado de Torres <i>et al.</i> , 1997). <i>H1</i> , <i>H2</i> e <i>H6</i> são focos não reactivados.	57
Figura 4.3. Cenários vulcânicos <i>H</i> para escoadas lávicas no Sector Leste da ilha, calculados com mapeamentos de imagens médias em condições semelhantes às da validação do modelo (Figura 3.13.).	58
Figura 4.4. Mapa de aproveitamento potencial e actual de solos adaptado de Diniz & Matos (1987). Sector da Caldeira adaptado de Correia & Costa (1995).	63
Figura 4.5. Cenários de risco potencial <i>R</i> gerados pela sobreposição dos cenários <i>H</i> e rede viária, edificações e ocupação potencial e actual de solos (Figura 4.4.).	65
Figura 4.6. Previsão dos solos invadidos pelas cenários <i>H</i> . Cálculo de áreas e tipo de ocupação na Tabela 4.2.	67

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Tipos de <i>hazard</i> vulcânico e elementos de risco associados.	5
Tabela 3.1. Condições das simulações da Figura 3.8.	41
Tabela 3.2. Parâmetros usados na aferição do modelo.	50
Tabela 4.1. Áreas e número de pessoas afectadas por potenciais escoadas lávicas (Figura 4.3.).	66
Tabela 4.2. Solos ocupados pelas escoadas lávicas em função de cenários vulcânicos <i>H</i> .	68

---

## 1. INTRODUÇÃO

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. GENERALIDADES

Certas regiões do globo, pelas suas características geológicas, vulcanológicas e geodinâmicas, apresentam uma probabilidade elevada de ocorrência de fenómenos vulcânicos. Neste caso, é necessário utilizar estratégias conducentes a minimizar os efeitos resultantes do desenvolvimento destes fenómenos e definir o tipo de gestão a ter no decurso da sua instalação. Assim, o estudo a desenvolver numa região sujeita a eventos desta natureza, deve ter em linha de conta diversos parâmetros, uns de carácter especificamente técnico-científicos, outros sócio-económicos, conduzindo a uma interacção de diferentes elementos.

Nos aspectos técnico-científicos há a considerar:

- ESTUDOS PRÉVIOS  
Análise do sistema vulcânico para definir a tipologia eruptiva, com recurso essencialmente a registos geológicos e históricos.
- ESTUDOS DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO
  - Monitorização da área de modo a determinar estados pré-eruptivos.
  - Modelação de estilos eruptivos para previsão de futuras áreas a serem afectadas.

Nos aspectos sócio-económicos é importante caracterizar a população e parque habitacional, infraestruturas básicas, recursos económicos, assim como avaliar a disponibilidade de meios humanos e materiais para fazer face à ocorrência de fenómenos vulcânicos.

## 1.2. HAZARD E RISCO VULCÂNICO

Em qualquer região com vulcanismo activo (Baker, 1979, Crandell *et al.*, 1984) há possibilidade de que fenómenos vulcânicos ocorram num certo intervalo de tempo e numa certa área. Esta possibilidade designa-se por *hazard*<sup>1</sup> vulcânico (Tabela 1.1., coluna 1), devendo os fenómenos ser avaliados tendo em conta a sua magnitude, extensão, duração e probabilidade de ocorrência.

Se ao resultado do *hazard* se associar uma medida de perda obtém-se o risco vulcânico, que é a possibilidade de perda, dentro de uma área sujeita a *hazard* vulcânico, e que depende de três factores (Fournier d'Albe, 1979, Tilling, 1989):

$$\text{RISCO} = (\text{VALOR}) * (\text{VULNERABILIDADE}) * (\text{HAZARD}) \quad (1.1.)$$

onde VALOR inclui o número de vidas ameaçadas, infraestruturas, trabalhos civis e capacidade produtiva e VULNERABILIDADE é a proporção do valor com probabilidade de ser perdido num determinado evento *hazard*.

Assim, enquanto que o *hazard* vulcânico é sempre uma potencialidade nas condições acima referidas, o risco pode ou não estar presente. Por exemplo, numa região remota, desabitada, sem valor económico ou património cultural o risco é nulo.

Para Ortiz (1996), o risco é considerado como uma função probabilística e é definido pelo produto seguinte:

$$\text{RISCO} = (\text{EXPOSIÇÃO}) * (\text{VULNERABILIDADE}) * (\text{HAZARD}) \quad (1.2.)$$

onde EXPOSIÇÃO constitui os elementos sujeitos aos eventos.

---

<sup>1</sup> A tradução mais correcta para este termo parece ser *perigo*, à semelhança do termo *peligro* adoptado pelos autores de língua castelhana. Contudo, não se encontra suficientemente divulgado e a sua utilização pode tornar-se confusa. É assim mantido o termo original anglo-saxónico.

Por este processo é necessário obter o *hazard* e a vulnerabilidade em cada ponto da zona de estudo.

Um processo de mitigar o risco de uma área, dados os parâmetros de (1.1.), consiste na introdução do factor capacidade de resposta não nula (De La Cruz-Reyna, 1996):

$$\text{RISCO} = \frac{(\text{VALOR}) * (\text{VULNERABILIDADE}) * (\text{HAZARD})}{\text{CAPACIDADE DE RESPOSTA}} \quad (1.3)$$

Como exemplo, relativamente às escoadas lávicas, a construção de diques envolvendo áreas habitacionais (Chester *et al.*, 1985) ou canais para escoamento de lava diminui o risco, mantendo todos os outros parâmetros constantes. Uso de água e explosivos poderá ter idêntico efeito mitigador do risco (Tiedmann, 1992, Le Guern, 1997).

A actividade vulcânica caracteriza-se por diferentes estilos eruptivos, a cada qual está associado um *hazard* diverso, causando danos e originando perdas humanas com graus variáveis (Tabela 1.1.). Por outro lado, variações nas características da actividade vulcânica podem conduzir à ocorrência de diferentes *hazards* no decurso de uma única erupção.

Para uma análise de risco é necessário conhecer os atributos e dinâmica dos vários *hazards*, no caso em estudo das escoadas lávicas, assim como o tipo de danos que causam.

### 1.3. PREDIÇÃO VULCÂNICA

Face ao *hazard*, a predição vulcânica no tempo constitui a chave para maximizar as condições vantajosas de uma região vulcânica e minimizar os danos decorrentes da instalação dos produtos vulcânicos (Chester, 1993). Para se prever um dado evento

vulcânico, dois tipos de abordagem são possíveis, uma predição geral, baseada essencialmente em métodos geológicos e históricos, e uma predição específica, recorrendo a técnicas geofísicas, geodésicas e geoquímicas.

Tabela 1.1. Tipos de *hazard* vulcânico e elementos de risco associados.

HAZARD	DANOS (adaptado de NLA, 1992 modificado <i>in</i> Ortiz, 1996)*	Nº TOTAL DE MORTES (%) 1900-1986 (adaptado de Blong, 1996) <sup>1</sup>
Escoadas lávicas e domas	Danos a estruturas. Incêndios. Cobertura de terrenos*	0.11
Piroclastos de trajectória balística.	Danos por impacto. Incêndio.*	
Piroclastos de queda	Cobertura de cinzas. Colapso de estruturas. Danos à agricultura e instalações industriais. Problemas no tráfego aéreo. Falta de visibilidade.*	4.81
Escoadas piroclásticas	Danos a estruturas. Incêndios. Cobertura por cinzas*.	50.52
Surges	Danos a estruturas. Incêndios. Cobertura por cinzas.*	Não determinado especificamente
Lahars	Danos a estruturas. Arraste de materiais. Cobertura por lamas.*	41.61
Gases vulcânicos	Contaminação do ar e da água*	2.73 inclui chuvas ácidas
Sísmos vulcanogénicos	Colapso do edifício vulcânico. Deslizamento de massas. Danos a estruturas*	0.04
Fenómenos de instabilidade	Colapso do edifício vulcânico. Deslizamento de massas. Falhas. Danos a estruturas.	Não determinado especificamente
Tsunamis	Danos a estruturas.	0.18

A reconstituição da história eruptiva de um vulcão através do registo geológico e histórico, permite estabelecer a frequência, magnitude e estilos eruptivos que poderão ocorrer. Com base nesta análise é possível definir medidas de modo a mitigar os seus efeitos, assim como avaliar a vulnerabilidade a longo termo das diferentes áreas do vulcão e permitir um planeamento adequado no ordenamento territorial e planos municipais de emergência. Fundamentalmente, são estes os objectivos da predição geral (Walker, 1974, Chester *et al.*, 1985).

<sup>1</sup>Recalculadas as percentagens após exclusão de 6.6% atribuídos a causas desconhecidas e indirectas.

Deste tipo de abordagem resulta a elaboração de mapas de carácter diverso: *hazard* e risco, vulcanológicos, administrativos e educacionais. Nos primeiros há a ressaltar alguns factores no mapeamento como a densidade de crateras, áreas topograficamente protegidas, extensão máxima e áreas ocupadas por lavas conhecidas (Chester, 1993, Ortiz, 1996).

Nos mapas de risco definem-se zonas por graus, estabelecidos em função do valor e da propriedade (Secção 1.1.), e factores associados à evacuação da população (Crandell, 1984, Chester, 1993).

A predição específica consiste na monitorização rotineira de um vulcão, usando técnicas geofísicas, geodésicas e geoquímicas, que definem os parâmetros que caracterizam o seu estado de repouso e que permitem detectar eventuais alterações a esse estado.

Outro tipo de mapeamento consiste na geração de cenários vulcânicos para determinados eventos eruptivos, mediante simulações numéricas (Secção 1.4.) ou simplesmente transpondo uma erupção ocorrida no passado para o momento actual (Felpeto *et al.*, 1996). Estes mapas são dinâmicos, ultrapassando o problema dos mapas tradicionais estáticos (Alexander, 1993), e revelam a sua importância quer na definição antecipada de planos de emergência, quer no acompanhamento e actualização de uma erupção em curso.

Como alternativa aos mapas de risco tradicionais, podem associar-se cenários vulcânicos a elementos a eles sujeitos (Equação 1.2.) para se obterem cenários potenciais de risco.

#### 1.4. MODELAÇÃO DE ESTILOS ERUPTIVOS

Com a modelação de estilos eruptivos, efusivos ou explosivos, pretende-se a descrição quantitativa do magma durante o seu movimento e a predição das áreas a serem invadidas pelo *hazard* considerado. Este é um terceiro tipo de abordagem paralelo aos outros dois da predição vulcânica (Secção 1.3.) e que se combina com os mesmos (Fernández, 1997). Com efeito, ao adquirir conhecimentos sobre um sistema real complexo, quer sobre as suas componentes quer sobre as suas características operacionais, torna-se possível a visualização e estimação de prováveis cenários vulcânicos.

Relativamente ao estilo efusivo, as escoadas lávicas são entidades caracterizadas por um comportamento fortemente não linear devido às propriedades reológicas do magma (Chester *et al.*, 1985, Felpeto *et al.*, 1996, Fernández, 1997, Macedonio, *in press*). Além desta variabilidade intrínseca, outros efeitos a que as escoadas lávicas estão sujeitas resultam de uma topografia irregular e a sua mudança no decorrer da erupção, assim como variações na taxa de efusão que podem afectar todo o campo de lava.

Pelas características referidas a modelação de fluxo de lava é uma tarefa complexa. Os modelos disponíveis descrevem apenas parte dos fenómenos envolvidos no decurso da sua instalação e enquadram-se usualmente em dois tipos de abordagem:

- i) Modelos baseados na resolução de equações de transporte (Dragoni *et al.*, 1986, Dragoni, 1989, Baloga & Pieri, 1986, Crisp & Baloga, 1990, Park & Iversen, 1984, Macedonio, 1994).
- ii) Modelos baseados na discretização do espaço em células simplificando-se as relações dinâmicas do fluido nessas células (Crisci *et al.*, 1982, 1986, Ishihara *et al.*, 1990, Macedonio, 1990, Barca *et al.*, 1987, 1993, 1994, Young & Wadge, 1990, Wadge *et al.*, 1994, Crisci *et al.*, 1982, 1986, Miyamoto & Sasaki, 1997).

Os modelos do tipo *i*) são válidos para a descrição do comportamento das escoadas para curtas distâncias enquanto que os do tipo *ii*), probabilísticos, são mais eficazes para analisar todo o campo de lava (Macedonio, *in press*). Os modelos do tipo *ii*) recorrem a soluções numéricas usando simulações tendo por base um modelo conceptual da reprodução dos sistemas de escoamento. Dentro destes, os Autómatos Celulares (AC) são idealizações matemáticas de sistemas físicos nos quais o espaço e o tempo são discretizados e as quantidades físicas tomam um conjunto discreto de valores finitos (Wolfram, 1984, Boghosian, 1990, Weisbuch, 1994).

As escoadas lávicas são visualizadas como um sistema dinâmico variando no espaço e no tempo e que evolui em passos discretos de tempo com regras de transição que dependem exclusivamente do estado da célula de onde se propaga o fluxo e das células na sua vizinhança.

## 1.5. OBJECTIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem por objectivo a criação de um modelo de avaliação de *hazard* e risco vulcânico, pela implementação de um modelo de simulação de fluxo de lava a partir do formalismo dos Autómatos Celulares (AC). Este modelo é implementado num Sistema de Informação Geográfica (SIG)<sup>1</sup>, e compreende as seguintes etapas básicas:

- i*) Geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT)<sup>2</sup>
- ii*) Conhecimento do sistema eruptivo da região para selecção de potenciais focos eruptivos.

<sup>1</sup> Sistema de armazenamento, organização e edição de informação espacialmente referenciada (ESRI, 1992, Burrough, 1996).

<sup>2</sup> Representação digital de uma variável contínua em torno de uma superfície bidimensional por uma rede regular de valores de *z*, referenciados a um *datum* comum.

- iii) Desenvolvimento, implementação, validação e calibração do modelo de simulação de fluxo de lava segundo o método dos AC numa área-teste e simulação de imagens equiprováveis.
- iv) Geração de cenários vulcânicos em focos eruptivos seleccionados, *ii*), baseados no cálculo de *hazard* probabilístico com condições semelhantes a *iii*).
- v) Incorporação em SIG de elementos sujeitos a *hazard*, nomeadamente população, estruturas habitacionais, elementos estratégicos e mapa de aproveitamento potencial e actual de solos, para elaborar cenários potenciais de risco a partir de cenários vulcânicos, *iv*).

Esta metodologia (Figura 1.1.) é aplicada à ilha do Fogo, Cabo Verde, correspondendo a área-teste à erupção de 1995.

Em síntese, este trabalho inicia-se por este capítulo onde se contextualiza o tema de estudo. No capítulo 2 caracteriza-se o caso de estudo, a ilha do Fogo, sob o ponto de vista geomorfológico e história vulcanológica, definindo-se a tipologia eruptiva. Alguns aspectos importantes para a análise de risco sobre infraestruturas básicas, população e recursos económicos são referidos.

No capítulo 3 caracterizam-se as escoadas lávicas e desenvolve-se o modelo de simulação de fluxo de lava por AC, implementando-o numa área teste e explorando as potencialidades dos parâmetros. O modelo é validado após calibração com dois dias da erupção de 1995 e obtém-se um mapa de *hazard* probabilístico baseado em 10 simulações. A avaliação da incerteza do fluxo de lava é considerada.

No capítulo 4 o modelo validado é aplicado ao sector leste da ilha, seleccionado por parâmetros definidos no capítulo 2, gerando cenários vulcânicos. Elementos como população, edificações e ocupação potencial e actual de solos entram em linha de conta para elaboração de cenários potenciais de risco.

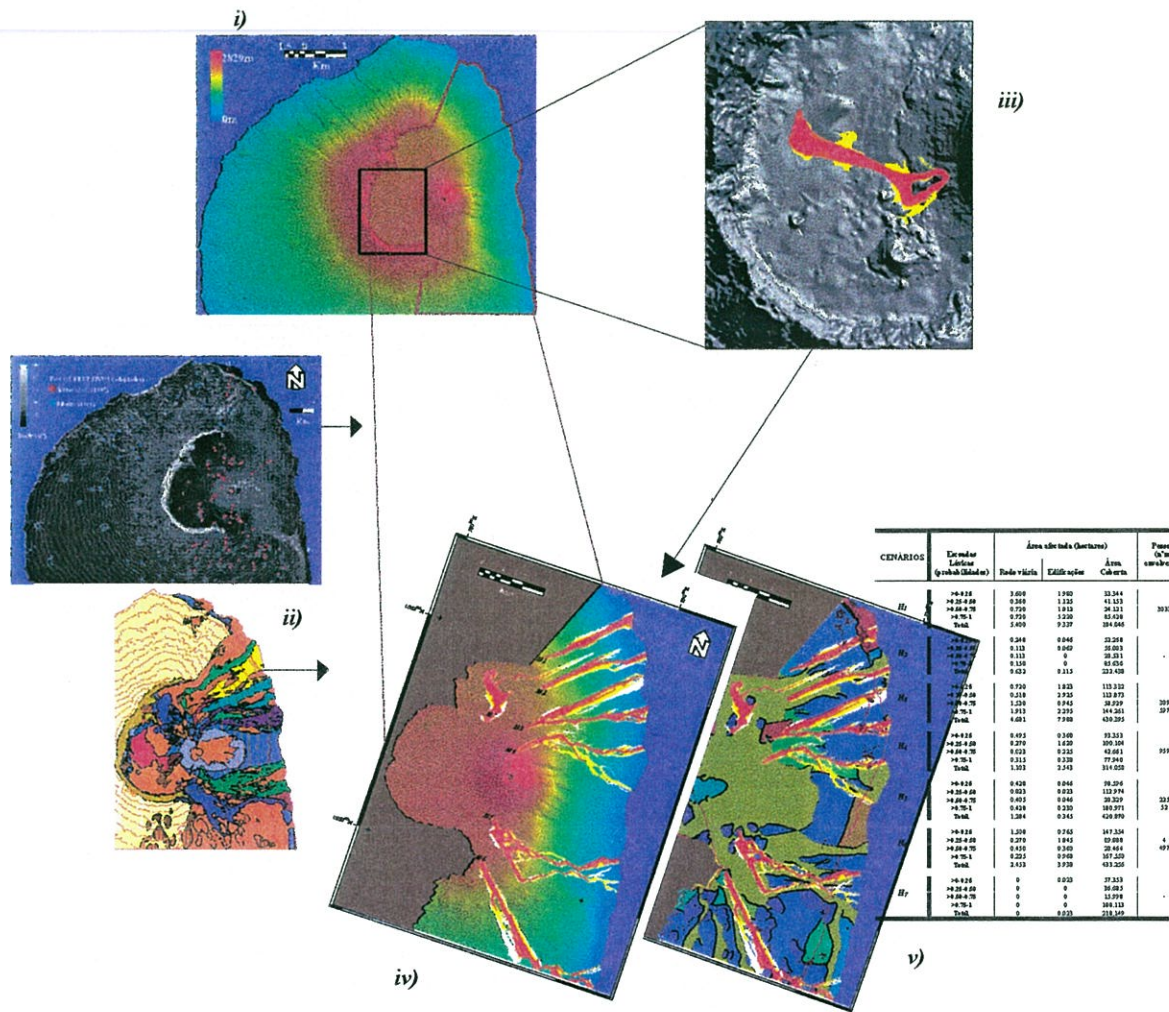


Figura 1.1. Metodologia desenvolvida.

Por último, no capítulo 5 tecem-se algumas considerações finais sobre o trabalho.

---

## **2. CASO DE ESTUDO: ILHA DO FOGO**

## 2. CASO DE ESTUDO: ILHA DO FOGO

### 2.1. LOCALIZAÇÃO

O Fogo é uma das ilhas de Sotavento do arquipélago de Cabo Verde, com as seguintes coordenadas no seu ponto mais alto, Pico: 785251E e 1654225N (quadrícula principal quilométrica UTM, Fuso 26 E.I., Datum - Ponto Alto do Sul).

Situado na placa africana, este arquipélago dista aproximadamente 2000 km da Crista Média Atlântica e cerca de 500 km da costa ocidental africana, na direcção do Senegal e do promontório africano de onde lhe veio o nome.

### 2.2. GEOMORFOLOGIA

A ilha do Fogo resulta da edificação de um sistema vulcânico dominado por um vulcão central poligenético, com 6-7 km desde as profundidades abissais até ao topo emerso. Este último sector compreende cerca de 3 km, com uma área de 476 km<sup>2</sup>. Aproximadamente a 1700 m acima do nível do mar apresenta o seu traço mais marcante: uma caldeira com 8 km de diâmetro, em hemiciclo, cuja parede, Bordeira (B), a W atinge cerca de 1000 m acima da sua base (Figura 2.1.). O seu interior, Chã das Caldeiras (C), é marcado por um cone poligenético, Pico (P), 2829 m. Vários cones secundários, a maioria com alturas inferiores a 100 m, encontram-se dispersos por toda a ilha.

Em relação ao Pico, a encosta desce progressivamente e de forma abrupta até ao litoral no sector E, delineando-se uma rampa de escorregamento gravítico, na sequência do hemiciclo da Caldeira (C) e mais evidenciada a sul (Figura 2.2) já referida por Brum da Silveira *et al.*, (1997b). Para W, o declive é bastante mais suave, tornando-se mais

abrupto para altitudes superiores a 1200 m até ao limite da Caldeira. O declive do terreno para W e S, na zona externa da Caldeira, é menos acentuado do que para N e E.

A Caldeira é uma área aplanada no limite da qual o terreno sobe em escarpa a formar o hemiciclo referido, sugerindo alguns autores (Brum da Silveira *et al.*, 1997b) que constitui uma estrutura composta resultante de dois colapsos originando caldeiras embutidas e descentradas. Ao suposto espigão resultante da intersecção destas duas caldeiras, Monte Amarelo (MT), Day *et al.*, (*in press*) interpretam como o remanescente do cone ancestral ante-formação da caldeira.

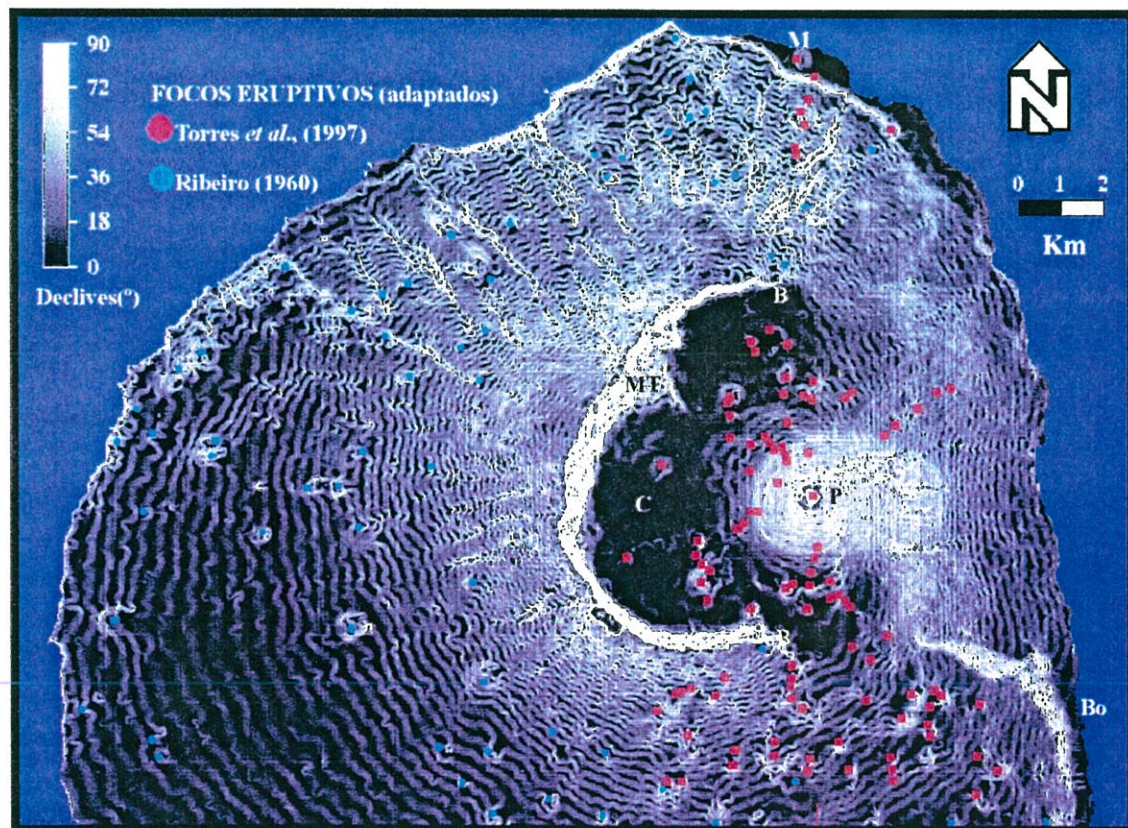


Figura 2.1. Traços morfológicos do Fogo evidenciados por mapa de declives (gerado a partir do MDT, 74,6% da ilha). MT-Monte Amarelo, M-Mosteiros, Bo-Bombardo, C-Chã das Caldeiras, B/B-Bordeira, P-Pico.

Com uma linha de costa em geral abrupta, duas excepções correspondem ao sector que compreende Mosteiros (M, a NNE) e Bombardeiro (Bo, a SE), com superfícies aplanadas desenhadas por escoadas lávicas (Figura 2.1.). Também a NW está presente uma destas superfícies (Day *et al.*, *in press*), de menores dimensões.

As linhas de água consistem em inúmeros cursos, desenvolvidos em regime torrencial, sendo praticamente inexistente a presença de água para além do escoamento durante a época das chuvas. A tendência é para o seu desenvolvimento ser radial à Bordeira, tendo um encaixe mais pronunciado no sector N onde a pluviosidade é mais elevada.

Uma falha de direcção N-S coincidente com os limites da Bordeira, já descrita por Bebiano (1932) como uma das direcções estruturais do arquipélago, é referida por vários autores (Machado, 1965, Heleno da Silva *et al.*, 1997, Brum da Silveira *et al.*, 1997a, b) embora sem evidências sismológicas (Pereira & Burton, 1997). Outros lineamentos e falhas indicam como direcções estruturais NW-SE a WNW-ESE, NNE-SSW (Klerkx & De Paepe, 1971, De Paepe *et al.*, 1974, Dash *et al.*, 1976, Williams *et al.*, 1990, Heleno da Silva *et al.*, 1997, Pereira & Burton, 1997, Brum da Silveira *et al.*, 1997a, b). No mapa de declives (Figura 2.1.), à equidistância de 50 m das curvas de nível detecta-se a direcção NW-SE e um esboço a NE da direcção NNE-SSW.

Relativamente a alinhamentos de cones as direcções N-S e  $\cong$  NE-SW são as mais evidentes no sector E, parecendo haver uma orientação concêntrica em relação ao edifício vulcânico do Fogo na restante área. A W de Monte Amarelo, a direcção NW é marcada por um alinhamento de 4 cones. Para Brum da Silveira *et al.*, (1997a), baseados em fotografia aérea, a distribuição de cones está em relação directa com a fracturação radial do grande edifício vulcânico e também concêntrica subordinada.

O estudo de densidade de centros eruptivos (Fernández, 1997), um parâmetro importante que caracteriza áreas de menor espessura crustal mais propícias ao desenvolvimento da actividade eruptiva, não foi calculada pelo facto de os focos eruptivos assinalados terem sido extraídos a escalas bastante diferentes (1:250 000

Ribeiro, 1960, 1:62 500 Torres *et al.*, 1997). A utilização de fotografia aérea poderá obviar este obstáculo.

### 2.3. HISTÓRIA VULCANOLÓGICA

O vulcanismo desenvolvido em Cabo Verde desde o Cretácico até aos tempos históricos terá sido induzido pela formação de fracturas E-W resultantes ou fortemente relacionadas com o *uplift* de um *rift* oceânico N-S (Klerkx & De Paepe, 1971, De Paepe *et al.*, 1974). O magma ascenderia passivamente ao longo destas linhas pré-existentes de fraqueza estrutural, opinião idêntica à de Williams *et al.*, (1990), variando apenas ligeiramente para estes os azimutes das fracturas (100-110°) já com o acréscimo de dados magnéticos e de reflexão sísmica.

Courtney & White (1986) dão ênfase a uma interpretação de pluma mantélica ou *hot-spot*, baseados em medições de fluxo térmico, opinião igualmente partilhada por outros (Gerlach *et al.*, 1988, Davies *et al.*, 1989), localizando actualmente esta pluma a S da ilha do Fogo. Torres *et al.*, (1998) centram-na em Fogo-Brava.

#### 2.3.1. DADOS PRÉ-HISTÓRICOS

O edifício vulcânico do Fogo é constituído essencialmente por escoadas basálticas subsaturadas intercaladas por leitos piroclásticos que sobrejazzem um complexo carbonatítico, recortado por um sistema filoniano de rochas alcalinas denominado Complexo Antigo (Machado & Assunção, 1965).

Eventos maiores, que levaram à formação da Caldeira (p. 13), diferenciam dois sistemas eruptivos distintos, lavas e cones anteriores à sua formação, Complexo Eruptivo Principal (CEP), e posteriores ou Lavas Recentes (LR). Composicionalmente

semelhantes, apresentam algumas variações texturais e mineralógicas, com basanitos e limburgitos em CEP e nefelinitos e lavas afins em LR (Machado & Assunção, 1965).

CEP apresenta variações entre a base e o topo, sendo a primeira predominantemente efusiva com extensos mantos de escoadas fluidas, em geral com inclinações de 20-30°, com valores mais elevados em certas áreas da zona N, que intercalam com leitos finos de piroclastos. Para o topo domina o carácter explosivo, com piroclastos grosseiros, tufos e *lapilli*, com raras intercalações lávicas e consequentemente declives mais elevados (Ribeiro, 1960, Barmen *et al.*, 1990). Estes últimos consideram o topo desta unidade como outra unidade distinta. A distribuição de CEP domina a ilha não aflorando na zona E, onde LR ocupa essencialmente o interior da Caldeira e a vertente até ao oceano (Figura 2.2.).

O arquipélago de Cabo Verde posiciona-se numa crosta oceânica Mesozóica com idades compreendidas entre 105 e 155 Ma (William *et al.*, 1990), sendo as datações fossilíferas mais antigas do arquipélago, na ilha de Maio, do Jurássico Superior à base do Cretácico (Serralheiro, 1970). É provável que as erupções neste arquipélago tivessem inicialmente ocorrido no Cretácico Superior, atingindo o apogeu no período pós-Eocénico e se prolongassem até ao Quaternário (Bebiano, 1932). Torres *et al.*, (1988) atribuem uma idade de 30 Ma para a pluma mantélica invadir a base da litosfera, sob a ilha de Maio. Estas datações podem dar uma ideia aproximada da idade do Fogo, não se encontrando outros dados que evidenciem o tempo de actuação destes sistemas eruptivos, nomeadamente episódios de formação da Caldeira.

### 2.3.2. DADOS RECENTES

Desde a sua descoberta e povoamento no século XV há registos históricos de actividade vulcânica no Fogo. O número de eventos ocorridos posiciona esta ilha num *hazard* vulcânico imediato ou de alta frequência, uma vez que a ocorrência é superior a mais do que uma vez por século (Figura 2.3.).

LEGENDA GEOLÓGICA

- Dep. vertente
- Dep. aluvionares/enxurrada
- Produtos explosivos
- Produtos efusivos
  - 1995
  - 1951
  - 1857
  - 1852
  - 1847
  - 1816
  - 1799
  - 1785
  - 1769
  - 1721-1725
  - 1664
- Erupções pré-históricas e históricas do Pico não identificadas
- Formações pré Caldeira
- Bordeira

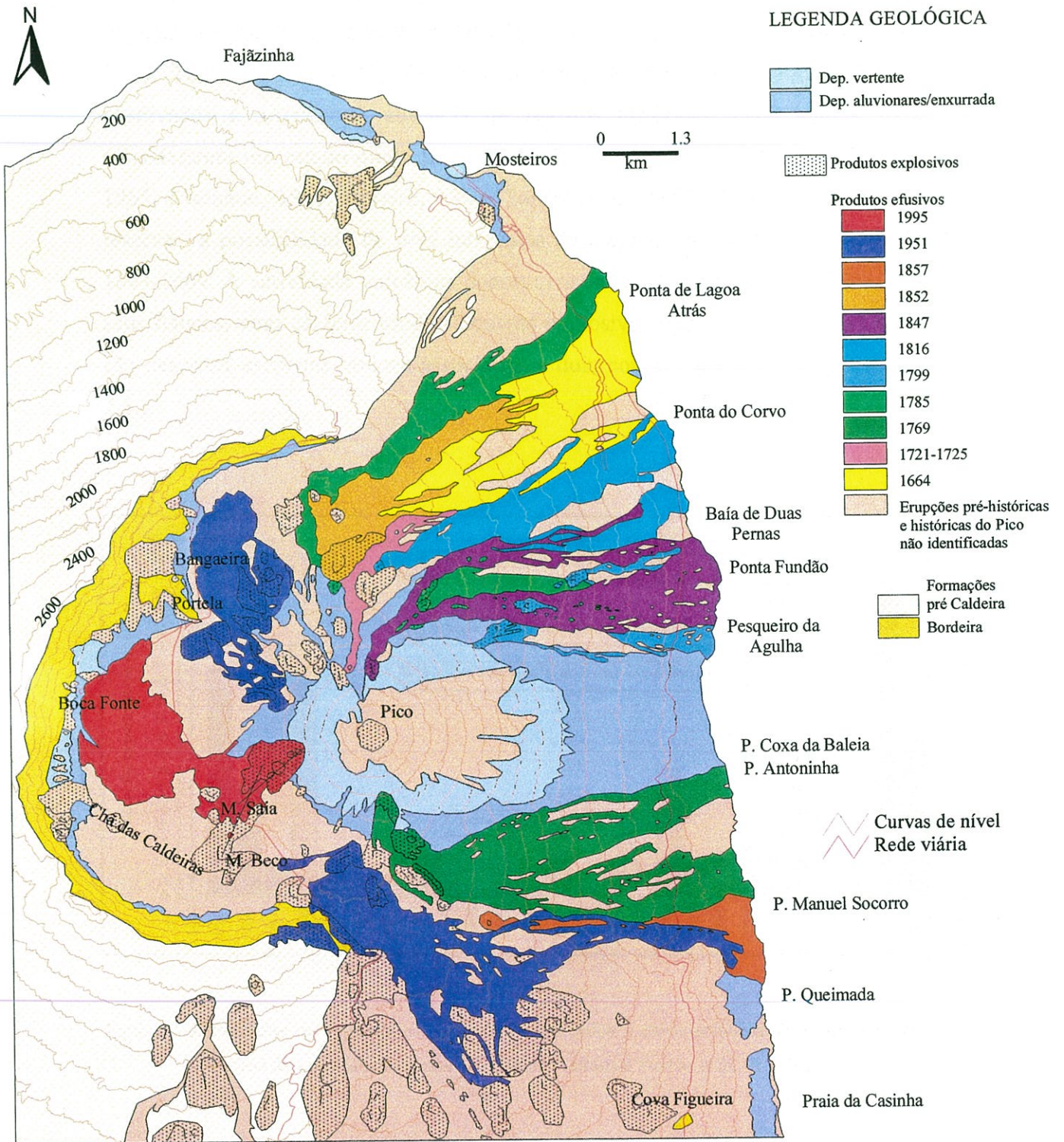


Figura 2.2.I) Erupções Históricas e Formações Encaixantes da ilha do Fogo - Sector Leste (adaptado de Torres *et al.*, 1997).



2.2.II) Áreas ocupadas por algumas escoadas lávicas baseado em I), extraídas de SIG.

No século XVI e XVII as informações são escassas e os eventos registados reportam-se por vezes somente à data de observação por navios em trânsito (Ribeiro, 1960, Torres *et al.*, 1997). O curto intervalo de tempo entre alguns dos eventos observados e a eventual ausência de registos históricos levou alguns autores a considerarem um estado quase permanente de erupção na ilha (Machado & Assunção, 1965, Machado, 1965, Ribeiro, 1960, Torres *et al.*, 1997). Ribeiro (1960) põe, com reservas, a possibilidade de dois intervalos de recorrência longos, entre 1500-1564 e 1604-1664. A actividade vulcânica desenvolveu-se no cone principal, o Pico, e/ou nos seus flancos, com carácter moderadamente explosivo. Apenas para a erupção de 1664 são descritas escoadas lávicas associadas a dois cones, além do Pico (Figuras 2.2. e 2.3.).

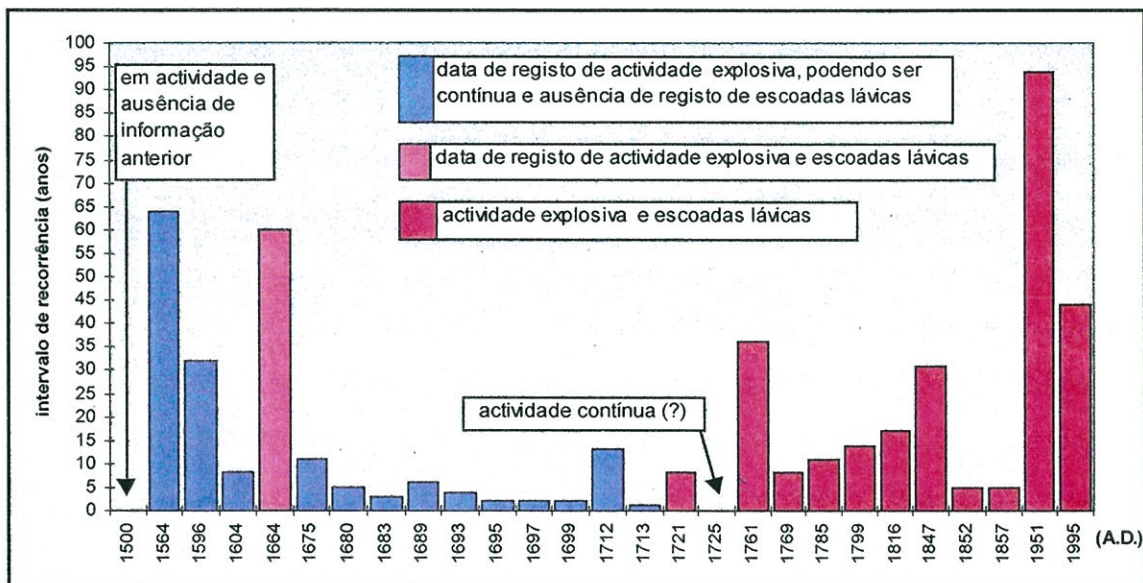


Figura 2.3. Períodos de repouso na actividade vulcânica e características desta quando ocorre. Síntese de erupções baseada em Ribeiro (1960) e Torres *et al.*, (1997a).

A partir do século XVIII a probabilidade de hiatos históricos é mais remota, embora se mantenham várias reservas relativamente a alguns dos eventos registados, por imprecisões ou lacunas, sendo ainda algumas das observações feitas por leigos na matéria. No princípio do século, os eventos de 1712 e 1713 podem eventualmente corresponder a um mesmo episódio vulcânico. Essa dúvida é extrapolável ao período

decorrente entre 1721 e 1725, para o qual apesar de haver uma descrição mais pormenorizada dos eventos vulcânicos, é omissa em relação à continuidade da erupção. Após o maior intervalo de repouso neste século, trinta e seis anos, ocorre uma erupção em 1761, seguido de duas erupções fracamente espaçadas.

No século XVIII, excluindo a erupção de 1712(?)1713 que só regista actividade explosiva, todos os outros eventos têm carácter explosivo e efusivo, deixando o Pico de ser o principal emissor a partir de 1721(?)1725, transferindo-se definitivamente para cones adventícios deste, para a Chã das Caldeiras ou encosta E, ocorrendo como episódios bem individualizados (Figura 2.2.). Na erupção de 1785 ainda ocorrerá alguma actividade menor no Pico, provavelmente fumarólica.

No século XIX ocorrem quatro erupções correspondendo o maior intervalo de repouso a trinta e um anos.

A entrada no século XX marca o maior intervalo de recorrência registado no Fogo, noventa e quatro anos, seguido por duas erupções, a de 1951 e 1995.

A erupção de 1951 caracterizou-se por actividade explosiva e desenvolvimento de dois campos lávicos (Figura 2.2.), tendo-se iniciado no campo eruptivo meridional e irrompendo uma hora depois no campo eruptivo setentrional próximo das povoações de Portela e Bangaeira. Este último sector, NW, funcionou apenas durante um dia. O campo meridional funcionou com vários focos eruptivos, com actividade explosiva e efusiva simultâneas ou alternantes.

A síntese que se segue da erupção de 1995 é baseada em vários autores (Gaspar *et al.*, 1995a, b, Wallenstein *et al.*, 1997, Torres *et al.*, 1995, 1997b, Madeira *et al.*, 1995, 1997) e de algumas observações de campo realizadas no período de 8 a 30 de Abril:

- 2-4 Abril - Dois sismos de intensidade V (MMI) precederam em algumas horas o início da erupção com a formação de uma coluna eruptiva com cerca de 4 km, localizada numa fissura com direcção N30°E (Figura 2.2.) com cerca de 2 km de

extensão. Nesta fissura surgiram vários focos eruptivos concentrados no sector SW em número variável (2, 3 e 7) e que posteriormente migraram de SW para NE até se centrarem num antigo cone eruptivo. As fontes de lava que atingiam cerca de 400 m alimentaram escoadas lávicas tipo *aa* (Secção 3.1.) que percorreram cerca de 2 km nas primeiras 24 horas, seguindo inicialmente uma direcção de NE para SW, inflectindo depois para NW. A 4 as lavas tinham já avançado cerca de 3 km e coberto uma área de 0.86 km<sup>2</sup> (Figura 3.7), estimando-se um volume de 2.6 a 5.2x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

- ...-11 Abril - Coluna eruptiva atingiu entre 2 e 5 km desenvolvendo por acumulação de piroclastos e *spatter* de fontes lávicas o cone pré-existente. A 8 as escoadas lávicas atingiam a parede da caldeira, destruindo dez casas em Boca Fonte e fechando a estrada. A 9 o reservatório de água é destruído e ocorre rotura no flanco SW do cone aumentando consideravelmente a taxa de efusão. A frente de lava torna-se bastante activa com digitações várias entre Monte Beco e Monte Saia e na proximidade da cratera as velocidades atingiam 5-6 ms<sup>-1</sup>. A 11 de Abril a área ocupada era da ordem dos 2.7 km<sup>2</sup> com uma produção de 16 a 27x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de lava.
- 12-19 Abril - Dá-se a paragem das escoadas lávicas para SW, continuando as lavas a aumentar a frente das escoadas lávicas *aa* para W, que atingiam espessuras da ordem dos 10 m. A 17 a cooperativa de vinhos em Boca Fonte é destruída (Figura 4.1.II.) e há emissões no foco principal que originam lavas *aa* que avançam sobre as anteriores. A 19 dá-se um decréscimo significativo na actividade explosiva terminando a fase havaiana da erupção passando a evidenciar-se características estrombolianas (Figura 2.4.II.).  
Dá-se a paragem de todas as frentes lávicas, deixando de se observar desenvolvimento de rios de lava a partir do cone principal.
- ...-23 Abril - origina-se novo foco eruptivo sensivelmente a meia encosta do flanco W do cone de escórias com desenvolvimento de escoadas *pahoehoe* (Secção 3.1.) que progrediram para W, sobre os mantos lávicos das escoadas *aa*. A W do Monte Saia as escoadas *pahoehoe* passaram a fluir lateralmente, envolvendo as margens das *aa* a N e a S.

- ....Maio - Deu-se um incremento da actividade efusiva, formando dois ramos distintos, um entre o Monte Saia e Boca Fonte, outro a N formando as escoadas *pahoehoe* em frente ao povoado da Portela.
- ...26 Maio- deu-se a imobilização de todas as frentes lávicas, não chegando a atingir o povoado de Portela. A actividade fumarólica prosseguiu na área do cone principal mostrando ainda alguns vestígios em Outubro de 1997 (Figura 2.4.IV.)

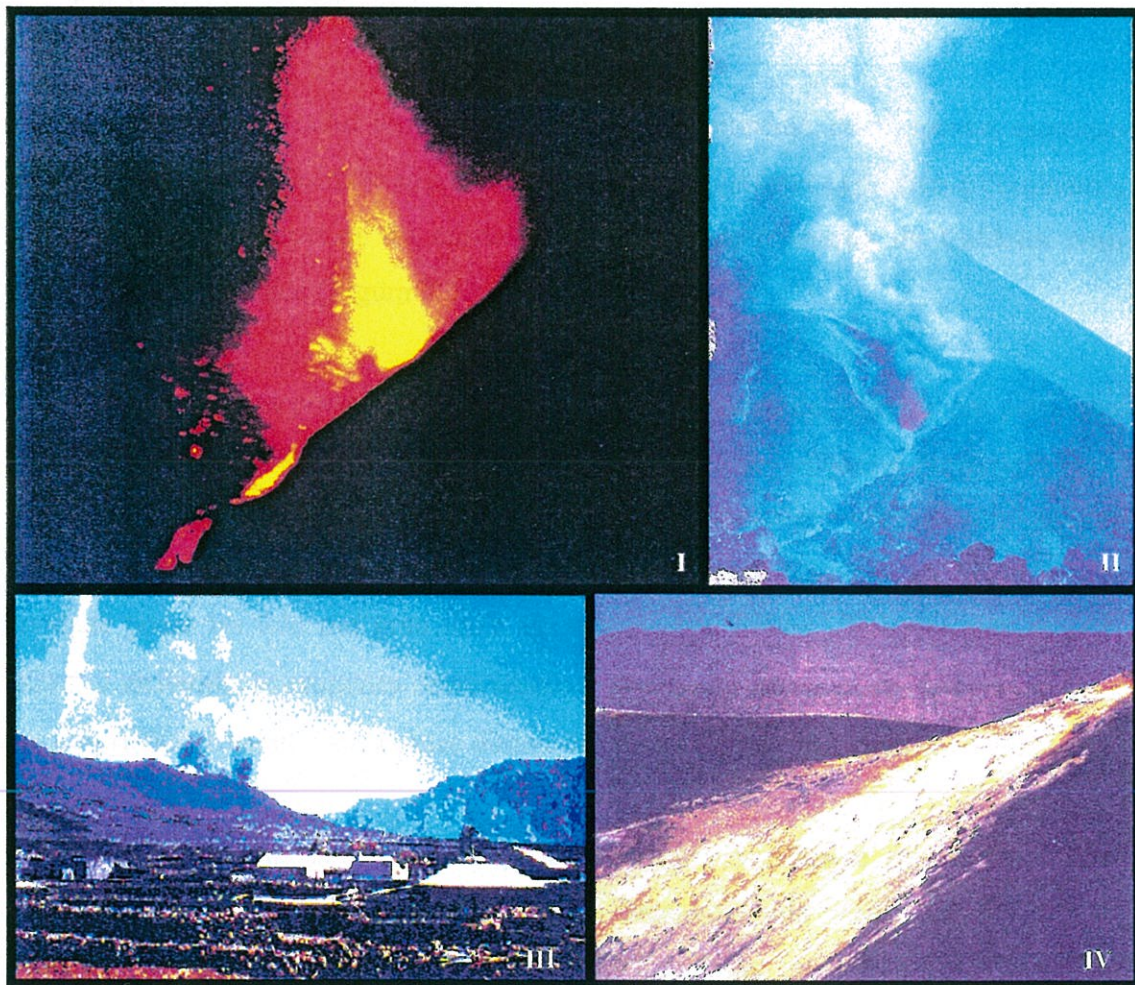


Figura 2.4. Aspectos da erupção de 1995. I) Fase havaiana com fontes de lava e formação de escoada lávica. II) Fase estromboliana. III) Aspecto do cone na vertente do Pico e a aldeia da Portela. IV) Cone em 1997.

Como resultado da erupção a área ocupada pelas escoadas lávicas corresponde aproximadamente a 4.07 km<sup>2</sup> (Figura 2.2.II), com um volume total estimado durante a erupção de 22 a 35x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (Wallenstein *et al.*, 1997).

O magma no decurso deste evento eruptivo não sofreu evolução significativa, correspondendo o tipo litológico das fases explosivas e efusivas a composição tefrítica, evidenciando porém mais diferenciação que as erupções históricas anteriores e outros episódios pós-caldeira de idade indeterminada (Silva *et al.*, 1997).

### 2.3.3. TIPOLOGIA ERUPTIVA

A base de CEP traduz um regime de efusividade elevado, com espessas escoadas lávicas e com pouca actividade explosiva. Para o topo o carácter explosivo é dominante, modelando a parte superior do edifício vulcânico ante-formação da Caldeira com declives mais acentuados (Figura 2.1.).

Para os eventos posteriores à última fase de formação da caldeira, em particular os históricos, e com todas as reservas resultantes de algumas lacunas e imprecisões nos dados de registos históricos, a actividade vulcânica parece ter mantido um carácter predominantemente explosivo moderado nos primeiros séculos. Não é de excluir que essa actividade possa ter tido um grau mais elevado do que índice VEI (Newhall & Self, 1982)  $\cong 2$  atribuído às erupções deste século e eventualmente a outras históricas, quer pelas descrições existentes quer pelas dimensões do Pico como principal foco emissor.

Tomando como padrão as erupções históricas verifica-se que a actividade vulcânica se desencadeia ao longo de fissuras, desenvolvendo vários focos eruptivos que tendem a concentrar-se em cones, facto comum às erupções prolongadas de escoadas basálticas. Estes focos podem encontrar-se consideravelmente distanciados (Secção 4.3.).

O estilo eruptivo situa-se entre o havaiano e o estromboliano caracterizando-se os episódios vulcânicos por actividade explosiva, com construção de cones associados à

erupção, e efusiva com emissão de lavas abundantes. Estas lavas são fundamentalmente aa com *pahoehoe* subordinadas resultando o maior período de expansão das escoadas lávicas nas fases iniciais da extrusão.

As erupções são precedidas por actividade sísmica de intensidade baixa, não se encontrando registo superior a grau VII-MM, por vezes só na própria semana de erupção e que pode acompanhar várias fases do processo eruptivo. O facto destes fenómenos pré-eruptivos se manifestarem muito proximamente às erupções estabelece correlações entre eles, não discriminando, porém, qualquer relação com a profundidade da câmara magmática.

Relativamente à duração das erupções, somente para algumas das históricas é possível saber a duração exacta, como a de 1785 e 1799, inferior a um mês, 32 e 26 dias, respectivamente, supondo-se o mesmo para a erupção de 1847 (Ribeiro 1960). As duas últimas erupções duraram cerca de dois meses.

Considerando que anteriormente a 1721 os registos podem apresentar lacunas e que este evento se poderá ter prolongado até 1725, o intervalo de recorrência a partir desta data tem um valor médio de 26.5 anos, com mediana de 15.5 anos (Figura 2.3.).

#### 2.4. POPULAÇÃO, INFRAESTRUTURAS BÁSICAS E RECURSOS ECONÓMICOS

As estatísticas oficiais mais recentes datam do CENSOS90 (1992) e é esta uma das bases de dados utilizada neste trabalho, embora possa haver alguma desactualização e subestimação. Outro aspecto a referir são as discrepâncias e lacunas quando se compara os dados por freguesias e por localidade.

- POPULAÇÃO

A população residente da ilha do Fogo é de 33 902 habitantes (ANEXO I). Excluindo dois núcleos, a cidade de São Filipe, a WSW, e a localidade Mosteiros, a NNE, a população encontra-se dispersa com uma densidade populacional baixa.

A população é bastante jovem, com 56.5% com idades inferiores a 19 anos e 81% do total com idades inferiores a 40 anos. Os grupos etários dos 0 aos 14 anos constituem a maior frequência em todas as freguesias, 48.2% da população, e o grupo de idosos, com idades superiores a 75 anos, englobam 3.7% do total da população.

A nível de instrução, 59.7% da população tem o nível primário/preparatório, com 4.6% alfabetizados e 33% sem qualquer nível.

Alguns valores são discrepantes relativamente ao número de pessoas habitando o sector E da ilha, em particular a Chã das Caldeiras, quando comparados com os valores referidos no realojamento durante a erupção de 1995, que não são explicados nem pelo aumento da taxa de natalidade nem pela (i)migração. Uma subestimação dos valores populacionais do CENSOS90 (1992) é o mais provável (Correia *et al.*, 1997).

- PARQUE HABITACIONAL

O parque habitacional é pobre, em particular nas zonas com menor densidade habitacional, havendo ainda várias casas construídas por métodos tradicionais (Figura 2.4.III.). A distribuição populacional geral por unidades de alojamento tem uma ocupação média de 5.28 pessoas por unidade (ANEXO I). O tipo dominante é a casa individual.

- INFRAESTRUTURAS BÁSICAS

- SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA - O abastecimento às populações faz-se maioritariamente por chafariz e cisterna correspondendo a 88.2% do abastecimento total (ANEXO II). Muitas destas cisternas são privadas e sistemas de captação de água criptocristalina têm sido mais fortemente implementados. No sector este da ilha entre Cova Figueira e Mosteiros não existem canais de distribuição de água (SECP, 1985).

- SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA - Centrais eléctricas localizam-se em São Filipe e Mosteiros (Setagri, 1985). A energia eléctrica é a que é menos utilizada nas unidades de alojamento (ANEXO III).
- SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES - Estações de telecomunicações localizam-se em São Filipe, Mosteiros e Cova Figueira.
- AEROPORTOS - Um a SW de São Filipe com uma pista asfaltada com cerca de 1500 m e outro em Mosteiros com pista de terra com cerca de 700 m. Em 1997 o aeroporto de São Filipe entrou novamente em actividade, tendo sido interrompido o seu funcionamento regular durante vários anos. O aeroporto de Mosteiros tem requisitos mínimos de funcionamento.
- PORTOS E VARADOUROS - A maior estrutura portuária é Porto de Vale de Cavaleiros localizado na proximidade de São Filipe. Mosteiros tem também um porto.  
Para a zona este o I.H. (1971) refere como varadouros Praia Casinha, a este de Cova Figueira, e praia da Coxa da Baleia, somente para pequenas embarcações nesta última. Podem também funcionar como varadouros, em dias de mar calmo, a zona entre Baía do Fundão (Ponta Fundão) e Baía de Duas Pernas.
- REDE RODOVIÁRIA - A rede rodoviária da ilha do Fogo dispõe de aproximadamente 180 km, da qual 130 km são estradas pavimentadas com pedra basáltica e as restantes em solo estabilizado (SECP, 1985). A distribuição destas estradas faz-se por dois anéis: um a nível inferior entre 200 a 600 m de altura, que faz a ligação entre São Filipe e Mosteiros, outro a nível superior entre 900 e 1700 m de altura, que dá acesso à Chã das Caldeiras e às vertentes ocidentais da ilha. Ambos os anéis fazem ligação com São Filipe, mas nenhum permite rodear completamente a ilha, dificultando as ligações entre São Filipe e Mosteiros.

- UNIDADES DE APOIO À SAÚDE - O hospital regional situa-se em São Filipe e uma unidade de apoio à saúde em Cova Figueira.

- RECURSOS ECONÓMICOS

O arquipélago de Cabo Verde possui algumas fontes de rendimento, constituindo o maior problema as características climáticas da Faixa de Sahel que impedem o desenvolvimento agrícola e submetem a região a secas prolongadas.

Apesar destas circunstâncias a produção agro-pecuária constitui a maior fonte de rendimento para a ilha do Fogo, seguida proximamente pelo sector das pescas (CENSOS90, 1992, Silvestre, 1994).

23% da população activa ocupa-se com a agricultura, silvicultura, caça e pesca, 26.8% à construção, 27.7% têm actividades mal definidas, distribuindo-se os restantes por actividades menores diversas.

---

.....

### **3. MODELAÇÃO DE FLUXO DE ESCOADAS LÁVICAS**

### 3. MODELAÇÃO DE FLUXO DE ESCOADAS LÁVICAS

#### 3.1. ESCOADAS LÁVICAS

Frequentemente as erupções efusivas iniciam-se com uma fase transiente de fontes de lava durante a qual o magma é disperso na atmosfera por um gás magmático, diminuindo o seu teor em gás e desenvolvendo-se então uma escoada lávica (Macedonio, *in press*) (Figura 2.4.). Este corpo circunscrito e continuamente fornecido de lava que mantém continuidade na fluidez ao longo da sua extensão (Walker, 1971, Borgia & Linneman, 1990, *in* Kilburn & Guest, 1993) desenvolve margens estáticas ou que se movem mais lentamente que uma zona central exposta ao ar ou coberta por uma crosta lávica.

O desenvolvimento de um campo lávico depende de um certo número de factores interrelacionados: reologia da lava, duração da erupção, taxa de efusão, volume total de lava emitida e topografia subjacente (Hulme, 1974, Dobran *et al.*, 1990, Pinkerton, 1993).

Em termos dinâmicos e de um modo geral, o movimento de uma lava numa topografia definida, é considerado como o de um fluido viscoso do tipo Bingham (Robson, 1967, Hulme, 1974, Park & Iversen, 1984, Chester *et al.*, 1985, Borgia & Linneman, 1990, Ishihara *et al.*, 1990, Araña & Ortiz, 1993), i.e., caracterizado por uma tensão de cedência ( $\tau$ ) que deve ser excedida para que se ponha em movimento, estabelecendo-se então uma relação linear entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação (Figura 3.1).

No entanto, o comportamento das escoadas lávicas é fortemente não linear e durante todo o processo de instalação e solidificação destas, variam reologicamente desde líquidos newtonianos ( $\tau \cong 0$ ) a sólidos frágeis (Dragoni, 1989, Barca *et al.*, 1994). Por exemplo, a viscosidade aparente varia por um factor de  $10^6$  à medida que arrefece num intervalo de apenas 200°C (Pinkerton, 1993), com o conseqüente aumento da tensão de cedência.

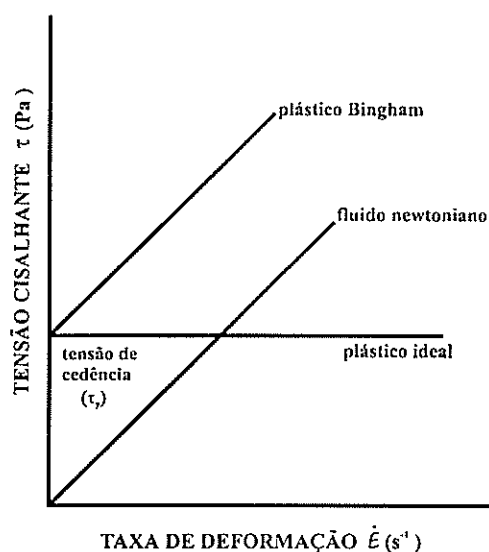


Figura 3.1. Comportamento reológico de alguns tipos de materiais (adaptado de Chester *et al.*, 1985).

De um modo simplificado, as escoadas lávicas podem ser tratadas como núcleos viscosos quentes no interior de uma crosta mais fina, arrefecida e solidificada (Kilburn & Lopes 1988, Crisp & Baloga 1990, Fink & Griffiths 1990, Kilburn & Lopes, 1991 *in* Kilburn, 1993). A interação destes dois elementos, crosta e núcleo, determinam as características morfológicas fundamentais das escoadas subaéreas e a sua evolução dinâmica. Após a instalação das escoadas lávicas, se a sua progressão é dominada pelo núcleo a escoada é do tipo *aa* ou em blocos e o avanço aproxima-se de um estado estacionário, se a crosta é o elemento dominante a escoada é do tipo *pahoehoe* e o avanço é mais irregular (Figura 3.2.).

Um factor importante determinando onde uma escoada se torna *pahoehoe* ou *aa* é a taxa de efusão que quando elevada favorece o desenvolvimento de escoadas *aa* (Pinkerton & Sparks, 1976 *in* Francis, 1993). Nestas, a tendência é haver uma fase inicial de rápida extensão seguida por uma longa fase de avanço muito mais lento, pelo menos de um factor de 5 (Kilburn *et al.*, 1995). No processo dinâmico de evolução das escoadas lávicas podem existir todos os cambiantes destes dois tipos, com várias mudanças estruturais, desde a formação de canais e tubos a estruturas de pequena escala na textura superficial.

Se várias escoadas se formam, o esboço planimétrico de um campo de lava é controlado pela forma e distribuição de algumas escoadas maiores ou arteriais (Kilburn & Lopes, 1991, *in* Kilburn, 1993), resultantes de um período de rápida extensão, com correntes de lava menores preenchendo os intervalos e modificando a periferia do campo de lava.

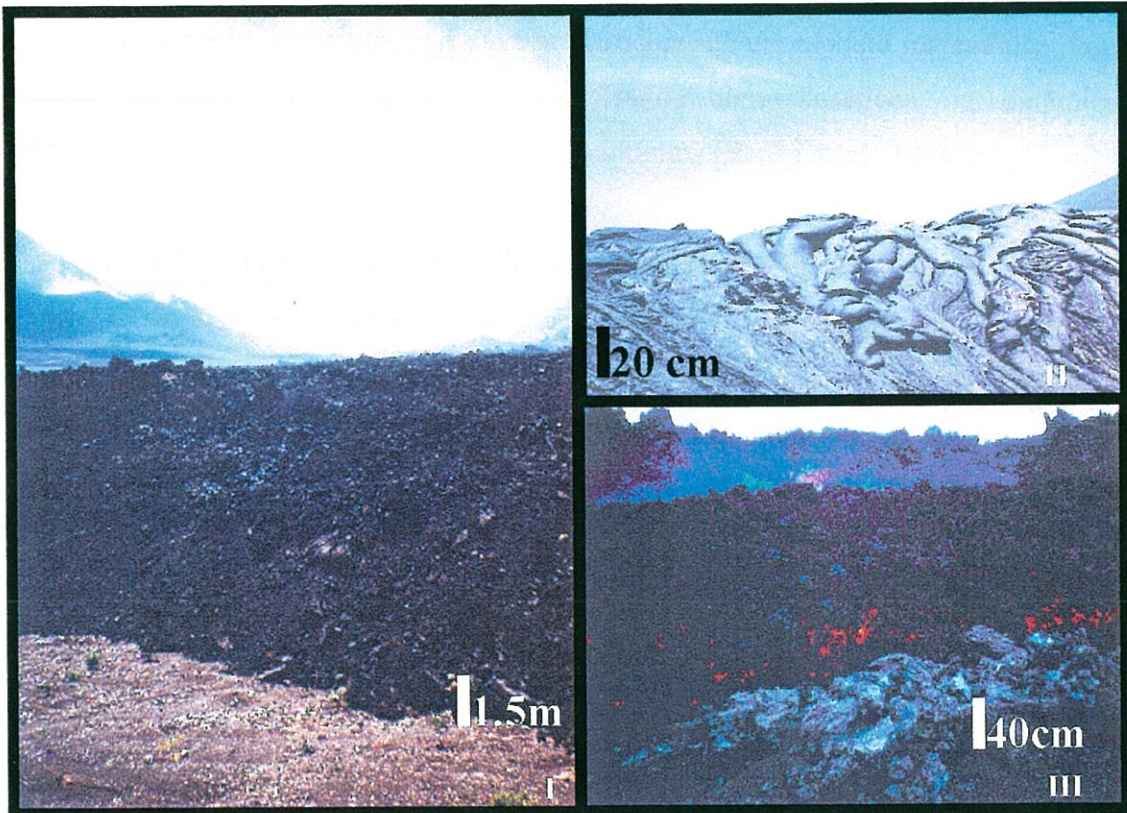


Figura 3.2. Aspecto das escoadas lávicas da erupção de Abril de 1995, Fogo. I) *Aa*, rugosas e aguçadas. II) *Pahoehoe*, superfícies lisas e arredondadas. III) Frente de lava *aa*, com avanço típico em *bulldozer*.

A forma final de uma escoada depende do seu estado de evolução quando o fornecimento de lava termina (Fink, 1990), sendo as influências reguladoras que levam uma escoada a parar a viscosidade efectiva e efeitos friccionais subsidiários (Chester *et al.*, 1985).

O tipo dominante na ilha do Fogo é controlado por escoadas *aa* com *pahoehoe* subordinadas, em geral com estas últimas nas fases terminais da erupção (Secção 2.3.).

### 3.2. MÉTODO DE SIMULAÇÃO POR AUTÓMATOS CELULARES (AC)

Um modelo de simulação é um tipo particular de um modelo matemático de um sistema, podendo os modelos ser classificados como estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos, discretos ou contínuos (Banks *et al.*, 1996).

O modelo proposto neste trabalho tem uma abordagem dinâmica, i.e., representa a variação do sistema ao longo do tempo e no espaço, traduzindo como as escoadas lávicas se modificam à medida que progridem. É estocástico, na medida em que os parâmetros intervenientes na dinâmica do sistema são interpretados como variáveis aleatórias com uma dada função de distribuição de probabilidades. Neste contexto o resultado da simulação são imagens equiprováveis que resultam da interacção do conjunto de variáveis aleatórias de *input* do modelo. É um modelo discreto pois o estado das variáveis muda apenas para um conjunto discreto de pontos ao longo do tempo. Aplica-se neste modelo o formalismo dos Autómatos Celulares (AC), que foi desenvolvido nos anos 40 por von Neumann (1966), tendo sido retomado algumas décadas mais tarde.

O facto de os AC capturarem as características peculiares dos sistemas que parecem evoluir exclusivamente de acordo com interacções locais das suas partes constituintes (Wolfram, 1984), tem levado à sua aplicação a uma grande variedade de sistemas complexos desde a turbulência em fluidos a padrões de crescimento biológico ou mineral.

Muitos sistemas físicos contendo elementos discretos com interacções locais podem ser convenientemente modelados por AC constituindo uma abordagem alternativa à representação tradicional por equações diferenciais, pela introdução de

variáveis discretas e diferenças finitas. Os sistemas físicos passam a ser visualizados como sistemas dinâmicos nos quais o espaço e o tempo são discretos e as quantidades físicas tomam um conjunto discreto de valores finitos (Wolfram, 1994, Weisbuch, 1994). O tempo deixa de ser uma variável real e passa a ser representado por intervalos discretos de 1 a  $n$ . As variáveis contínuas e as equações diferenciais são substituídas por um estado finito de autómato.

O espaço é discretizado em células, e cada célula evolui em intervalos de tempo discretos, de acordo com regras de transição determinísticas ou estocásticas que dependem exclusivamente do estado das células da vizinhança (Zeigler, 1984, Wolfram, 1984, Toffoli & Margolis, 1987, Boghosian, 1990). A conectividade de um autómato é limitada a uma certa vizinhança que usualmente consiste nos seus vizinhos mais próximos, mantendo essa estrutura de vizinhança as mesmas propriedades da rede.

A evolução de AC faz-se por intervalos de tempo discretos em que se modifica simultaneamente os valores das variáveis em cada célula com base nos valores das variáveis na sua vizinhança no tempo  $t$  prévio e de acordo com regras de transição locais (Wolfram, 1994). Em geral as interações são bastante simples, embora o comportamento total possa ser bastante complexo.

Um exemplo de evolução de AC unidimensional binário está expresso na Figura 3.3. usando como regra de transição a identidade das células. Se no tempo  $t$  as células na vizinhança são idênticas, no tempo  $t+1$ , o valor passa a ser uma célula igual às outras duas, se são diferentes a célula mantém-se inalterada.

Pelas características e dinâmica das escoadas lávicas (Secção 3.1.) vários aspectos podem ser considerados durante a sua instalação e imobilização (Felpeto *et al.*, 1996, Fernández, 1997, Macedonio, *in press*):

- Comportamento não newtoniano do fluido
- Perda de calor por condução, radiação e convecção
- Solidificação da parte externa da escoada com formação de túneis e *levées*

- Transição entre diferentes regimes de fluxo (lavas *pahoehoe*, *aa* e em blocos)
- Mudança na topografia original durante o fluxo
- Bifurcação do fluxo
- Volume e taxa de efusão

Dos modelos numéricos de simulação de fluxo de lava desenvolvidos (Crisci *et al.*, 1982, 1986, Ishihara *et al.*, 1990, Macedonio, 1990, Barca *et al.*, 1987, 1993, 1994, Young & Wadge, 1990, Wadge *et al.*, 1994, Crisci *et al.*, 1982, 1986, Felpeto *et al.*, 1996, Quental & Soares, 1997, Miyamoto & Sasaki, 1997), não existe um que inclua todos estes aspectos, seleccionando-se alguns em função do objectivo pretendido.

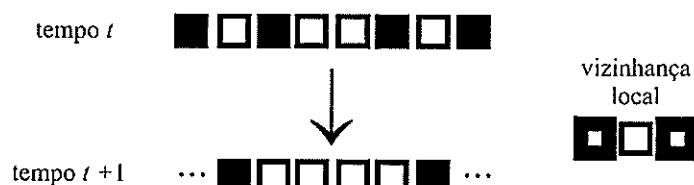


Figura 3.3. Evolução de um AC unidimensional num intervalo de tempo  $t$  (adaptado de Wolfram, 1994).

Neste estudo é proposto um modelo de simulação que incorpora os parâmetros mais importantes que controlam as escoadas lávicas, i.e., topografia e sua actualização no decurso do fluxo, localização de focos eruptivos, taxa de efusão e volume total. A reologia da lava é considerada indirectamente pelo efeito de espessura nas células, através de um parâmetro denominado por viscosidade empírica.

O modelo é baseado no formalismo dos AC, bidimensionais, onde a evolução da escoada lávica é determinada por um processo estocástico.

Para uma célula do AC, um conjunto de probabilidades de transição é definido para as células vizinhas:

$$\text{prob} \{x_0 \rightarrow x_i | T(x_0); L(x_0); S(x_0); T(x_i); L(x_i); S(x_i)\} = P_{x_0}(x_i) \quad (3.1.)$$

A transição da célula  $x_0$  para  $x_i$  é condicionada ao conjunto de parâmetros das células  $x_0$  e  $x_i$ : topografia  $T$ , volume de lava  $L$  e viscosidade empírica  $S$ .

A evolução do fluxo de lava de uma célula fonte  $x_0$  para uma célula vizinha  $x_i$  é determinada pelas probabilidades de transição  $P_{x_0}(x_i)$ . São consideradas oito células vizinhas, sendo a soma das probabilidades de transição unitária:

$$\sum_{i=1}^8 P_{x_0}(x_i) = 1 \quad (3.2.)$$

Para um processo ilustrativo, vamos considerar neste caso as probabilidades de transição condicionadas somente à topografia  $T(x_0)$  e ao volume de lava  $L(x_0)$ :

$$P_{x_0}(x_i) = \text{prob} \{x_0 \rightarrow x_i | T(x_0); L(x_0); T(x_i); L(x_i)\}$$

A diferença de cota (topografia + lava) entre as células  $x_0$  and  $x_i$  é:

$$d(x_i) = T(x_0) + L(x_0) - [T(x_i) + L(x_i)]$$

Então, para valores não negativos de  $d(x_i)$  i.e. com uma probabilidade não nula da lava fluir de  $x_0$  para  $x_i$ , pode-se assumir a razão  $d(x_i)/dt$ , como a probabilidade de transição de  $x_0$  para  $x_i$ , com  $dt$  com a soma dos valores positivos  $d(x_i)$ :

$$P_{x_0}(x_i) = d(x_i)/dt \quad \text{sendo} \quad \sum_{i=1}^8 P_{x_0}(x_i) = 1 \quad \text{e} \quad dt = \sum_{i=1}^8 d^+(x_i) \quad (3.3.)$$

Note-se que funções mais complexas de  $T$  e  $L$  podem ser escolhidas para as probabilidades de transição da lava.

### 3.3. SIMULAÇÃO DO FLUXO DE LAVA

Como parâmetros locais, cada célula tem por variáveis a altitude, volume de lava e fluxo de saída de lava que é transferida para outra célula, sendo este dependente da viscosidade empírica  $S$ . Os limites a condicionar as simulações são o volume de lava em cada iteração ( $VLI$ ) ou descarga de lava na célula fonte  $x_0$  (taxa de efusão), volume total de lava ( $VLT=VLI*n^{\circ}$  total de iterações), número total de iterações, localização de focos eruptivos e topografia.

A simulação é um processo iterativo em que cada iteração, representando um período de tempo  $t$ , é iniciada numa célula fonte  $x_0$  com um volume de lava  $L_{t=1}(x_0) = L$ . O algoritmo de simulação pode então ser sintetizado na seguinte sequência de passos:

1 - Cálculo de  $P_{x_0}(x_i)$  e da função distribuição cumulativa:

$$F_{x_0}(x_i) = \sum_{j=1}^i P_{x_0}(x_j) \quad (3.4.)$$

2 - Simulação da célula "alvo"  $x_i$  a partir do método de simulação inversa de uma variável aleatória com uma função distribuição de probabilidade igual a  $F_{x_0}(x_i)$ .

Vamos considerar o exemplo da Figura 3.4. em que das oito células vizinhas a  $x_0$  só quatro possuem probabilidades não nulas da lava fluir (cotas topográficas mais baixas que  $x_0$ ) para essas células ( $x_4, x_5, x_6$  e  $x_7$ ). A partir de  $P_{x_0}(x_i) = dx_i/dt$  com  $i=4, 5, 6$  e  $7$ , construiu-se a função de distribuição cumulativa:  $F_{x_0}(x_4)=P_{x_0}(x_4)$ ,  $F_{x_0}(x_5)=P_{x_0}(x_4)+P_{x_0}(x_5)$ ,  $F_{x_0}(x_6)=P_{x_0}(x_4)+P_{x_0}(x_5)+P_{x_0}(x_6)$  e  $F_{x_0}(x_7)=P_{x_0}(x_4)+P_{x_0}(x_5)+P_{x_0}(x_6)+P_{x_0}(x_7)$ .

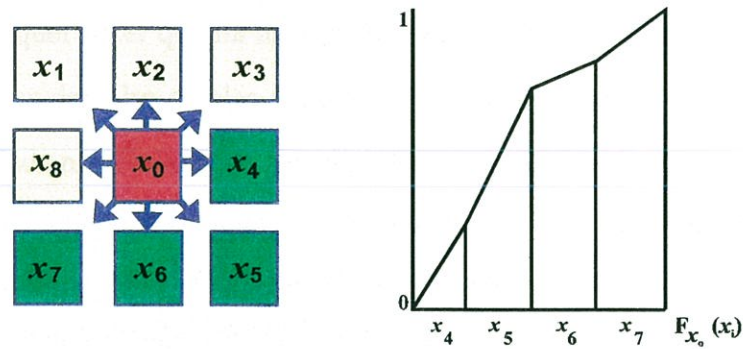


Figura 3.4. Exemplo de probabilidades de transição de fluxo de lava e construção da função de distribuição cumulativa.

O método de simulação inversa de uma variável aleatória (Law & Kelton, 1982) consiste na geração de um valor  $u$  segundo uma lei de distribuição uniforme compreendida entre 0 e 1.

A lava flui da célula  $x_0$  para célula  $x_i$  se:

$$F_{x_0}(x_i) > u \geq F_{x_0}(x_i - 1) \text{ para } i = 2, 4, 6, 8 \text{ e flui para } x_i \text{ se } F_{x_0}(x_i) > u$$

Uma vez definida a célula para qual a lava transita, o balanço de massas entre as células  $x_0$  e  $x_i$  é calculada: se a diferença  $d(x_i)$  é maior que a quantidade total  $L(x_0)$  então existe espaço suficiente em  $x_i$  para acomodar a lava e conseqüentemente flui<sup>1</sup> para a célula  $x_i$ , se a diferença  $d(x_i)$  é menor ou igual a  $d(x_0)$  a lava fica ao mesmo nível em ambas as células. Em qualquer dos casos o valor de altitude da célula é actualizado com o volume de lava que permanece na célula (Figura 3.5.).

3 - A célula para a qual a lava foi transferida torna-se  $x_0$  e os passos 1 e 2 são repetidos até a evolução espacial da lava para a iteração  $t$  acabar, o que sucede, basicamente, em três situações:

<sup>1</sup> Excepto um determinado volume retido em  $x_0$  resultante do parâmetro empírico de viscosidade ( $S$ ).

- No ponto em que se define as probabilidades de transição e  $F_{x_0}(x_i)=0$ ,  $i=1,..8$ , quer dizer que há uma probabilidade nula da lava ser transferida para quaisquer das oito células vizinhas. Neste caso  $x_i=x_0$  e  $F_{x_0}(x_0)=1$ , a lava é acumulada na célula  $x_0$  e a sua evolução espacial termina para a iteração  $t$ .
- Quando a quantidade de lava a ser transferida é inferior a um valor mínimo de lava, volume crítico, previamente definido.
- Quando a lava atinge o domínio espacial de estudo.

Em quaisquer das situações uma nova iteração  $t+1$  inicia este procedimento sequencial na célula fonte  $x_f$ :

$$t=t+1; x_0= x_f; L_{total}(x_0)=L$$

O processo de simulação termina quando o número total de iterações é igual a um máximo determinado para cada simulação,  $t_{max}$ , pelo utilizador, o qual é equivalente a um dado período de tempo da erupção.

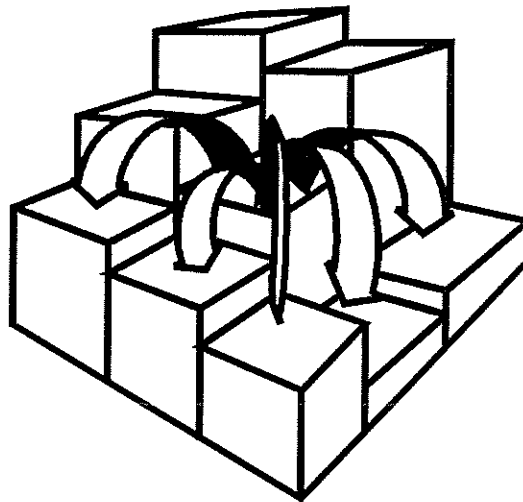


Figura 3.5. Mecanismo de evolução de um volume de lava nas células a partir de um foco eruptivo.

O fluxograma do programa VULCÃO, escrito em FORTRAN, está expresso na Figura 3.6.

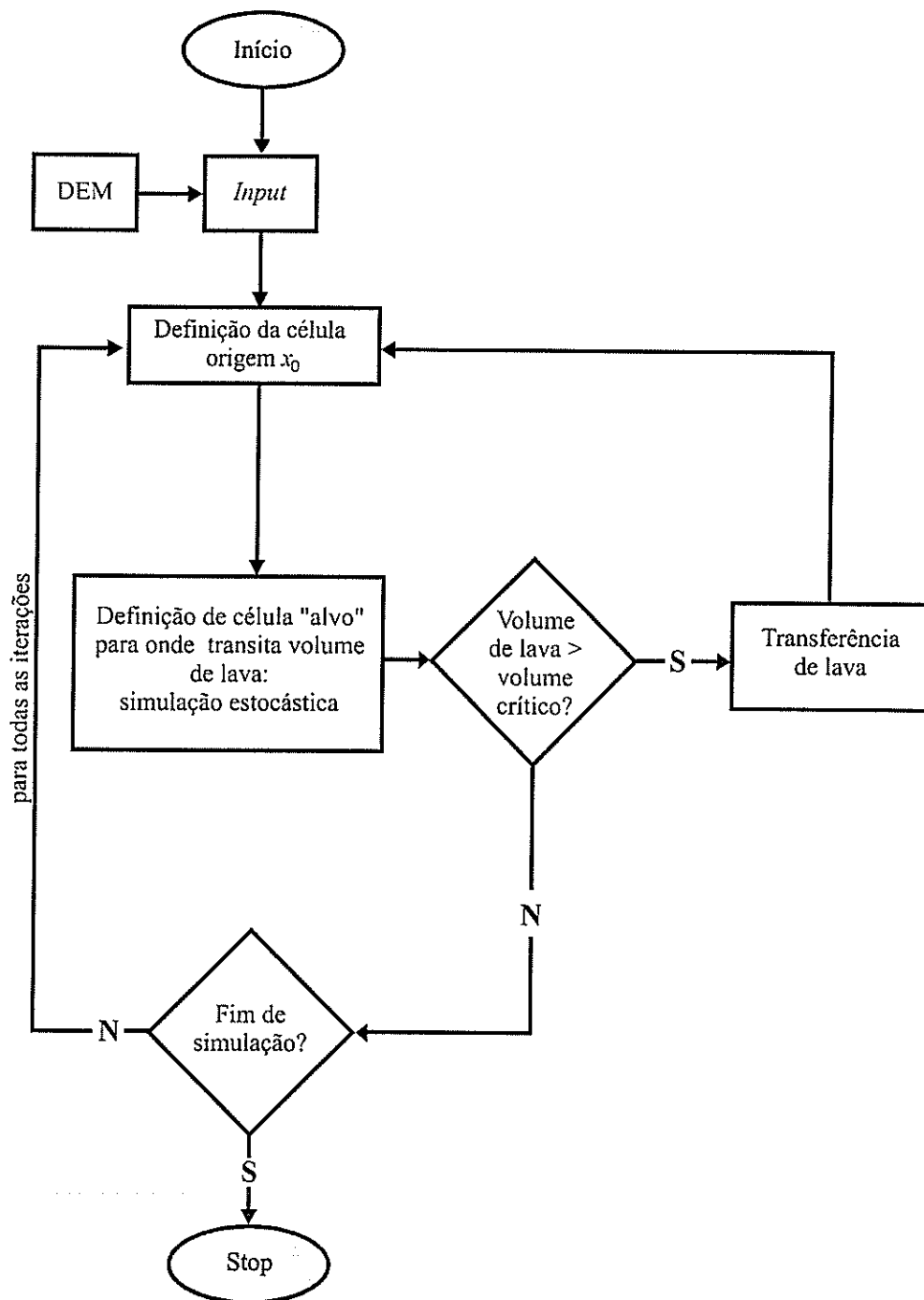


Figura 3.6. Fluxograma do programa VULCÃO.

### 3.4. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Para gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT) da ilha do Fogo, a base topográfica do modelo de simulação, utilizou-se num Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcInfo como dados de partida as curvas de nível mestras com uma equidistância de 50 m e os pontos cotados digitalizados da Carta Topográfica 1:25 000 dos Serviços Cartográficos do Exército (SCEP, 1979), que se transformaram em estrutura vectorial. Esta equidistância é suficientemente representativa devido aos declives elevados da ilha, em particular no sector leste (Figura 2.1.). Porém, para um desenvolvimento mais pormenorizado da área-teste, onde ocorreu a erupção de 1995 (Figura 2.2.) numa zona significativamente mais aplanada ( $\Delta h_{max}=190$  m em 3 km) como a área da Caldeira, utilizaram-se curvas de nível com equidistância de 10 m (Figura 1.1. e 3.7.).

Para representar a topografia num MDT é necessário a transformação dos dados em estrutura vectorial numa estrutura *raster*. Na estrutura vectorial, um objecto é suposto ser representado num espaço coordenado contínuo permitindo todas as posições, extensões e dimensões a serem definidas de um modo preciso (Burrough, 1996). Os objectos estão ligados a tabelas de atributos alfanuméricas que especificam todas as características, espaciais ou não espaciais, passíveis de definir esses objectos e as relações implícitas entre eles, topologia, que permitem que dados complexos sejam arquivados num mínimo de espaço.

Na estrutura *raster* um ponto é traduzido por uma célula, uma linha por um número de células alinhadas numa determinada direcção e uma área por um aglomerado de células vizinhas. Cada célula é independentemente referenciada por um número de linha e coluna e contém um número traduzindo o tipo ou valor do atributo que está a ser representado. Este tipo de estrutura de dados é fácil de manusear em particular com linguagens de programação em FORTRAN devido à facilidade com que as tabelas de linhas e colunas podem ser arquivadas, manipuladas e visualizadas (Burrough, 1996).

A partir das curvas de nível e dos pontos cotados gerou-se uma *tin* (Triangular Irregular Networks, ESRI, 1992, Bonham-Carter, 1996), onde os pontos irregularmente distribuídos passam a ser representados por uma rede irregular de triângulos interligados, cujos nós são os pontos originais. Essa *tin* foi rasterizada para uma *lattice* quadrada onde se optou por um processo de interpolação espacial bilinear, *quintic* (ESRI, 1992) (Figura 3.7.II.), com um valor de pixel de 15x15 m. Uma *lattice* representa um conjunto de pontos regularmente espaçados num intervalo constante nas direcções *x* e *y* e difere de uma *grid* pelo facto de representar o valor da superfície apenas nos pontos da malha, *floating points*, ao invés do valor da célula que rodeia cada um dos pontos. Uma *lattice* é apropriada à abordagem por AC.

O valor de 15x15 m foi seleccionado por representar um balanço adequado entre a dimensão real das escoadas lávicas da erupção de 1995 no(s) foco(s) eruptivos e o tempo necessário a executar as simulações. O MDT gerado total para a ilha do Fogo é uma estrutura *raster* com  $n \times n = 1272 \times 1630$ , enquanto que a área-teste corresponde a  $n \times n = 387 \times 318$  (Figura 1.1.i e iii).

A implementação do modelo de simulação de fluxo de lava foi feita paralelamente a um SIG ArcInfo numa *Alpha Station 600 Series* e a integração é feita através de *input* de dados para o primeiro através do MDT, produzindo ficheiros de saída *raster* em formatos importáveis (*ascii*) que permitem mais desenvolvimento e visualização no SIG. O *software* ErMapper foi também utilizado pelas potencialidades de visualização, facilidade nas operações com modelos *raster* e pela possibilidade de interface directa com o ArcInfo.

Enunciam-se em seguida as variáveis do modelo de simulação de fluxo de lava (locais), assim como os limites que condicionam as simulações. Como processo ilustrativo comparam-se simulações em que varia um parâmetro específico, mantendo-se os outros constantes.

- TOPOGRAFIA

Em função do método pelo qual é calculada, a topografia modifica o padrão de simulações e é um dos limites destas.

Na Figura 3.7. a mesma simulação foi feita em dois MDTs distintos, um gerado por um processo de interpolação linear (3.7.I.) e outro por uma interpolação bilinear (*quintic*, ESRI, 1992) (3.7.II.). Este último modelo foi adoptado para a generalidade das simulações por traduzir uma superfície topográfica mais próxima da real, com uma representação mais suave.

Outro aspecto relativo ao modelo *raster* representativo da topografia e que foi testado diz respeito à dimensão adoptada para as células. Na figura 3.7.III.) as células têm dimensão 7x7 m enquanto que na figura 3.7.IV) têm um valor de 15x15 m. No primeiro o tempo de execução até chegar a um avanço de lava significativo é muito lento, para além de se afastar mais da largura real do canal de lava verificada na erupção. A dimensão 30 m já tinha sido testada (Quental & Soares, 1997), afastando-se igualmente das dimensões reais.

- VOLUME DE LAVA E N° DE ITERAÇÕES

A Figura 3.8. apresenta resultados de simulações para diferentes volumes de lava por iteração (*VLI*) e número de iterações, relacionando estes dois parâmetros com o volume de lava total emitido ( $VLT = VLI * n^{\circ} \text{ total de iterações}$ ) (Tabela 3.1.)

Tabela 3.1. Condições das simulações da Figura 3.8.

	VLT	VLI	NTI*
I	10000	0.5L**	20000
II	10000	1L	10000
III	40000	2L	20000
IV	5000	0.5L	10000

\*N° Total de Iterações. \*\*Aproximações a valores reais a L na Secção 3.6.

O mesmo *VLT* (I e II) pode resultar em mapas simulados bastante distintos pelo facto de se variar o n° de iterações que é maior em I). Em II) e IV) o número de iterações é o mesmo, mas com *VLT* diferente. O mesmo *VLI* em I) e IV) mas com um *VLT* maior em I), mostram o efeito da actualização da topografia em cada iteração: em

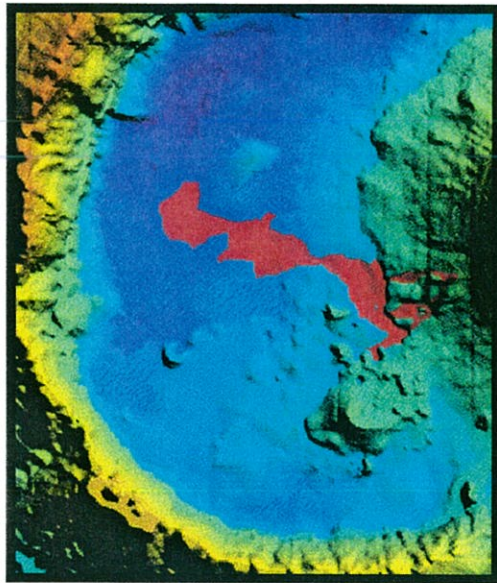
IV) a propagação de fluxo de lava atinge maiores distâncias que em I), apesar de ter um *VLT* inferior no primeiro.

- VISCOSIDADE EMPÍRICA (*S*)

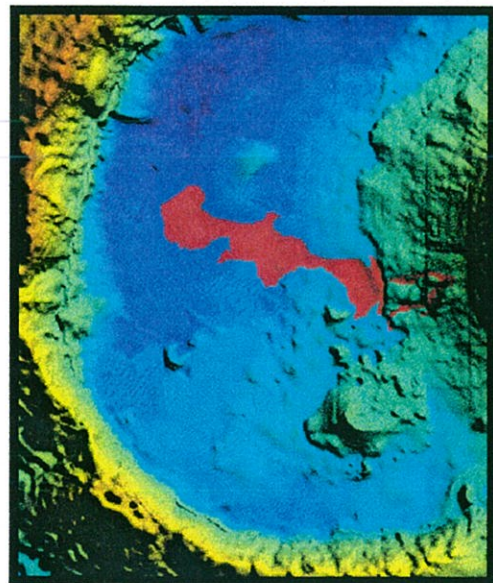
O parâmetro *S* denominado viscosidade empírica, por ser determinado indirectamente, regula o volume de lava que em cada célula  $x_0$  no tempo  $t$  é transferida no tempo  $t+1$  para a célula  $x_1$ . Esse valor é expresso em percentagem e é função do *input* na célula  $x_0$  em termos de volume de lava, ficando retida uma percentagem desse valor no *output*. Na Figura 3.9.I) *S* tem um valor de *output* de 20%, implicando uma saída de lava somente de 20%, o que tem como consequência uma espessura muito maior nas células e consequentemente uma dispersão muito menor que a simulação da Figura 3.9.II) com  $S = 90\%$ .

- FOCOS ERUPTIVOS

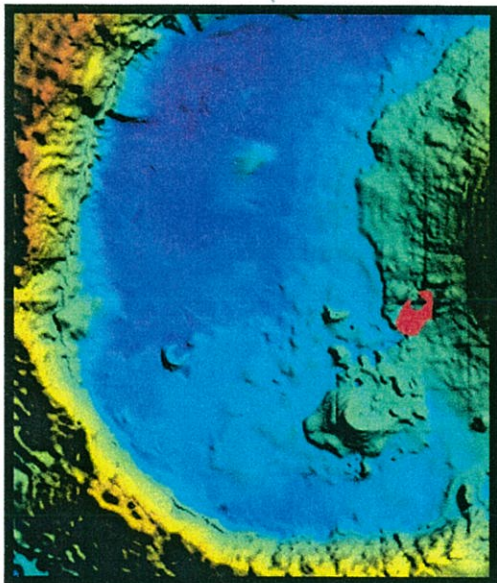
O mapeamento da mesma simulação realizada em células fonte  $x_0$  diferentes, focos eruptivos (extraídos de Torres *et al.*, 1995, 1997), distanciados 230 m está expressa na Figura 3.10.



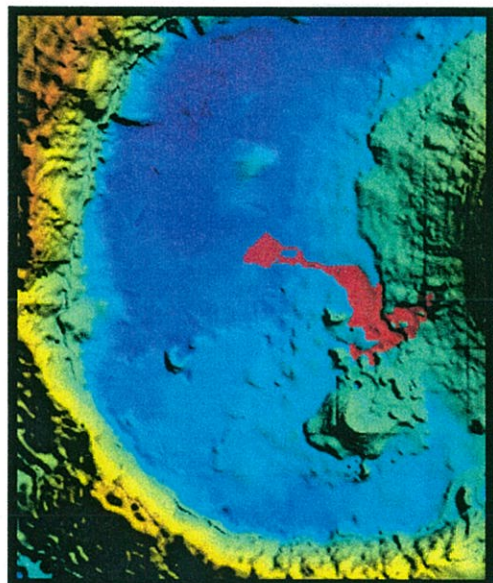
I) Linear



II) Bilinear.



III) 7x7m.

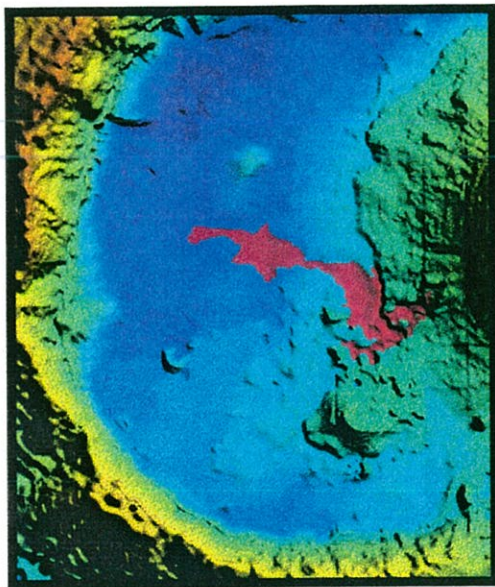


IV) 15x15m.

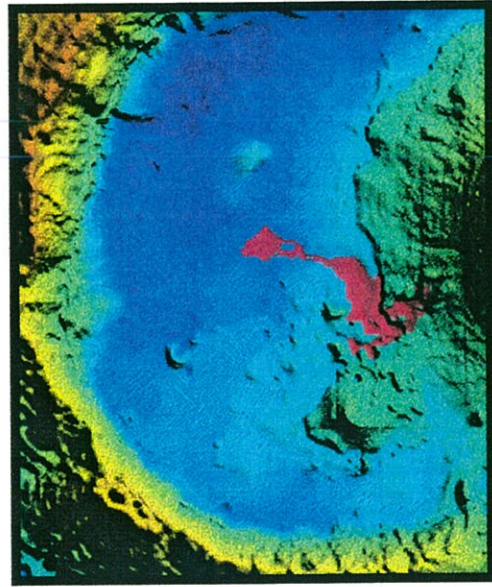
Figura 3. 7. Efeito da topografia nos mapas simulados.

I) e II) Mesma simulação usando MDTs gerados por diferentes métodos de interpolação.

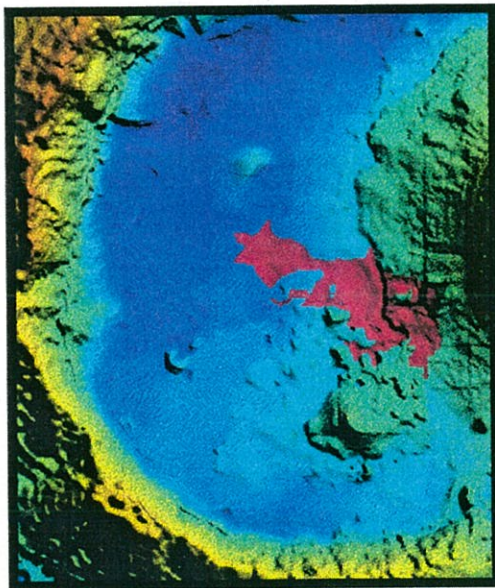
III) e IV) Mesma simulação com MDTs com diferentes dimensões de células.



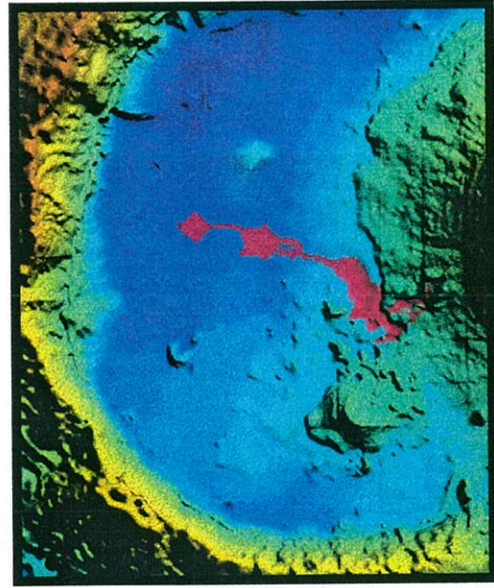
I)



II)

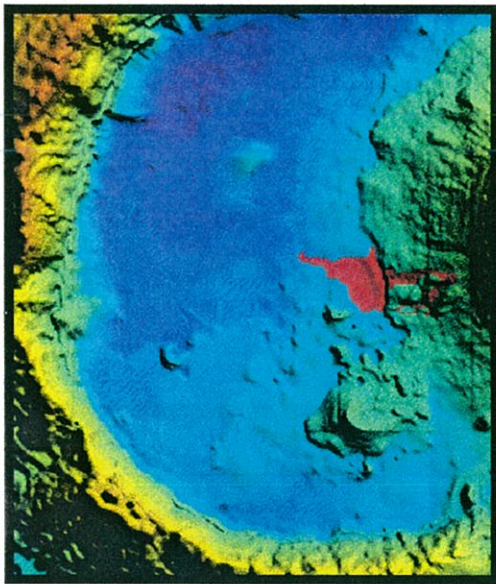


III)

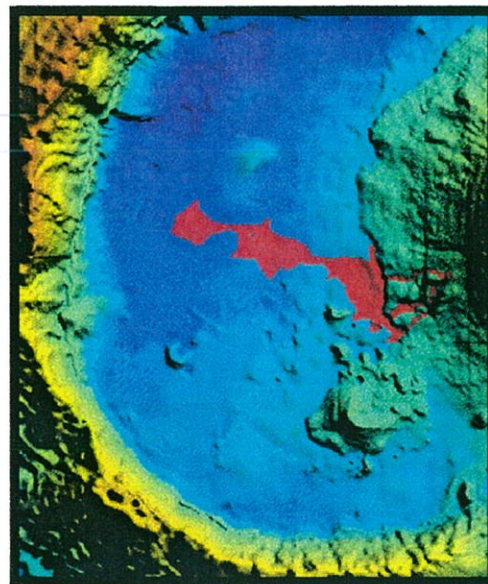


IV)

Figura 3. 8. Relação entre volume de lava, por iteração e total, e número de iterações.  
Valores de I) a IV) expressos na Tabela 3.1.

