

J. C. Verde, J. L. Zêzere

RISKam, Avaliação e Gestão de Perigosidades e Risco Ambiental, Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa

AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE E PERIGOSIDADE DE INCÊNDIO FLORESTAL EM PORTUGAL CONTINENTAL

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais têm destruído, em Portugal e nos últimos anos, milhares de hectares, de que são exemplos os mais de 425 mil hectares em 2003 e mais de 300 mil hectares em 2005, tornando-se num sério problema ambiental, social e económico que, entre 1980 e 2008, afectou mais de 3 milhões de hectares. Os incêndios florestais não são um exclusivo português e diversos autores têm dedicado a sua investigação à melhor forma de modelar e cartografar a susceptibilidade e a perigosidade de incêndio florestal, como Chuvieco e Congalton (1989), Verde (2008) e Viegas *et al.* (1999), entre muitos outros. Para além das abordagens estáticas e estruturais de avaliação da susceptibilidade, outros autores têm explorado as correlações entre incêndios e condições meteorológicas, como Lourenço (2004), Pereira *et al.* (2005) e Trigo *et al.* (2006). Neste trabalho focamo-nos na susceptibilidade enquanto propriedade do território e não na sua variação dinâmica em virtude das condições atmosféricas, embora exploremos correlações com a precipitação e temperatura.

2. O MODELO CONCEPTUAL

O modelo conceptual que adoptamos neste trabalho é o mesmo que se utiliza frequentemente para estudar outros fenómenos danosos, seguindo a proposta da UNDRO (1979), e a definição de risco de incêndio florestal proposta por Bachmann e Allgöwer (1999, p.5): «the probability of a wildfire to occur at a specified location and under given circumstances and its expected outcome as defined by the impacts on the affected objects». Em síntese, consideramos a perigosidade de incêndio florestal como a probabilidade de ocorrência, associada à susceptibilidade do território. Neste trabalho não avaliamos risco, apenas perigosidade.

3. AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE