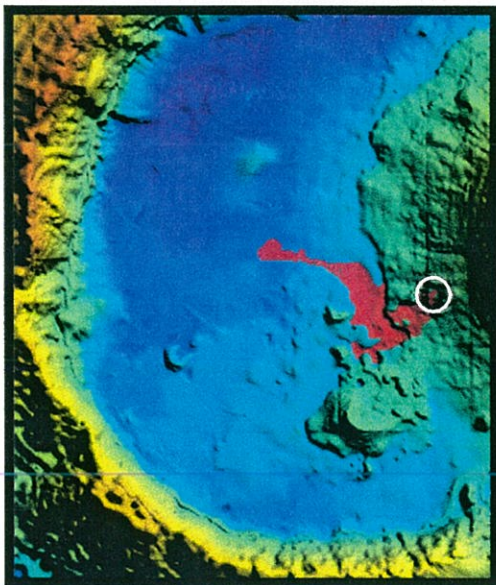


I)  $S = 20\%$ .

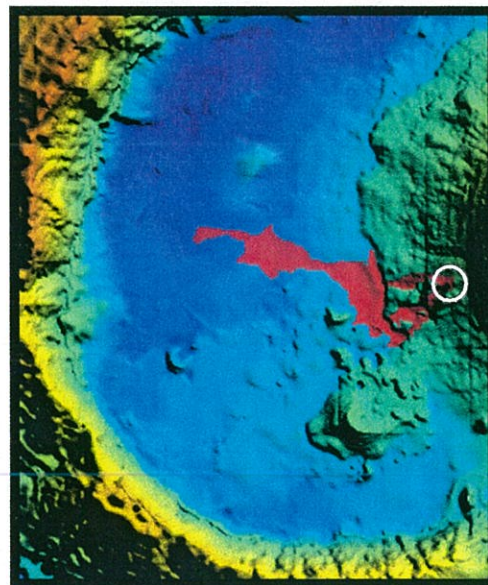


II)  $S = 90\%$ .

Figura 3. 9. Efeito do parâmetro de viscosidade empírica ( $S$ ).



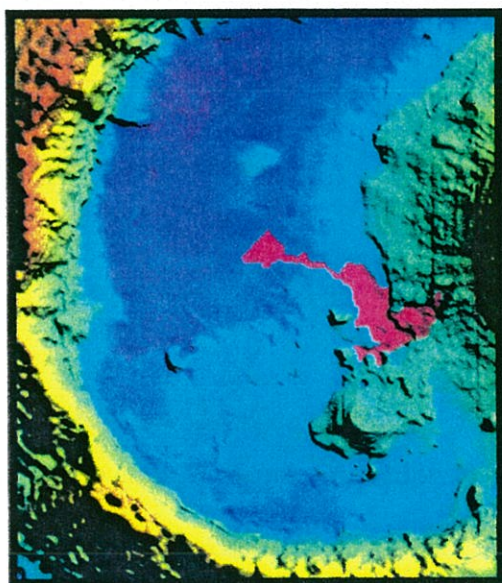
I) F1.



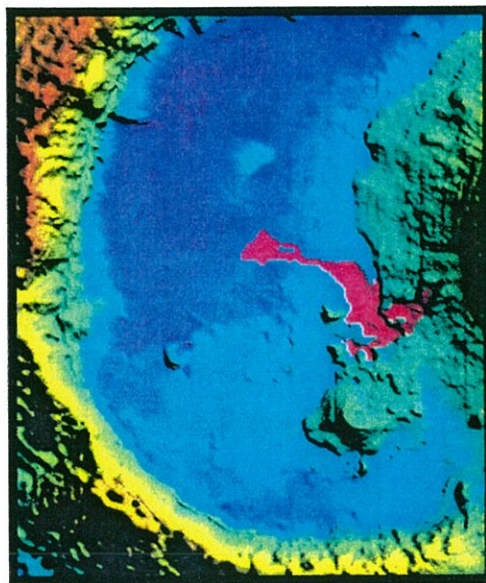
II) F2.

Figura 3. 10. Simulações em diferentes focos eruptivos (extraídos de Torres *et al.*, 1995) distanciados 230m .

Uma das modificações introduzidas neste trabalho diz respeito à conectividade celular dos AC ou número de *inputs*, i.e., a célula fonte  $x_0$  e o número de células consideradas na transição. Na primeira abordagem (Quental & Soares, 1997) utilizaram-se 4 células rodeando a célula fonte (vizinhança Von Neumann, Weisbuch, 1994, ou *five neighbour square*, Wolfram, 1994). Posteriormente passaram a considerar-se oito células em vez das quatro iniciais (vizinhança Moore, Weisbuch, 1994, ou *nine neighbour square*, Wolfram, 1994) (Figura 3.11.).



I) 4 células.



II) 8 células.

Figura 3.11. Simulações com diferentes vizinhanças.

No entanto este algoritmo de cálculo não elimina totalmente o problema da dependência da rede ou anisotropia (Markus & Hess, 1990 *in* Myamoto & Sasaki, 1997). Myamoto & Sasaki (1997) propuseram um algoritmo alternativo onde as probabilidades de transferência de lava são diferentes se a vizinhança é diagonal ou se segue as direções principais da rede, pois têm extensões diferentes. O resultado é que a propagação de lava é simétrica em torno da célula fonte  $x_0$  numa topografia plana.

## 3.5. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DO FLUXO DE LAVA

O conjunto de imagens resultantes de simulações tem a mesma probabilidade de ocorrer, dadas as características definidas da topografia, localização das células fontes e viscosidade empírica.

Mapas de probabilidades de cada ponto  $x$  de ter uma quantidade de lava maior que um dado valor de corte podem ser desenhados com os mapas simulados. Vamos considerar  $z'(x)$  a espessura de um ponto  $x$ , nos mapas simulados  $l$ ,  $l=1, \dots, NI$ -número total de imagens simuladas no ponto  $x$ . Uma variável indicatriz pode ser definida para um corte de espessura  $z$ :

$$i'_z(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } z'(x) > z \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.5.)$$

A probabilidade de cada ponto  $x$  ter uma espessura de lava maior que  $z$  pode ser computado com  $NI$  mapas simulados:

$$P_z(x) = \frac{1}{NI} \sum_{i=1}^{NI} i'_z(x) \quad (3.6.)$$

Os mapas  $P_z(x)$  são instrumentos importantes para calcular mapas de *hazard* de uma erupção com características predefinidas: localização de células fonte  $x_0$  (focos eruptivos), topografia e propriedades reológicas da lava.

A título ilustrativo, na Figura 3.12. calcularam-se mapas de probabilidades  $P_z(x)$  para quatro espessuras diferentes de lavas,  $z=0.2$  m (I),  $z=1.5$  m (II),  $z=3.0$  m (III) e  $z=6.0$  m (IV), referentes ao conjunto de simulações teste para aferição do modelo (Figura 3.13.)

As áreas a vermelho representam aquelas com mais de 75% de probabilidade de ter uma espessura de lava superior a 0.2 m (I), 1.5 m (II), 3.0 m (III) e 6.0 m (IV) após dois dias da erupção.

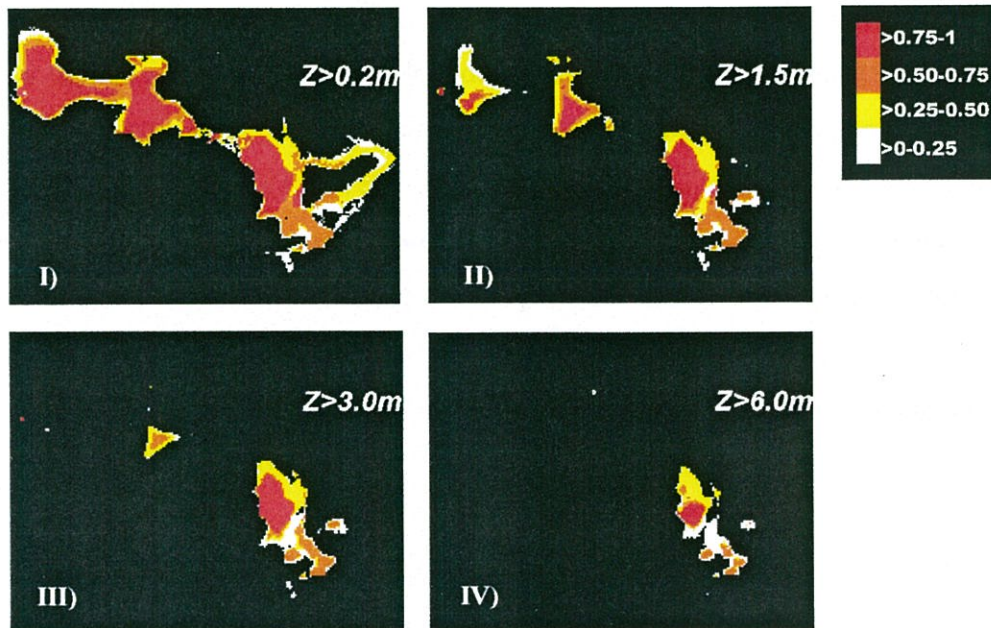


Figura 3.12. Mapas de probabilidades para diferentes espessuras de lavas.

Em termos gerais para análise de *hazard* consideramos os mapas de probabilidades com espessura  $z > 0$  m, i.e. qualquer ponto  $x$  do mapa tem probabilidade de ter qualquer volume de lava (Capítulo 4).

### 3.6. VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO

Um modelo é uma aproximação à realidade e as perspectivas gerais de validação levam a falar não sobre uma validade absoluta mas sim do grau ao qual o modelo concorda com o sistema real, tornando-o uma representação precisa. Vários testes podem ser usados para validar um modelo desenvolvido (Law & Kelton, 1982), sendo o mais definitivo aquele em que o *output* do modelo se aproxima do sistema em estudo. Se a concordância entre os dados reais e o modelo não é boa, os dados são manipulados e o *output* resultante é de novo comparado com os dados do sistema real. Este procedimento é denominado calibração i.e. um processo iterativo de comparar o modelo ao comportamento do sistema real, usando as discrepâncias entre os dois e os critérios ganhos para melhorar o modelo. A repetição é feita até a precisão do modelo ser aceitável (Banks *et al.*, 1996).

Na área teste da Caldeira os parâmetros do modelo de simulação de fluxo de lava foram calibrados com os limites cartográficos da escoada lávica (Gaspar *et al.*, 1995a) dos dois primeiros dias da erupção de 1995. Dos sete focos activos neste período (Secção 2.3.3.), embora não todos com actividade efusiva, foram seleccionados os dois principais para as células fonte  $x_0$ . Para definir os outros parâmetros usou-se um primeiro conjunto de simulações, jogando-se com as combinações e variações possíveis expressas na secção anterior (Figura 3.6. a 3.9.), até o *output* resultante atingir uma aproximação aceitável.

Seleccionaram-se para um total de 10 simulações os valores que figuram na Tabela 3.2., de modo a abranger alguma variabilidade nas condições da erupção.

No parâmetro  $VLI$ , o volume  $L$  pode ser aproximado a um valor real, estimado a partir de valores médios calculados por Wallenstein *et al.*, (1997) para o volume total da escoada lávica para este período,  $L=464 \text{ m}^3$ . O tempo médio real para cada iteração é de 7.2 s.

Tabela 3.2. Parâmetros usados na aferição do modelo.

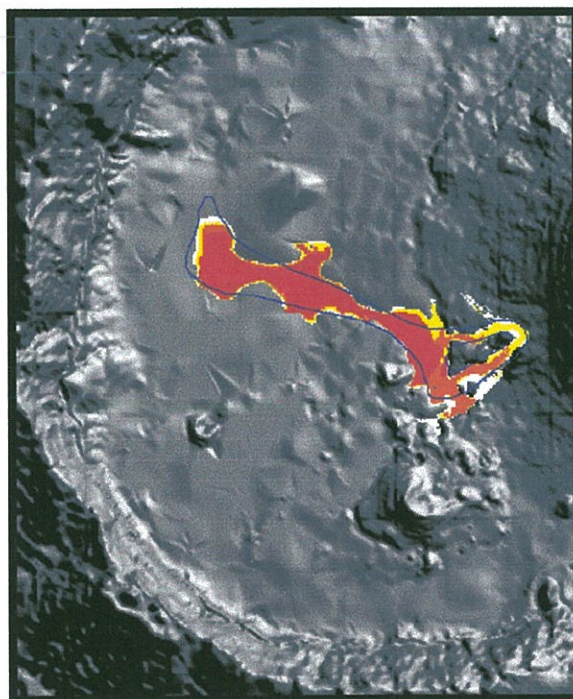
	Mínimo	Máximo	Média
S	68%	80%	70%
VLI	0.5L	1.0L	0.7L
Nº de iterações	10 000	20 000	12 000

Obteve-se um conjunto de 10 imagens simuladas com a metodologia descrita na Secção 3.3. Mapas de probabilidades  $P_z$  de *hazard* (Secção 3.5.) foram calculados de acordo com as equações 3.5. e 3.6. para uma espessura de corte  $z=0$  (Figura 3.13). Significa a probabilidade de qualquer ponto  $x$  ter uma espessura de lava superior a esse valor de corte ( $z>0$ ).

Na Figura 3.13.II) o mapa de *hazard* probabilístico da escoada lávica é comparado com os limites da lava real de Gaspar *et al.*, (1995a) (Figura 3.13.I). A intersecção do modelo corresponde a 92% e a subestimação a 8%. A sobrestimação é de 39% (Figura 3.13.II). Por comparação com a Figura 3.13.I) pode-se concluir que parte significativa dessa sobrestimação corresponde a valores de baixa probabilidade.

Os resultados obtidos validam o modelo como consistente e conseqüentemente pode ser aplicado para prever outros cenários, assumindo condições de erupção idênticas.

Para testar se o modelo é válido para todo o sistema de escoadas lávicas e não apenas para um conjunto particular de dados como o da erupção de 1995, embora representativo da tipologia eruptiva do Fogo, seria necessário aplicá-lo a outras erupções históricas, desde que houvesse dados topográficos anteriores à erupção considerada e descrições suficientemente pormenorizadas do evento. Essa situação verifica-se para a erupção de 1951.

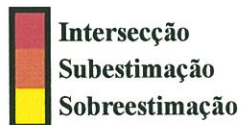
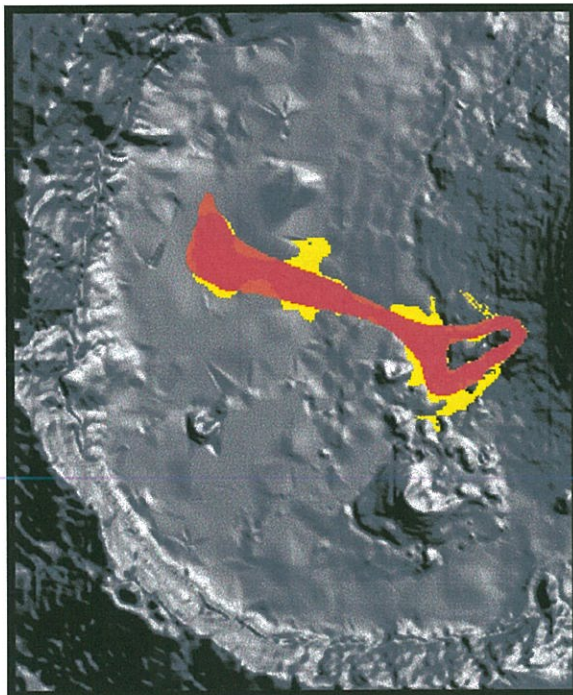


Lava real 

(adaptado de Gaspar *et al.*, 1995a)



I) Mapa de probabilidades resultante de imagens simuladas equiprováveis.



II) Relação do modelo com a lava real.

Figura 3.13. Validação do modelo com dois dias da erupção de 1995.

---

#### **4. ANÁLISE DE RISCO NO SECTOR LESTE DA ILHA**

## 4. ANÁLISE DE RISCO NO SECTOR LESTE DA ILHA

### 4.1. ESCOADAS LÁVICAS COMO FACTOR DE RISCO

As escoadas lávicas raramente estão na origem da perda de vidas humanas (Secção 1.2., Tabela 1.1., coluna 3), sendo as poucas verificadas em geral atribuídas a imprudências, a desgaseificação da lava ou a interação desta com a água. Todavia, são responsáveis por importantes roturas sob o ponto de vista sócio-económico em resultado da cobertura de vastas áreas produtivas, da destruição de infraestruturas básicas (como casas, pontes, estradas e reservatórios de água) (Figura 4.1.) e da proliferação de incêndios (Duncan *et al.*, 1980, Chester, 1993). De facto, a temperatura atribuída às lavas basálticas (900-1250°C Tiedemann, 1992), encontra-se acima do ponto de ignição para a maioria dos materiais de construção inflamáveis e da vegetação, possibilitando o desenvolvimento de um *hazard* adicional.

A danificação de estruturas é atribuída a forças de impacto resultantes do momento da lava e a pressões hidrostáticas por ela exercidas através de sobrecarga nas paredes, por falha nas fundações e/ou forças de *uplift* (Blong, 1984). A capacidade destrutiva é maior com o aumento da tensão de cedência, sendo as lavas *aa* mais demolidoras relativamente a estruturas do que as *pahoehoe* (Secção 3.1.) Estas últimas, devido á sua menor espessura e maior mobilidade podem inclusive ser desviadas por estruturas resistentes.

Em termos de vulnerabilidade, por acção das escoadas lávicas a maquinaria móvel não é afectada, salvo situações particulares, enquanto que para solos, rede viária ou reservatórios de água as perdas podem ser elevadas.

Ao invés de outros tipos de *hazard* vulcânico as escoadas lávicas basálticas constituem um tipo de produto vulcânico cujo desenvolvimento pode ser controlado (Chester *et al.*, 1985, Tiedmann, 1992, Le Guern, 1997). A eficácia de qualquer intervenção no decurso de um episódio desta natureza, depende da reologia da lava, da

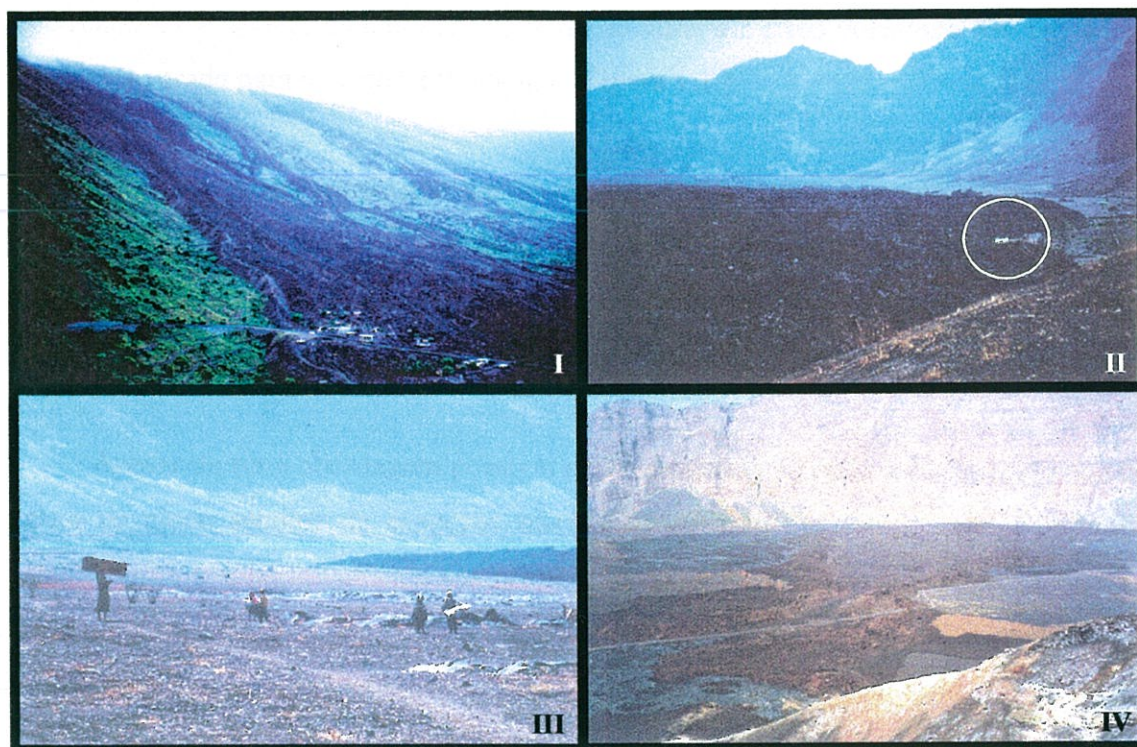


Figura 4.1. Aspectos de risco das escoadas lávicas. I) Enterramento e recuperação de Cova Matinho (1951). II) Destruição de Boca Fonte (1995). III) Retirada de bens da Portela face à proximidade das escoadas lávicas (1995). IV) Estrada recuperada das escoadas lávicas de 1995.

taxa de efusão, do seu volume, de factores de ordem externa como a topografia e da disponibilidade dos meios técnicos e humanos para o efeito. Em alguns casos, a extrusão pode ser tão rápida que qualquer acção só é eficaz se foi desenvolvida anteriormente ao momento da erupção, como a construção de barreiras protectoras ou de canais de escoamento de lava.

#### 4.2. SELECÇÃO DA ÁREA

Embora no Capítulo 2 se tenha pormenorizado alguns aspectos para a totalidade da ilha do Fogo ou mesmo enquadrados no arquipélago, por serem importantes para a compreensão do vulcanismo da ilha assim como no contexto da avaliação dos efeitos

decorrentes de erupções vulcânicas, a análise de *hazard* e risco vulcânico das escoadas lávicas é ilustrada para o sector leste da ilha (Figura 1.1.).

Com efeito, ao considerar um modelo preditivo geral, baseado na actividade vulcânica histórica, as escoadas lávicas propagaram-se neste sector com emissões para o interior da Chã das Caldeiras ou em direcção ao oceano (Figura 2.2.), tornando esta área a mais provável para a ocorrência de uma futura erupção.

Apesar de ser a abordagem possível neste contexto não pode ser esquecido que o registo de cinco séculos de erupções históricas, do caso em estudo, é um período bastante curto, comparativamente aos primórdios da actividade vulcânica (Secção 2.3.), e que o padrão comportamental do vulcão pode alterar-se de modo que actividade passada mais recentemente possa não reflectir a futura.

A área de estudo delimitada para análise de risco da propagação das escoadas lávicas é de 131.9 km<sup>2</sup> (Figura 4.2.), correspondendo a 27.7% da ilha. O limite N foi estabelecido a partir da protecção natural que é a Bordeira (Figura 2.1.) e de modo a que a localidade Mosteiros fosse abrangida, uma vez que o estudo de *catchment area*<sup>1</sup> (Guest & Murray, 1979) não a exclui da possibilidade de ser ocupada pelas escoadas lávicas, além da sua importância em elementos estratégicos e densidade populacional. O limite S inferior é feito pela estrada de acesso à Chã das Caldeiras, por constituir uma infraestrutura importante (Figura 4.5.).

O facto desta área ser uma zona de declive bastante acentuado, facilitando a progressão de escoadas lávicas, apoia esta opção. Os declives elevados diminuem o valor da tensão de cedência, permitindo uma velocidade maior das escoadas lávicas. Também em termos de potencialidades de solos, excluindo o sector relativo ao parque natural, a área em causa compreende uma zona relativamente fértil da ilha (Figura 4.4.).

<sup>1</sup> Área onde terá que se iniciar uma erupção de modo a representar um *hazard* potencial para um determinado elemento com base na análise conjunta das linhas de água e topografia.

### 4.3. CENÁRIOS VULCÂNICOS

Na ausência de um estudo de densidade de centros eruptivos (Fernández, 1997) e da correlação espacial destes com as direcções estruturais referidas (Secção 2.1.), para a geração de cenários *hazard* de escoadas lávicas seleccionaram-se alguns focos eruptivos assumindo uma posição idêntica a algumas das erupções já verificadas. De facto, a reactivação de cones vulcânicos parece ser frequente, pelo menos em alguma das fases dos eventos eruptivos relatados, pela sobreimposição de cones em estruturas pré-existentes.

Outro critério que presidiu à escolha de focos eruptivos foi a possibilidade de algumas povoações serem atingidas, independentemente de constituírem reactivação de cones ou não. Uma vez que as escoadas lávicas seguem um contorno topográfico e têm uma extensão limitada, fez-se um estudo de *catchment area* (p.55).

Para a elaboração de cenários vulcânicos de escoadas lávicas utilizamos os mesmos parâmetros do conjunto-teste de simulações que validou o modelo de simulação de fluxo de lava (Secção 3.6., Tabela 3.2.), com excepção para o número de focos eruptivos que se reduziu a um. Essa opção deve-se à dificuldade de selecção da orientação de fissuras e proximidade de um segundo foco eruptivo. Ainda que algumas direcções estruturais foram referidas na Secção 2.2., nomeadamente com possíveis alinhamentos de cones vulcânicos, a proximidade do segundo foco eruptivo é difícil de seleccionar.

O caso mais paradigmático é o da erupção de 1951, relativamente bem conhecida, onde o distanciamento de cones mais próximos entre os dois campos lávicos desenvolvidos é de 2.8 km (Figura 2.2.), mas que pode ser da ordem dos 800 m entre cones de um dos campos. Note-se ainda que as direcções fissurais também são distintas: NNW-SSE no campo setentrional e NNE-SSW no campo meridional.

As coordenadas ( $x$ ,  $y$ ) dos focos correspondentes à reactivação de cones vulcânicos foram extraídos da cobertura geológica de Torres *et al.*, (1997a) (Figura 2.2.

e 4.2.) que foi digitalizada e inserida em ArcInfo. Os restantes foram alinhados ao longo de uma direcção N-S.

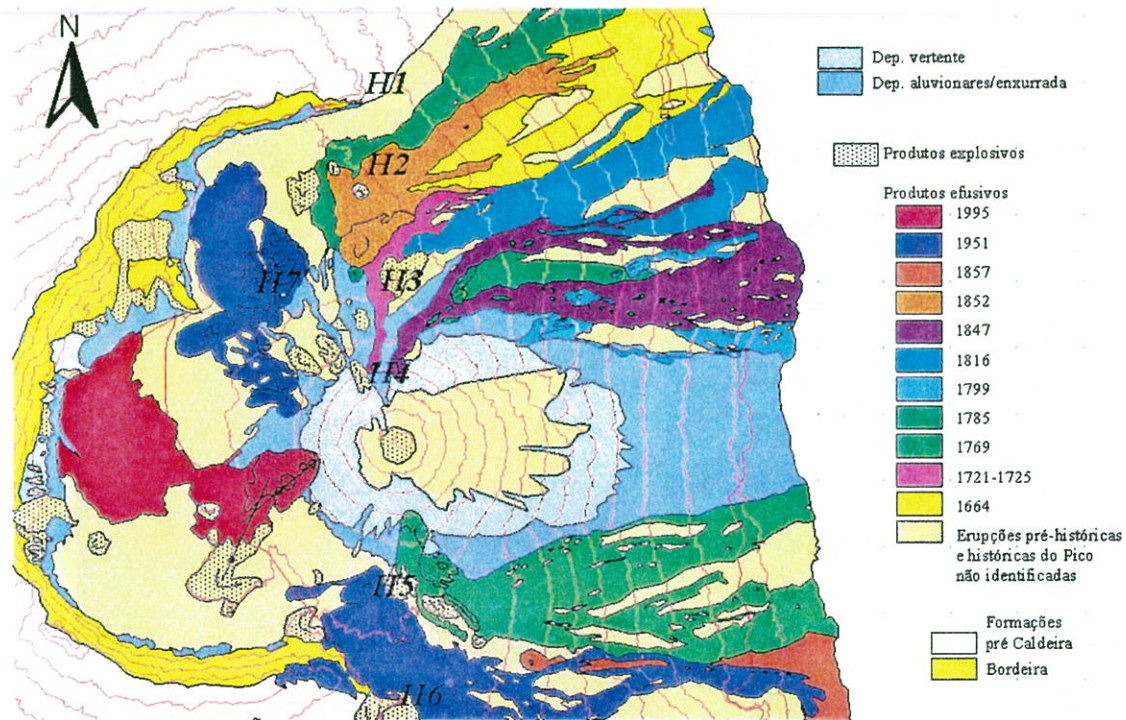


Figura 4.2. Focos eruptivos seleccionados e relação com as erupções da ilha (adaptado de Torres *et al.*, 1997a). H1, H2 e H6 são focos não reactivados.

Os cenários vulcânicos *H*, ou seja a distribuição potencial das escoadas lávicas traduzida em probabilidades, estão expressos na Figura 4.3., calculados com dez imagens simuladas cada um.

O cenário *H7* foi gerado a título demonstrativo de que uma erupção iniciada relativamente dentro do interior da Caldeira, a norte da erupção de 1995, pode aproximar-se do oceano o que sucede definitivamente se se aumentar o número de iterações ou o volume total de lava. Este cenário desenvolve-se sobre um dos focos do campo setentrional da erupção de 1951 e evidencia a importância das mudanças topográficas pelos efeitos construcionais e erosionais que ocorrem em cada erupção,

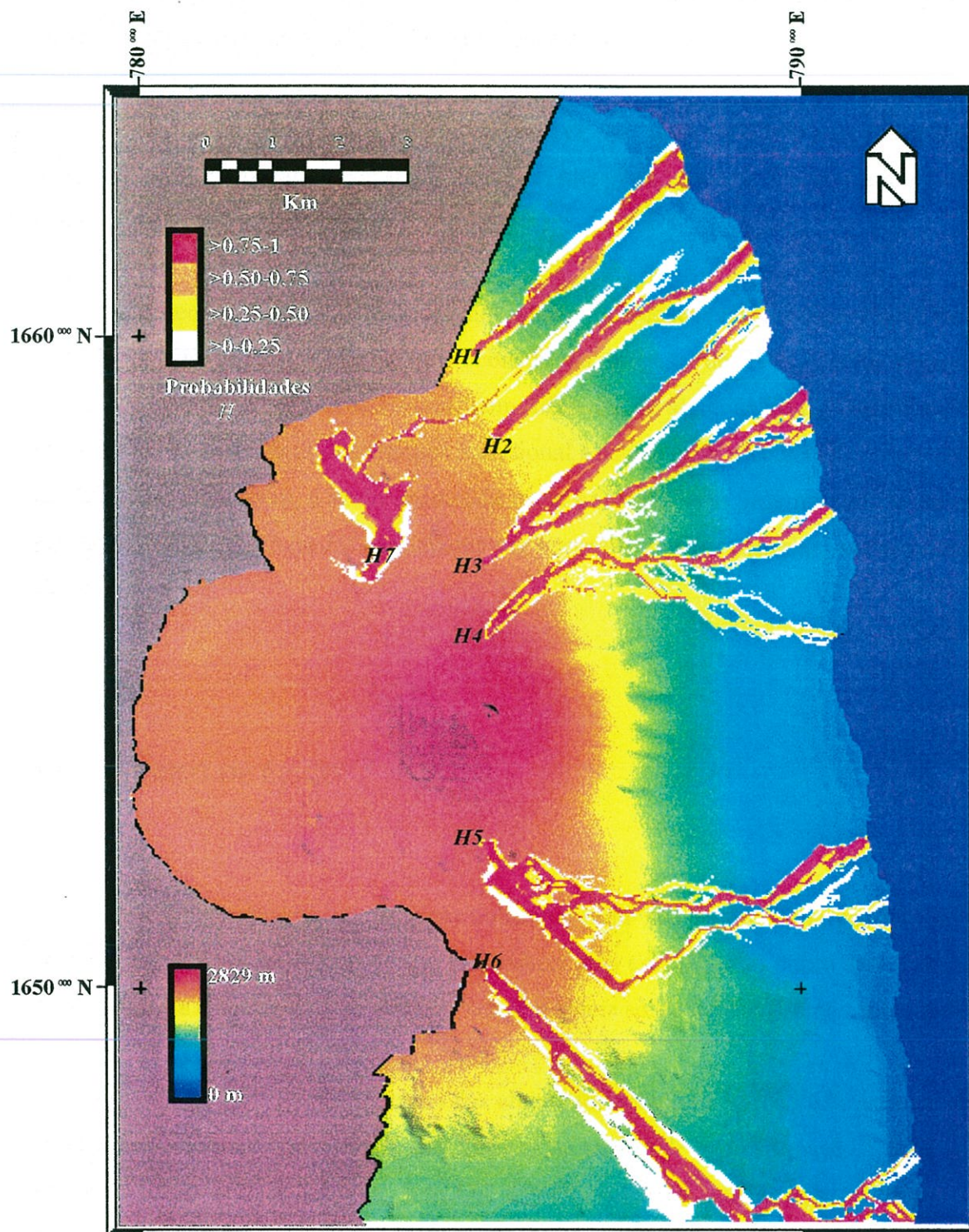


Figura 4.3. Cenários vulcânicos  $H$  para escoadas lávicas no Sector Leste da ilha, calculados com mapeamentos de imagens médias em condições semelhantes às da validação do modelo (Figura 3.13.).

delineando-se um panorama completamente diferente a ser afectado em futuras erupções. O desenvolvimento do cenário *H5* tem um controlo notório pela topografia desenvolvida pelas erupções de 1951 e a erupção de 1769.

O tempo necessário para as simulações é de dois dias, calibrado pela erupção de 1995, no entanto o oceano pode ser atingido em menos tempo, uma vez que um volume considerável de lava fica aí retida.

O desenvolvimento de cenários múltiplos para escoadas lávicas é uma hipótese a considerar, semelhante ao panorama ocorrido na erupção de 1951. Nesta erupção desenvolveram-se dois campos lávicos, com diferença de algumas horas, encontrando-se os focos mais extremos dos campos meridional e setentrional distanciados cerca de 9 km (Figura 2.2.). Assim, a título exemplificativo, por ser o mais próximo com o que se passou, os cenários *H5* ou *H6* conjugados por exemplo com *H7* poderiam ser activados simultaneamente.

#### 4.4. CENÁRIOS DE RISCO

A avaliação interactiva de risco vulcânico num SIG baseia-se na possibilidade de simular os efeitos derivados de que se produza uma erupção num ponto determinado de uma área de estudo ou de se avaliar a sua incidência sobre o meio (Fernández, 1997).

O primeiro ponto de simulação dos efeitos foi tratado na Secção 4.3. para o caso de escoadas lávicas e constitui um dos factores da análise de risco (Equação 1.1.). Para abordar os outros dois factores, VALOR e VULNERABILIDADE que reflectem o segundo ponto de avaliação, é necessário a interface entre a resultante das simulações e uma base de dados intermédia, de modo a avaliar os efeitos das prováveis escoadas lávicas.

O VALOR traduz os elementos sujeitos a fenómenos *hazard*. Estes podem ser agrupados em população, bens e propriedades e capacidade produtiva (Fournier d'Albe, 1979).

A VULNERABILIDADE, ou seja a probabilidade de perda dos elementos sujeitos às escoadas lávicas, depende de variáveis como as propriedades estruturais dos elementos e da distância destes ao elemento emissor, implicando uma variável tempo. A acessibilidade é uma terceira variável que modifica a VULNERABILIDADE dependendo da proximidade entre elementos de um mesmo tipo e da facilidade de comunicação entre eles.

Neste trabalho, com o objectivo principalmente ilustrativo, simplificam-se significativamente as variáveis VALOR e VULNERABILIDADE. Estimam-se as probabilidades com que um determinado evento de escoadas lávicas pode atingir alguns elementos, calculando-se as áreas equivalentes que seriam directamente afectadas. Ou seja, desenvolve-se um cenário potencial de risco pela interacção de elementos com a resultante do modelo de simulação de fluxo de lava, sem atribuir critérios de valor que distingam cada um dos diferentes elementos sujeitos ao *hazard*. Neste caso assume-se, por simplicidade de representação, que a VULNERABILIDADE é de 100%.

Além do facto do mapeamento simulado das escoadas lávicas ser em estrutura *raster*, facilitando a interface com dados do mesmo tipo, outras vantagens levam a seleccionar este modo de representação em SIG em vez de uma estrutura vectorial (Secção 3.4.) para os restantes dados utilizados nos cenários de risco. Estas vantagens incluem uma estrutura de dados simples, uma fácil sobreposição e combinação de dados, assim como uma maior facilidade em distintos tipos de análise espacial (Bonham-Carter, 1996, Burrough, 1996).

Uma das desvantagens da estrutura *raster* é o uso de células de dimensões grandes relativamente aos objectos que representam, implicando desvios importantes no cálculo de áreas. Este problema está relativamente minimizado, uma vez que o valor de célula escolhida em relação aos objectos que representam não é elevado (15x15 m). Os

objectos mais problemáticos são as edificações e a rede viária, cuja unidade de medida mínima passa a ser a do pixel.

Os dados introduzidos em ArcInfo em *layers* sobreponíveis, alfanuméricos, das edificações, rede viária e ocupação potencial e actual de solos foram rasterizados para pixéis de 15x15 m.

#### 4.4.1. ELEMENTOS SUJEITOS A HAZARD

##### i) POPULAÇÃO

Com algumas lacunas a nível de CENSOS90 (Secção 2.4.), a alternativa consistiu em agrupar por localidade a população, havendo mesmo assim locais que não são mencionados. Além do mais, uma proporção considerável da população encontra-se em áreas dispersas, ignorando-se o seu número. Optou-se por traçar envolventes quando existem dados de áreas habitadas. O acréscimo populacional previsto de 1.2% até ao ano 2000 (SECP, 1985) foi introduzido.

Um aspecto importante é o facto dos valores do CENSOS90 (1992) terem uma subestimação de 38% relativamente aos valores da Chã das Caldeiras determinados em 1995. Este valor não pode ser extrapolado para o restante sector em estudo pelo facto da Chã das Caldeiras reunir condições particulares de produção agrícola e paisagísticas, embora uma subestimação geral de ordem menor seja o mais provável.

Na Figura 4.5. estão expressas as envolventes de agrupamentos populacionais. O número total de pessoas estimado na área seleccionada é de 6983. Ao estabelecer cenários de risco entra-se somente em linha de conta com a possibilidade de essas envolventes serem tocadas, implicando a deslocação das pessoas.

##### ii) BENS E PROPRIEDADES

Este grupo inclui a distribuição de infraestruturas e recursos energéticos, dos quais foi introduzida a rede viária.

Outro grupo inserido em ArcInfo foi o das edificações, não se tomando em conta o seu estado e caracterização.

Ambos foram baseados em SCEP (1979).

### iii) CAPACIDADE PRODUTIVA

A capacidade produtiva é restringida à ocupação potencial e uso actual de solos, uma vez que o número de estruturas industriais ou produtivas na área é bastante limitado e que a agricultura representa uma das principais fontes de rendimento.

O mapa de ocupação potencial e actual de solos (Figura 4.4.) foi digitalizado e classificado com base na utilização de solos preconizada na notícia explicativa da Carta de Zonagem Agro-Ecológica e da Vegetação de Diniz & Matos (1987), adaptando-se ao mapa dos mesmos autores. No sector da Caldeira utilizaram-se os dados de Correia & Costa (1995) cedidos em formato digital.















## 4.4.2. DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS

O conjunto de operações necessárias para avaliar os efeitos do *hazard* probabilístico de escoadas lávicas calculado na Secção 4.3. sobre os elementos a ele sujeitos (Secção 4.4.1.) pertencem à categoria de operações de análise espacial.

As operações entre os diferentes dados *raster*, simulados ou reais, de modo a conecta-los entre si, são feitas com operadores matemáticos básicos como adições ou diferenças e/ou utilizando operadores lógicos do tipo *if...then...else...*


Para extracção dos resultados estatísticos das operações matriciais transformaram-se os dados finais em regiões ou seja áreas de valor uniforme. Para simplificar a sequência de passos que levam à sobreposição e intersecção de mapas no cálculo de áreas potencialmente afectadas, desenvolveram-se algoritmos permitindo extrair os resultados por classes de probabilidades de escoadas lávicas para os diferentes códigos dos restantes mapas.


## Utilização potencial de solos

-  Cultivo de vinha ou reserva natural
-  Preservação do coberto vegetal ou florestação com espécies adaptáveis
-  Pastagem natural extensiva
-  Cultura ou pastagem extensiva
-  Escoada, cone e focos de 1995 (adaptado de TORRES et.al.1997)
-  Culturas, melhoramento, pastagem e florestação
-  Culturas e pastagem melhorada
-  Sequeiro em áreas favoráveis
-  Intensificação cultural
-  Parque natural da Chã das Caldeiras ou reserva natural
-  Culturas pouco exigentes
-  Culturas anuais e alternância de utilização pastoril
-  Culturas diversas em manchas recobertas piroclastos
-  Núcleos habitacionais

## Ocupação actual

(Ministério da Agricultura de Cabo Verde)

-  Culturas diversas (feijão congo, mandioca, batata doce, vinha e fruteiras)

0 1 2  
  
 km

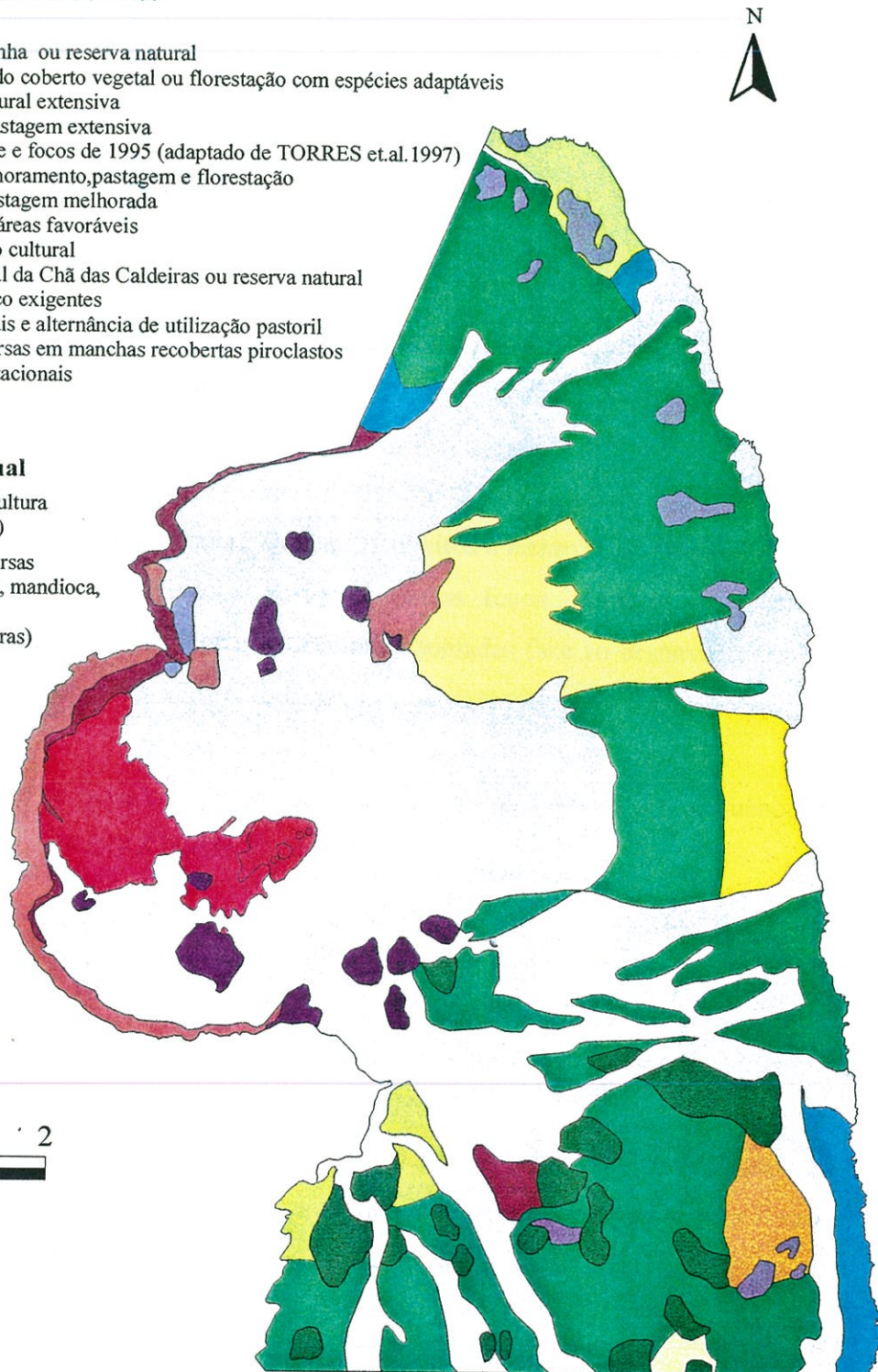


Figura 4.4. Mapa de aproveitamento potencial e actual de solos. Adaptado de Dinis & Matos (1987). Sector da Caldeira adaptado de Correia & Costa (1995).

Visualmente estão expressos na Figura 4.5. a sobreposição dos novos dados de partida, com o uso actual e potencial de solos, edificações, rede viária e o conjunto de cenários *H*, dando origem aos cenários *R*.

O resultado das operações matriciais entre a rede viária, edificações, envolventes populacionais e probabilidades das escoadas lávicas sobre os anteriores, contabiliza as áreas afectadas em hectares assim com a área total coberta pelos potenciais cenários *H* (Tabela 4.1.).

Pelo desenvolvimento de vários cenários de risco *R* é possível comparar os efeitos que cada um deles poderá ter sobre distintos objectos e avaliar situações com risco potencial variável.

A informação conjunta sobre elementos sujeitos a *hazard* e as probabilidades de ocorrência de escoadas lávicas a partir de certos focos eruptivos, referenciados espacialmente, facilita as decisões que devem ser tomadas face ao desenvolvimento de uma crise vulcânica ou no caso de elaboração de planos territoriais a médio prazo.

Em termos de área emersa coberta, para os vários cenários *R* a sequência é a seguinte:  $R1 < R7 < R2 < R4 < R5 < R3 < R6$  (Tabela 4.1.).

Os cenários *H1* e *H3* são os que danificam mais estradas e o *H1* é também o que afecta maior número de edificações (9.337 ha), seguido pelo cenário *H3* (7.988 ha). A destruição de edificações é significativamente mais baixa para os restantes cenários.

Em termos populacionais, com todas as reservas já referidas e considerando que o facto de uma escoada lávica tocar alguma das envolventes, abrange apenas a maior probabilidade de movimentação da população, as áreas mais afectadas são as que resultam dos cenários *H1* e *H4*.

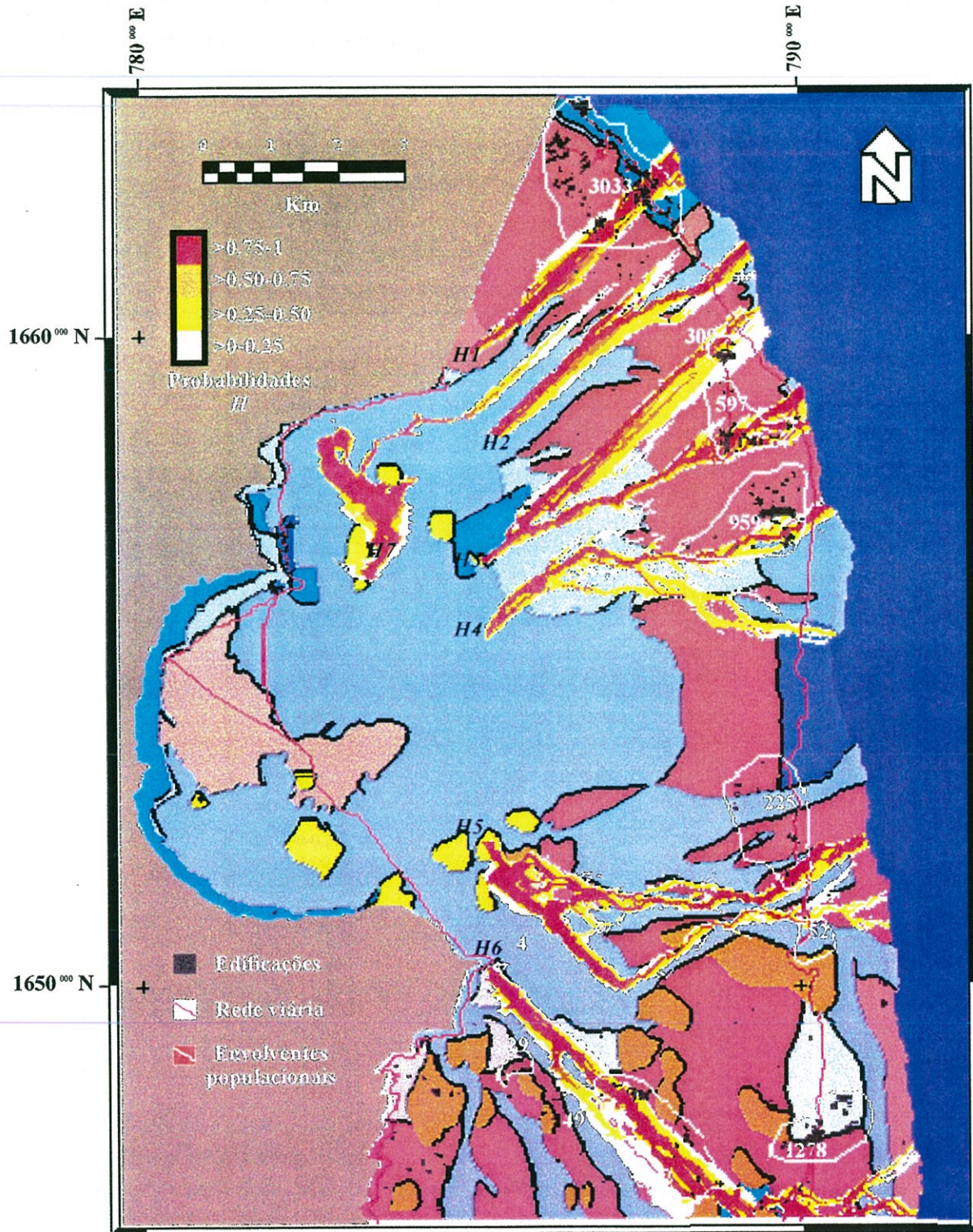


Figura 4.5. Cenários de risco potencial *R* gerados pela sobreposição dos cenários *H* e rede viária, edificações e ocupação potencial e actual de solos (Figura 4.4.).

A geração de cenários múltiplos será potencialmente perigosa para combinações do tipo  $R3$  e  $R4$  que poderá dificultar a movimentação da população. Neste caso a evacuação da população só poderá ser por via marítima.

Tabela 4.1. - Áreas e nº de pessoas afectadas por potenciais escoadas lávicas (Figura 4.3.)

CENÁRIOS	Escoadas Lávicas (probabilidades)	Área afectada (hectares)			Pessoas (nº nas envolventes)
		Rede viária	Edificações	Área Coberta	
$H_1$	>0-0.25	3.600	1.980	33.344	3033
	>0.25-0.50	0.360	1.125	41.153	
	>0.50-0.75	0.720	1.012	24.121	
	>0.75-1	0.720	5.220	85.428	
	Total	5.400	9.337	184.046	
$H_2$	>0-0.25	0.248	0.046	52.268	-
	>0.25-0.50	0.113	0.069	56.003	
	>0.50-0.75	0.113	0	28.531	
	>0.75-1	0.158	0	85.636	
	Total	0.632	0.115	222.438	
$H_3$	>0-0.25	0.720	1.823	113.332	309 597
	>0.25-0.50	0.518	2.925	113.873	
	>0.50-0.75	1.530	0.945	58.929	
	>0.75-1	1.913	2.295	144.261	
	Total	4.681	7.988	430.395	
$H_4$	>0-0.25	0.495	0.360	93.353	959
	>0.25-0.50	0.270	1.620	100.104	
	>0.50-0.75	0.023	0.225	42.661	
	>0.75-1	0.315	0.338	77.940	
	Total	1.103	2.543	314.058	
$H_5$	>0-0.25	0.428	0.046	98.596	225 52
	>0.25-0.50	0.023	0.023	112.974	
	>0.50-0.75	0.405	0.046	28.329	
	>0.75-1	0.428	0.230	180.971	
	Total	1.284	0.345	420.870	
$H_6$	>0-0.25	1.508	0.765	147.354	4 497
	>0.25-0.50	0.270	1.845	89.888	
	>0.50-0.75	0.450	0.360	28.464	
	>0.75-1	0.225	0.968	167.550	
	Total	2.453	3.938	433.256	
$H_7$	>0-0.25	0	0.023	57.353	-
	>0.25-0.50	0	0	36.685	
	>0.50-0.75	0	0	15.998	
	>0.75-1	0	0	108.113	
	Total	0	0.023	218.149	

A área total ocupada pelas diferentes probabilidades de escoadas lávicas pode traduzir-se pelas ocupações potenciais e actuais de solos (Figura 4.6.), pela intersecção das imagens simuladas  $H$  com o mapa de ocupação potencial e actual de solos (Figura

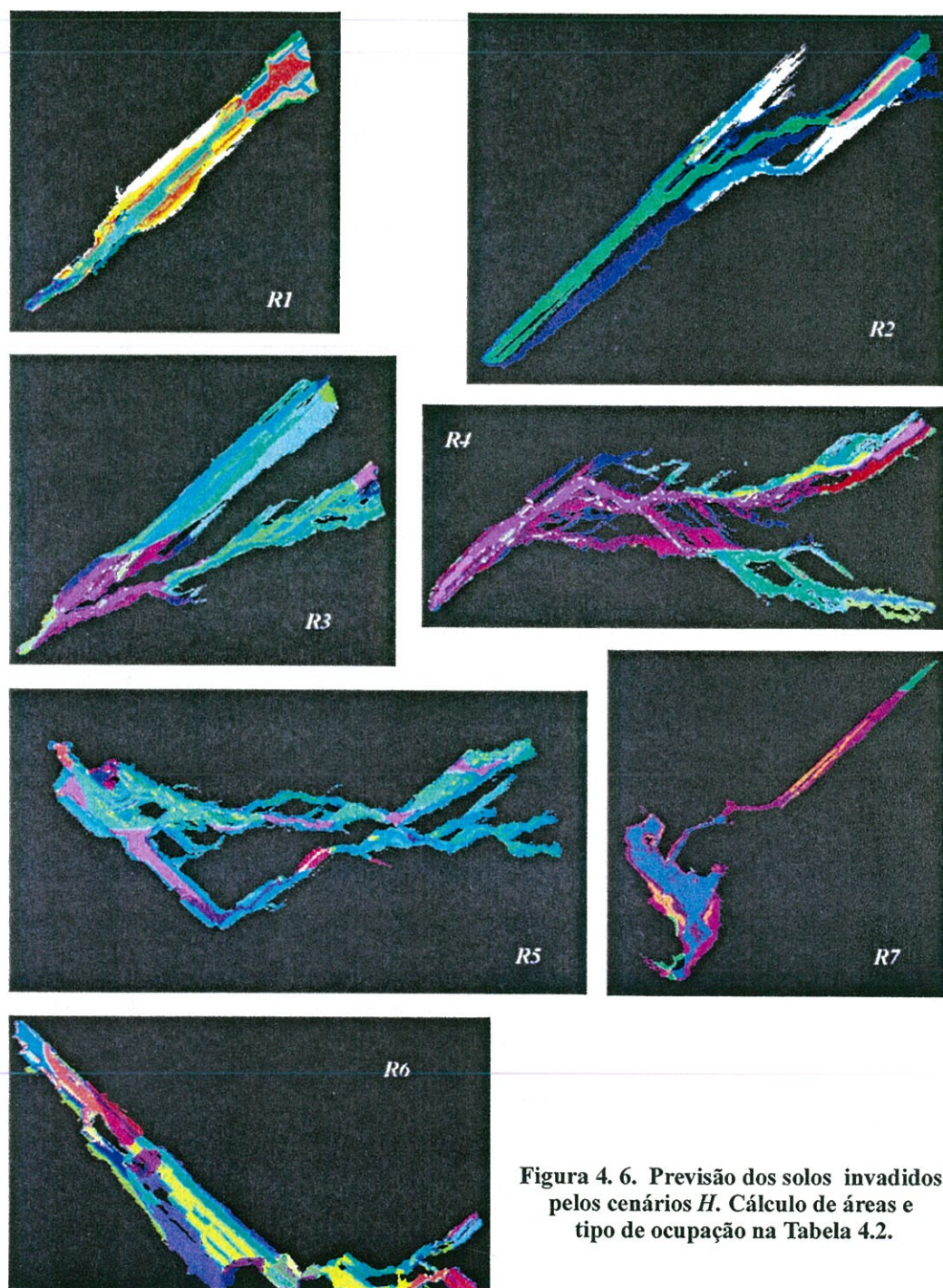


Figura 4. 6. Previsão dos solos invadidos pelos cenários *H*. Cálculo de áreas e tipo de ocupação na Tabela 4.2.

4.5.). Na Tabela 4.2. estão discriminados os tipos de solos afectados por diferentes probabilidades.

Tabela 4.2. - Solos ocupados pelas escoadas lávicas em função de cenários vulcânicos *H*.

CENÁRIOS	Ocupação potencial e actual de solos afectada (hectares)	Escoadas lávicas (probabilidades)			
		>0-0.25	>0.25-0.50	>0.50-0.75	>0.75-1
<i>H</i> <sub>1</sub>	Pastagem natural extensiva	23.805	22.995	16.628	45.873
	Cultura ou pastagem extensiva	1.417	2.700	0.878	6.502
	Parque natural da Chã das Caldeiras ou reserva natural	1.350	2.925	1.328	7.718
	Culturas diversas em manchas recobertas de piroclastos	6.772	12.533	6.165	25.335
<i>H</i> <sub>2</sub>	Pastagem natural extensiva	28.575	22.343	5.468	27.811
	Parque natural da Chã das Caldeiras ou reserva natural	23.693	33.660	23.063	57.825
<i>H</i> <sub>3</sub>	Cultivo de vinha ou reserva natural	-	-	-	0.823
	Pastagem natural extensiva	81.517	83.970	43.583	83.780
	Sequeiro em áreas favoráveis	23.693	24.818	13.253	48.983
	Parque natural da Chã das Caldeiras ou reserva natural	6.277	5.085	2.093	7.200
	Ocupação actual	1.845	0.810	0.518	4.298
<i>H</i> <sub>4</sub>	Pastagem natural extensiva	28.125	44.888	4.208	49.096
	Sequeiro em áreas favoráveis	41.558	50.288	35.190	8.707
	Parque natural da Chã das Caldeiras ou reserva natural	15.300	4.928	3.263	9.248
	Culturas pouco exigentes	8.370	-	-	-
<i>H</i> <sub>5</sub>	Cultivo de vinha ou reserva natural	1.755	1.845	0.338	4.295
	Pres. Do coberto vegetal ou florest.c/espécies adaptáveis	3.240	5.243	2.048	6.680
	Pastagem natural extensiva	41.153	56.543	10.148	106.662
	Parque natural da Chã das Caldeiras ou reserva natural	52.448	49.343	16.133	63.334
<i>H</i> <sub>6</sub>	Pres. Do coberto vegetal ou florest.c/espécies adaptáveis	7.988	3.083	1.373	12.511
	Pastagem natural extensiva	87.323	48.195	14.648	80.662
	Cultura ou pastagem extensiva	10.867	4.095	1.913	5.535
	Culturas, melhoramento, pastagem e florestação	4.365	4.545	2.070	12.668
	Intensificação cultural	7.538	6.548	1.508	8.685
	Parque natural da Chã das Caldeiras ou reserva natural	-	-	-	33.988
<i>H</i> <sub>7</sub>	Culturas anuais e alternância de utilização pastoril	29.273	23.422	8.325	13.501
	Cultivo de vinha ou reserva natural	4.185	0.945	-	2.857
	Pastagem natural extensiva	5.130	-	-	-
	Parque natural da Chã das Caldeiras ou reserva natural	48.038	34.740	15.998	105.256

Este trabalho pretende mostrar os efeitos que potenciais escoadas lávicas poderão ter sobre este sector da ilha, sobre as áreas que ocupam e que tipo de elementos são atingidos. Não são estabelecidos critérios de valor sobre os diferentes elementos sujeitos a *hazard*, devendo estes serem definidos pelas entidades gestoras da ocupação territorial assim como pela protecção civil.

---

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelação do fluxo de lava desempenha um papel preponderante na avaliação do *hazard* vulcânico, em particular os modelos baseados na discretização do espaço em células pelo facto de serem mais eficazes na estimação da área ocupada pelas escoadas lávicas do que os modelos baseados na resolução de equações de transporte. Entre estes, os Autómatos Celulares (AC) bidimensionais constituem uma abordagem importante, visualizando-se as escoadas lávicas como um sistema dinâmico de células que evoluem no espaço e no tempo. Para essa evolução estabelecem-se regras de transição que definem o fluxo de lava entre células e que são variáveis para cada um dos modelos. Uma das vantagens importantes destes modelos é o facto de haver uma actualização imediata da topografia, factor externo predominante na evolução de uma escoada lávica, devido à especificação discreta do tempo e espaço.

O modelo de simulação de fluxo de lava proposto neste estudo mostra uma boa correlação entre o mapeamento das simulações e os limites cartográficos reais das escoadas lávicas nas fases iniciais da erupção de Abril de 1995, apesar da diferença de escala dos dados que serviram para calibrar a erupção, nomeadamente entre os limites cartográficos e o mapa topográfico que deu origem ao Modelo Digital de Terreno (MDT).

A validação e calibração do modelo foi feita com dois dias da erupção de 1995 que durou dois meses. No entanto, esse intervalo de tempo corresponde ao desenvolvimento de uma escoada arterial em que 1/5 da área total coberta pelas escoadas lávicas desta erupção foi extruído. É pois dos períodos mais importantes para definição do avanço das escoadas lávicas, onde volumes significativos de lava são extruídos mais rapidamente e conseqüentemente implicam medidas de protecção civil mais imediatas.

Especificamente em relação ao modelo de simulação de fluxo de lava, algumas modificações e parâmetros podem ser introduzidos, uma vez que uma das vantagens dos AC é permitir que os sistemas sejam progressivamente mais complexos. Por exemplo, a

multiplicidade de focos eruptivos simultâneos é uma abordagem mais realista para uma tipologia eruptiva do tipo da do Fogo, caracterizada por vulcanismo basáltico fissural com focos eruptivos simultâneos. No entanto, este modelo implica igualmente definições temporais rigorosas, válidas para calibração quando se conhece pormenorizadamente um evento eruptivo, mas não quando se pretende estimar imagens simuladas para prováveis erupções. Ao comportamento reológico das escoadas lávicas, traduzido neste trabalho de um modo simplificado como um parâmetro de viscosidade empírica, poderá ser dado um tratamento mais complexo de acordo com as conclusões de modelos analíticos, nomeadamente considerando o efeito da temperatura na viscosidade. Para eliminar o problema da dependência da rede ou anisotropia, com efeitos visíveis nas simulações, poder-se-à introduzir o algoritmo proposto por Myamoto & Sasaki (1997), em que a propagação de lava passa a ser simétrica em torno de uma célula fonte  $x_0$  numa topografia plana.

Ao desenvolver um modelo geral de avaliação de *hazard* vulcânico para escoadas lávicas, recorrendo a implementação em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), os modelos cartográficos desempenharam um papel fundamental, seja na geração do MDT seja na validação de modelos de simulação de fluxo de lava, seja na determinação de áreas ocupadas por escoadas lávicas ou selecção de potenciais focos eruptivos. A inserção dos elementos sujeitos a *hazard* em SIG, como rede viária, edificações e utilização potencial e actual de solos são fundamentais para a avaliação de risco vulcânico.

Na última parte deste trabalho (Capítulo 4), o desenvolvimento de cenários de *hazard* probabilísticos  $P(z)$  para outros sectores da ilha, em condições semelhantes às da validação do modelo, tem a vantagem de abranger alguma variabilidade nas características pré-definidas para potenciais escoadas lávicas. Pressupõe-se que estes cenários se desenrolam num intervalo equivalente de tempo ao da calibração do modelo, pelo que medidas a desenvolver pela protecção civil devem ter em linha de conta que as áreas invadidas por potenciais escoadas lávicas serão superiores para todo o período de uma provável erupção.

A visualização e estimação da influência das prováveis escoadas lávicas sobre distintas fontes de informação referenciadas espacialmente num SIG aumenta substancialmente a capacidade de decisão das entidades competentes face ao desenvolvimento de uma crise vulcânica. Com efeito, os cenários potenciais de risco desenvolvidos mostram vulnerabilidades que poderão ser minimizados com algumas das medidas preventivas para o *hazard* derivado de escoadas lávicas, como a construção de barreiras protectoras em torno de áreas mais populosas.

A possibilidade de actualização de dados e o desenvolvimento de cenários vulcânicos, torna a conjugação de modelos de simulação de fluxo de lava e SIG em instrumentos poderosos para a mitigação de risco vulcânico. Concretamente, em relação à ilha do Fogo, a sua frequência eruptiva com escoadas lávicas presentes nas últimas erupções históricas, justifica o desenvolvimento de sistemas de bases de dados de modo a estabelecer planos de emergência e de ordenamento territorial a longo prazo, para minimizar o risco inerente a estes fenómenos vulcânicos.

---

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, D. (1993). *Natural Disasters*. UCL Press Limited, University College London, 631.
- ARAÑA, V. & ORTIZ, R. (1993). Riesgo Volcânico. In Marti, J. & Arãna, V. (Eds) *La Volcanologia actual, Nuevas tendencias*. CSIC, Madrid, 277-385.
- BAKER, P.E. (1979). Geological aspects of volcano prediction. *J. Geol. Soc. London* **136**, 341-345.
- BALOGA, S. & PIERI, D. (1986). Time dependent lava flows. *J. Geophys. Res.* **91**, 9543-9552.
- BANKS, J., CARSON II, J. & NELSON, B.R. (1996). *Discrete event system simulation*. Prentice Hall, Inc.
- BARCA, D., CRISCI, G.M., GREGORIO, S. DI & NICOLETTA, F. (1987). Lava flow simulation by celular automata: Pantelleria's examples. In *Proc. Int. ASME Conf. on Modelling and Simulation 4A*, Cairo, Egypt, 9-15.
- BARCA, D., CRISCI, G.M., GREGORIO, S. DI & NICOLETTA, F. (1993). Cellular Automata methods for modelling lava flows: simulation of the 1986-87 eruption, Mount Etna, Sicily. In Kilburn, C.J. & Luongo, G. (Eds) *Active lavas*. UCL Press Limited, University College London, 291-309.
- BARCA, D., CRISCI, G.M., GREGORIO, S. DI & NICOLETTA, F. (1994). Cellular Automata for simulating lava flows: a method and examples of the Etnean eruptions. *Transport Theory and Statistical Physics* **23**, 195-232.
- BARMEN, G., CARVALHO, V. & QUERIDO, A. (1990). Groundwater-Related Geological and Isotopic Investigations on the Island of Fogo. Dept. Eng. Geol. Lund Univ. Inst. of Technology, Sweden and INIC, Dept. of Geology, Cape Verde.
- BEBIANO, B. (1932). *A Geologia do Arquipélago de Cabo Verde*. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal **XVIII**, Lisboa, 275.
- BLONG, R.J. (1984). *Volcanic hazards. A sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press, 424.

- BLONG, R.J. (1996). Volcanic Risk Assessment. In Scarpa/Tilling (Eds) *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer-Verlag.
- BOGHOSIAN, B.M. (1990). Lattice Gases. In *1989 Lectures in Complex Systems*, Erica Jen (Ed.) II. Addison Wesley, Redwood City, CA.
- BONHAM-CARTER, G.R. (1996). *Geographic Information Systems for Geoscientists. Modelling with GIS*. Computer Methods in the Geosciences. Daniel Merriam, Series Editor. Pergamon.
- BORGIA, A. & LINNEMAN, S.R. (1990). On the evolution of lava flow and the growth of volcanoes. In Fink, J.H. (Ed.) *Lava flows and domes: emplacement mechanisms and hazard implications*. IAVCEI Proceedings In Volcanology 2. Springer Verlag, 208-243.
- BRUM DA SILVEIRA, A., MADEIRA, J., SERRALHEIRO, A., TORRES, P.C., SILVA, L.C. & MENDES, M.H. (1997a). O controlo estrutural da erupção de Abril de 1995 na ilha do Fogo, Cabo Verde. In *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 51-62.
- BRUM DA SILVEIRA, A., MADEIRA, J. & SERRALHEIRO, A. (1997b). A estrutura da ilha do Fogo, Cabo Verde. In *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 63-78.
- BURROUGH, P.A. (1996). *Principles of Geographical Information System for Land Resources Assessment*. Oxford University Press Inc., N.Y., 194.
- CHESTER, D. (1993). *Volcanoes & Society*. University of Liverpool. Edward Arnold, London.
- CHESTER, D.K., DUNCAN, A.M., GUEST, J.E. & KILBURN, C.J. (1985). *Mount Etna: the anatomy of a volcano*. Chapman & Hall, Ltd., London, 404.
- CENSOS90 (1992). 2º Recenseamento Geral da População e Habitação. Direcção de Estatísticas Demográficas e Sociais I, II. Direcção Geral de Estatística de Cabo Verde.
- CORREIA, E. & COSTA, F.L. (1995). Breve notícia da recente erupção na ilha do Fogo e suas consequências. *Finisterra, Revista Portuguesa de Geografia* XXX (59), 141-151.

- CORREIA, J., ARAÚJO, M.G.M. & NASCIMENTO, J. (1997). Impactos Sócio-Económicos da Erupção de 1995 na Ilha do Fogo. In *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 325-334.
- COURTNEY, R.C. & WHITE, R.S. (1986). Anomalous heat flow and geoid across the Cape Verde Rise: evidence for dynamic support from a thermal plume in the mantle. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* **87**, 815-867.
- CRANDELL, D., BOOTH, B., KAZUMADINATA, K., SHIMOZURU, D., WALKER, G. & WESTERCAMP, D. (1984). *Source-book for Volcanic-Hazards Zonation*. UNESCO, France, 97.
- CRISCI, G.M., GREGORIO, S. DI & RANIERI, G. (1982). A cellular space model of basaltic lava flow. In *Proc. Int. Conf. Applied Modelling and Simulation 82*, **11**, 65-67, Paris, France.
- CRISCI, G.M., GREGORIO, S. DI, PINDARO, O. & RANIERI, G. (1986). Lava flow simulation by a discrete cellular model: first implementation. *Int. Journal of Modelling and Simulation* **6**, 137-140.
- CRISP, J. & BALOGA, S. (1990). A model for lava flows with two thermal components. *J. Geophys. Res.* **95**, 1255-1270.
- DAY, S.J., CARRACEDO, J.C., GUILLOU, H., PAIS, F.J., RODRIGUEZ BADIOLA, E., FONSECA, J.F.B.D. & HELENO, S.I.N. (*in press*). Comparison and cross-checking of historic, archaeological and geologic evidence for the location and type of historic and sub-historic eruptions of multiple vent oceanic islands volcanoes. In McGuire (Ed.) *Volcanoes, Earthquakes and Archaeology*, Geological Society, Special Publication.
- DAVIES, G.R., NORRY, M.J., GERLACH, D.C. & CLIFF, R.A. (1989). A combined geochemical and Pb-Sr isotope study of the Azores and Cape Verde hot spots: the geodynamic implications. In Saunder, A.D. & Norry, M.J. (Eds) *Magmatism in the Ocean Basin*. J.Geol.Soc., Sp Public. **42**, 231-255.
- DASH, B.P., BALL, M.M. KING, G.A., BUTLER, L.W. & RONA, P.A. (1976). Geophysical Investigation of the Cape Verde Archipelago. *J. Geophys. Res.* **81**, 29, 5249-5259.

- DE LA CRUZ-REYNA, S. (1996). Long Term Probabilistic Analysis of Future Explosive Eruptions. In Scarpa/Tilling (Eds) *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer-Verlag.
- DE PAEPE, P., KLERKX, J. HERTOGEN, J. & PLINKE, P. (1974). Oceanic tholeiites on the Cape Verde islands: Petrochemical and Geochemical Evidence. *Earth and Planetary Science Letters* **22**, 347-354.
- DINIZ, A.C & MATOS, G.C. (1987). Carta de Zonagem Agro-Ecológica e da Vegetação de Cabo Verde. II - Ilha do Fogo. Garcia de Orta, Sér. Bot., Lisboa, **9** (1-2), 35-70.
- DOBRAN, F., BARBERI, F. & CASAROSA, C. (1990). Modeling of volcanological processes and simulation of volcanic eruptions. CNR Gruppo Naz. Volcanol. Italia. Repport VSG90-01, 85.
- DRAGONI, M. (1989). A dynamical model of lava flows cooling by radiation. *Bull. Volcanol.* **51**, 88-95.
- DRAGONI, M., BONAFEDE, M. & BOSCHI, E. (1986). Downslope flow models of a Bingham liquid: implications for lava flows. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **30**, 305-325.
- DUNCAN, A., CHESTER, D. & GUEST, J. (1981). Mount Etna Volcano: Environmental impact and problems of volcanic prediction. *The Geographical Journal* **147** (2), 164-178.
- DUNCAN, R.A. (1980). Hotspots in the Southern Ocean - an absolute frame of reference for the motion of Gondwana continents. *Tectonophysics* **74**, 29-42.
- ESRI (1992). Environmental Systems Research Institute, Inc. ArcInfo.
- FELPETO, A., GARCIA, A. & ORTIZ, R. (1996). Mapas de Riesgo. Modelización. In Ortiz, R.(Ed.) *Riesgo Volcánico*. Série Casa de los Volcánes **5**, Servicio de Publicaciones Cabildo de Lanzarote, Canarias.
- FERNÁNDEZ, F.G. (1997). *Desarrollo de una metodología para el analisis del riesgo volcánico en el marco de un sistema de informacion geografica*. Tese de doutoramento. CSIC. Universidad Complutense de Madrid.
- FINK, J.H. (1990). *Lava flows and domes. Emplacement mechanisms and hazard implications*. Springer-Verlag.

- FOURNIER D'ALBE, E.M. (1979). Objectives of volcanic monitoring and prediction. *J. Geol. Soc. London* **136**, 321-326.
- FRANCIS, P. (1993). *Volcanoes: a planetary perspective*. Oxford University Press, 443.
- GASPAR, J.L., WALLENSTEIN, N., QUEIROZ, G., FERREIRA, T., COUTINHO, R. & MOTA GOMES, A. (1995a). Esboço cartográfico da erupção vulcânica da Ilha do Fogo (Cabo Verde) - Desenvolvimento de escoadas lávicas até ao dia 11 de Abril de 1995. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores. *In Bull. Global Volcanism Network* **20** (3).
- GASPAR, J.L., WALLENSTEIN, N., QUEIROZ, G., FERREIRA, T., COUTINHO, R. & MOTA GOMES, A. (1995b). Resumo da actividade vulcânica registada na ilha do Fogo (Cabo Verde), nos meses de Abril e Maio de 1995. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, *IV Congresso Nacional de Geologia, Memória nº4*, 1005-1007, Porto, Dezembro 1995.
- GERLACH, D.C., CLIFF, R.A., DAVIES, G.R., NORRY, M. & HODGSON, N. (1988). Magma sources of the Cape Verde archipelago: isotopic and trace elements constraints. *Geochem. Cosm. Acta* **52**, 2979-2992.
- GUEST, J.E. & MURRAY, J.B. (1979). An analysis of hazard from Mount Etna Volcano. *J. Geol. Soc. London* **136**, 347-354.
- HELENO DA SILVA, S., FOULGER, G.R., BARROS, I.J., QUERIDO, A., WALKER, A.B. & FONSECA, J.F.B. (1997). Seismic Activity in Fogo and Brava islands. *In A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 79-91.
- HULME, G. (1974). The interpretation of lava flow morphology. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* **39**, 361-383.
- I.H. (1971). *Roteiro do Arquipélago de Cabo Verde V*. Instituto Hidrográfico, Lisboa.
- ISHIHARA, K., IGUCHI, M. & KAMO, K. (1990). Numerical simulation of lava flows on some volcanoes in Japan. *In Fink, J.H. (Ed.), Lava flows and domes: emplacement mechanisms and hazard implications*. IAVCEI Proceedings in Volcanology. Springer Verlag, 174-207.

- KILBURN, C.J. (1993). Lava crusts, aa flow lengthening and the pahoehoe-aa transition. *In* Kilburn, C.J. & Luongo, G. (Eds) *Active Lavas*. UCL Press Limited, University College London, 263-280.
- KILBURN, C.J. & GUEST, J.E. (1993). Aa lavas of Mount Etna, Sicily. *In* Kilburn, C.J. & Luongo, G. (Eds) *Active Lavas*. UCL Press Limited, University College London, 73-106.
- KILBURN, C.J., PINKERTON, H. & WILSON, L. (1995). Forecasting the behaviour of lava flows. *In* McGuire, B., Kilburn, C.J. & Murray (Eds) *Monitoring Active Volcanoes*. UCL Press Limited, University College London, 346-368.
- KLERX, J. & DE PAEPE, P. (1971). Cape Verde Islands: Evidence for a Mesozoic Oceanic Ridge. *Nature Physical Science* **233**, 117-118.
- LAW, A.M. & KELTON, W.D. (1982). *Simulation, Modeling and Analysis*. McGraw Hill, Inc.
- LE GUERN (1997). Lutte contre la perte de terres cultivées. *In* *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 323-324.
- MACEDONIO, G. (1994). A 3-dimensional model for lava flows. CEC Contract EV5V-CT92-0190-Final Report, Commission for the European Community.
- MACEDONIO, G., PARESCHI, M.T. & SANTACROCE, R. (1990). A simple model for lava hazard assessment: Mount Etna. *In* *Proc. of the International Volcanological Congress*, Mainz, Germany. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI).
- MACEDONIO, G. (*in press*). Modeling of effusive eruptions. *Volcanic Hazard Assessment, Monitoring and Risk Mitigation*. Proceedings of the EC Advanced Study Course. Centro de Vulcanologia, Univ. dos Açores.
- MACHADO F. (1965). Mechanism of Fogo Volcano, Cape Verde Islands. *Garcia de Orta* **13**, 1, 51-56.
- MACHADO F. & ASSUNÇÃO, C.T. (1965). Carta Geológica de Cabo Verde; Notícia explicativa da Ilha do Fogo. *Garcia de Orta* **13**, 4, 596-604.
- MADEIRA, J., BRUM DA SILVEIRA, A. & TORRES, P.C. (1997). Contradição aparente entre os volumes de finais dos derrames e a estimação das taxas de efusão: o caso da erupção do Fogo de 1995. *In* *A Erupção de Abril de 1995 na*

- Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 153-163.
- MIYAMOTO, H. & SASAKI, S. (1997). Simulating lava flows by an improved cellular automata method. *Computers & Geoscience* **23** (3), 283-291.
- NEWHAL, C.G. & SELF, S. (1982). The volcanic explosive index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.* **87**, 1231-1238.
- NLA (1992). Guidelines for preparing volcanic hazard maps. National Land Agency, Government of Japan, Tokyo, 58.
- ORTIZ, R. (Ed.) (1996). *Riesgo Volcánico*. Série Casa de los Volcánes 5, Servicio de Publicaciones Cabildo de Lanzarote. Canarias.
- PARK, S. & IVERSEN, J.D. (1984). Dynamics of lava flow: thickness, growth characteristics of steady two dimensional flows. *Geophys. Res. Lett.* **11**, 641-644.
- PEREIRA, J.L. & BURTON, P.W. (1997). Preliminary results of spectral studies on tectonic and volcanic seismicity in Fogo, Cape Verde. In *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 41-50.
- PINKERTON, H. (1993). Measuring the properties of flowing lavas. In Kilburn, C.J. & Luongo, G. (Eds) *Active Lavas*. UCL Press Limited, University College London, 175-191.
- QUENTAL, L & SOARES, A. (1997). Implementação de um modelo de simulação de fluxo de lava num Sistema de Informação Geográfica. Aplicação à erupção de 1995 da Ilha do Fogo, Cabo Verde. In *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 247-256.
- ROBSON, G.R. (1967). Thickness of Etnean lavas. *Nature* **216**, 251-2.
- RIBEIRO, O. (1960). *A Ilha do Fogo e as suas erupções*. Mem. Série Geográfica I. Minist. Ultramar, J.I.V., Lisboa.
- SCEP (1979). Carta da Ilha do Fogo 1:25 000. República de Cabo Verde. Serviços Cartográficos do Exército de Portugal.
- SECP (1985). *Monografia da Ilha do Fogo*. Monografias Regionais I. Secretaria de Estado da Cooperação e Planeamento. Direcção Geral de Planeamento, Cabo Verde.

- SERRALHEIRO, A. (1970). *Geologia da Ilha de Maio (Cabo Verde)*. Junta de Investigação do Ultramar, Lisboa, 103.
- SETAGRI (1985). *Ilha do Fogo*. Monografia. Ministère Français des Relations Exterieures, Cooperation et Development. Secretaria de Estado da Cooperação e Planeamento, Cabo Verde.
- SILVA, L.C., MENDES, M.H., TORRES, P.C., PALÁCIOS, T. & MUNHÁ, J. (1997). Petrografia e mineralogia das formações encaixantes da erupção de 1995 na ilha do Fogo, Cabo Verde. In *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 165-170.
- SILVESTRE, A. (1994). *Cabo Verde - Na rota da internacionalização*. Grupo de Cooperação de Língua Portuguesa do Instituto Internacional de Caixas Económicas. Scarpa Lda, 130.
- TIEDMANN, H. (1992). *Earthquakes and Volcanic Eruptions. A handbook on risk assessment*. SwissRe, Zurich, 951.
- TILLING, R. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: progress and problems. *Reviews of Geophysics* 27 (2), 237-269.
- TOFFOLI, T. & MARGOLIS, N. (1987). *Cellular Automata machines: a New Environmental for modeling*. MIT Press, Cambridge, MA, 259.
- TORRES, P.C., SILVA, C.S. & GOMES, M. (1995). Geologia e Vulcanologia da Erupção de Abril de 1995 da Ilha do Fogo, Arquipélago de Cabo Verde e Formações Enquadrantes. *Mem. Univ. Porto* 4, 1019-1022.
- TORRES, P.C., MADEIRA, J., SILVA, L.C., BRUM DA SILVEIRA, A., SERRALHEIRO, A. & MOTA GOMES, A. (1997a). Carta geológica das erupções históricas da ilha do Fogo: revisão e actualização. In *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 119-132.
- TORRES, P.C., SILVA, L.C., MENDES, M.H., SERRALHEIRO, A., MADEIRA, J., BRUM DA SILVEIRA, A. & MOTA GOMES, A. (1997b). Cronologia da erupção vulcânica de 1995 da Ilha do Fogo, Cabo Verde. In *A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 133-144.

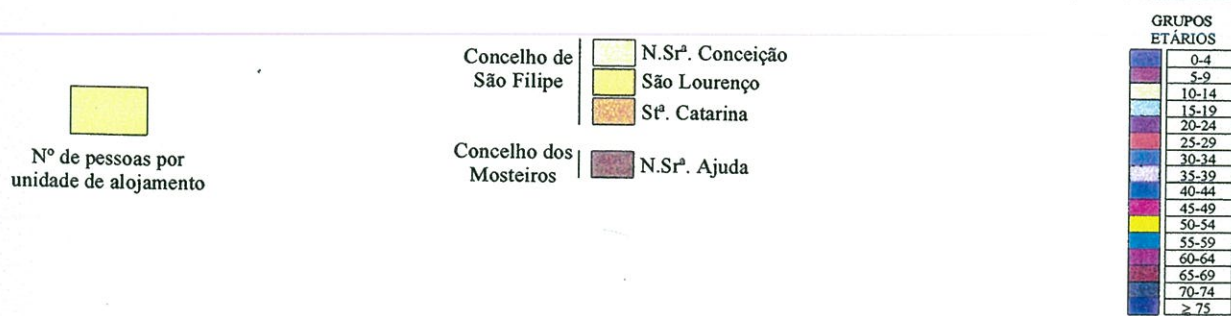
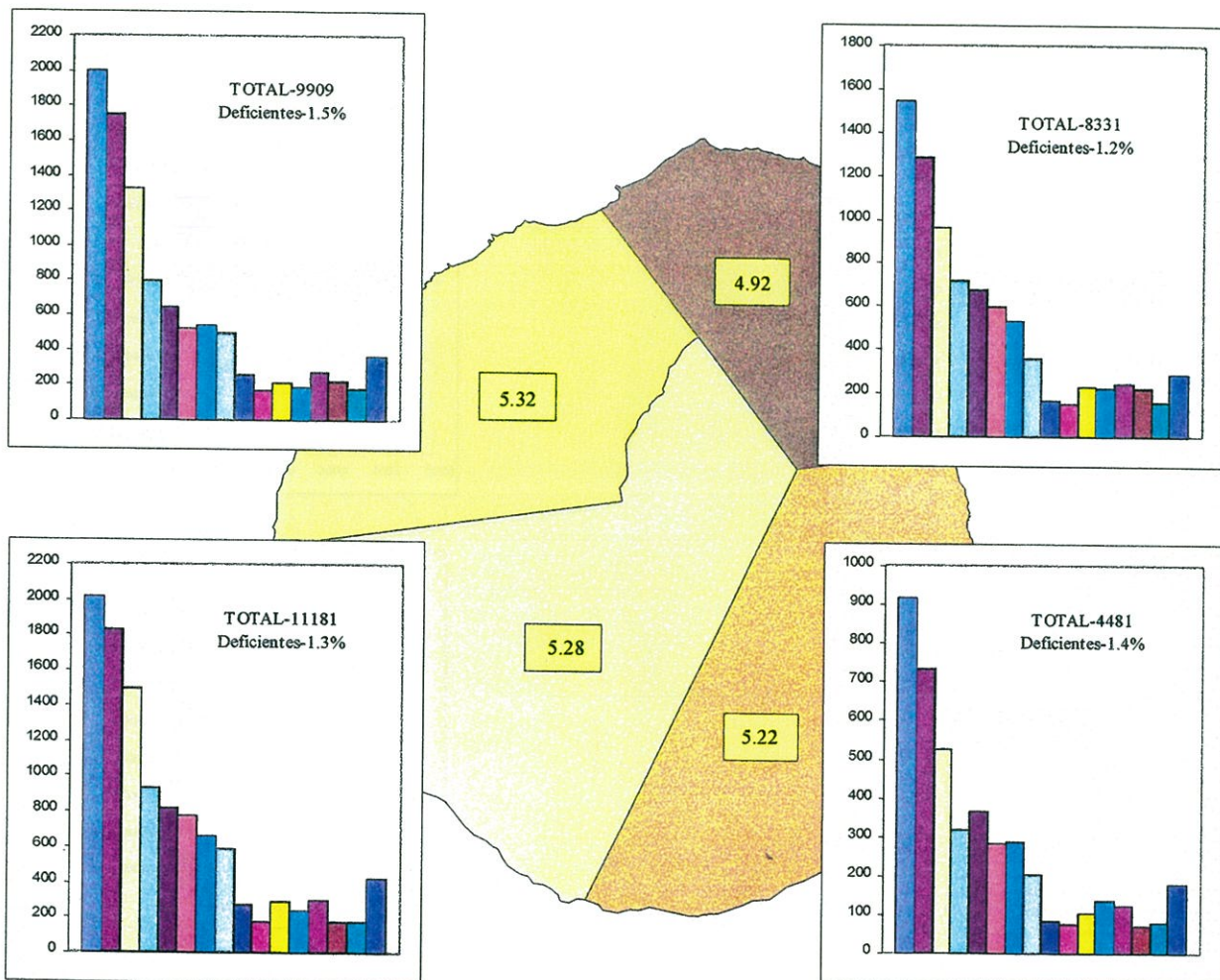
- TORRES, P.C., SILVA, L.C., MENDES, M.H., MUNHÁ, J. & MATA, J. (1998). On the genesis of the Cape Verde islands: tectonic influence. *Actas do V Congresso Nacional de Geologia*, **84** (1), IGM, SGP, B-168-169.
- WADGE, G., YOUNG, P.A.V. & McKENDRICK, I.J. (1994). Mapping lava flow hazard using computer simulation. *J. Geophys. Res.* **99** (B1), 489-504.
- WALLENSTEIN, N., GASPAR, J.L., GUEST, J. & DUNCAN, A. (1997). Estilos eruptivos observados durante a erupção vulcânica de 1995 na ilha do Fogo, Cabo Verde. *In A Erupção de Abril de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde*. Instituto de Investigação Científica e Tropical, Lisboa, 145-152.
- WALKER, G.P.L. (1973). Lengths of Lava Flows. *Phil. Trans. R. Soc. London* **274A**, 107-118.
- WALKER G.P.L. (1974). Volcanic Hazards and the Prediction of Volcanic Eruptions. *In The Prediction of Volcanic Hazards*. Miscellaneous Papers 3 Geol. Soc., London, 23-41.
- WEISBUCH, G. (1994). *Complex Systems Dynamics*. Lecture Notes II, Santa Fé Institute Studies in the Sciences of Complexity. Addison-Wesley Publishing Company.
- WILLIAMS, C.A., HILL, I.A., YOUNG, R. & WHITE, R.S. (1990). Fracture Zones Across the Cape Verde Rise, NE Atlantic. *J. Geol. Soc. London* **147**, 851-857.
- WOLFRAM, S. (1984). Cellular Automata as models of Complexity. *Nature* **311**, 419-424.
- WOLFRAM, S. (1994). *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley Publishing Company, 596.
- VON NEUMANN (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*. Burks, A. (Ed.). Univ. of Illinois Press.
- YOUNG, P. & WADGE, G. (1990). Flowfront: simulation of a lava flow. *Computers & Geosciences* **16**, 8, 1171-1191.
- ZEIGLER, B.P. (1984). *Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation*. Academic Press, London, 372.

---

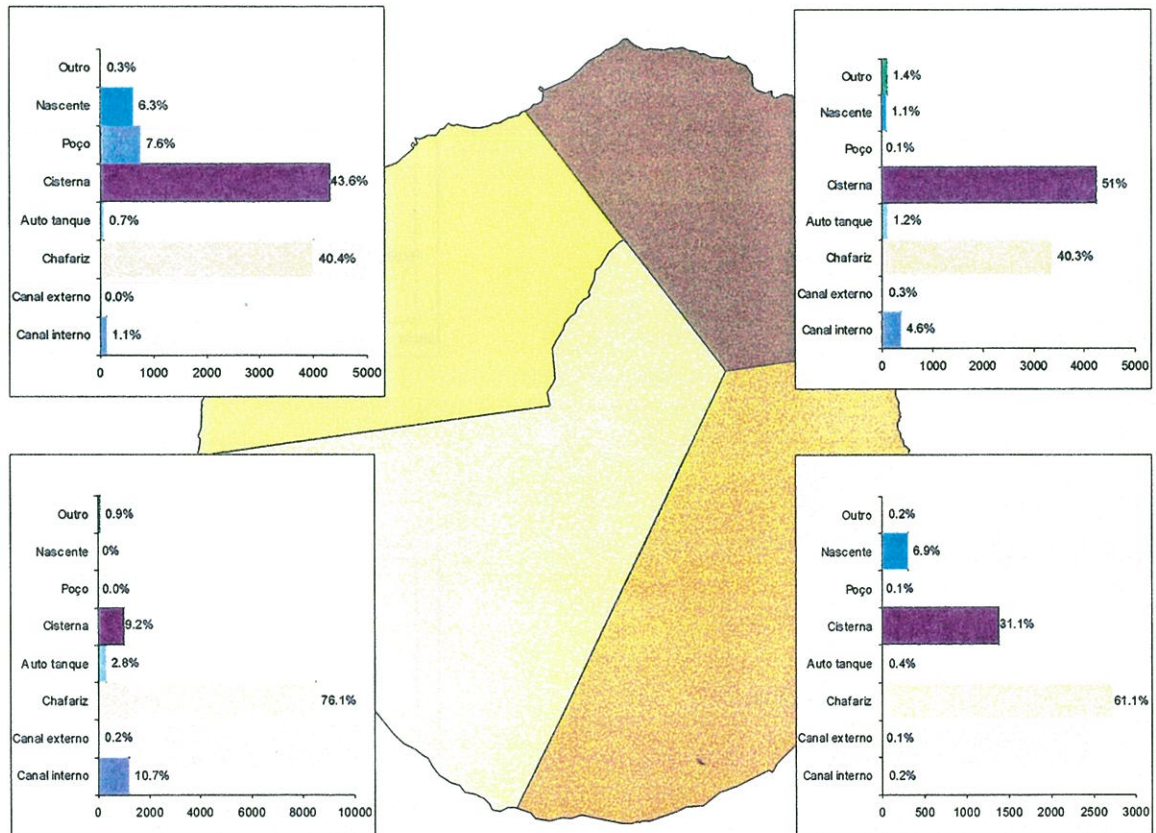


**ANEXOS**

Distribuição populacional por idades na ilha do Fogo e pessoas por unidade de alojamento (fonte CENSOS 90)



Sistemas de abastecimento de água (fonte CENSOS 90)



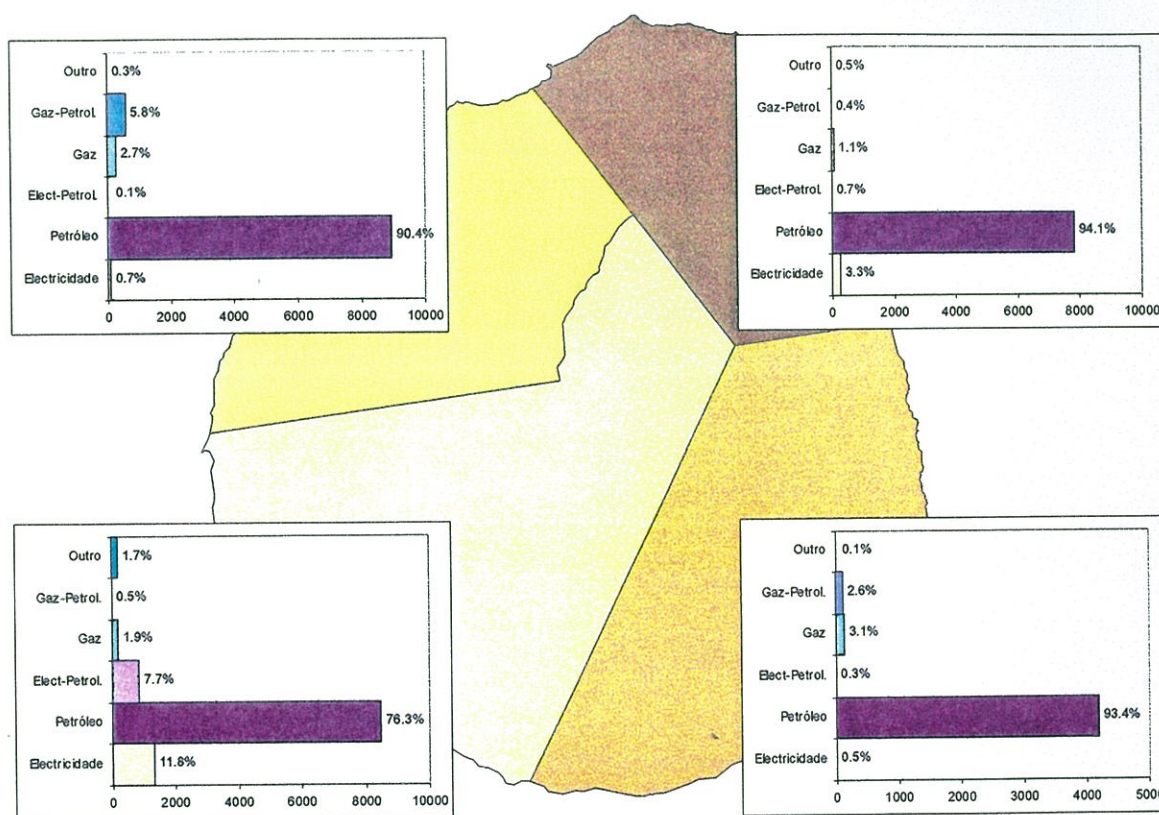
Concelho de São Filipe

- N.ª Sr.ª Conceição
- São Lourenço
- St.ª Catarina

Concelho dos Mosteiros

- N.ª Sr.ª Ajuda

Energia utilizada em função do tipo de iluminação (fonte CENSOS 90)



Concelho de São Filipe | N.ª Sr.ª Conceição  
 São Lourenço  
 St.ª Catarina

Concelho dos Mosteiros | N.ª Sr.ª Ajuda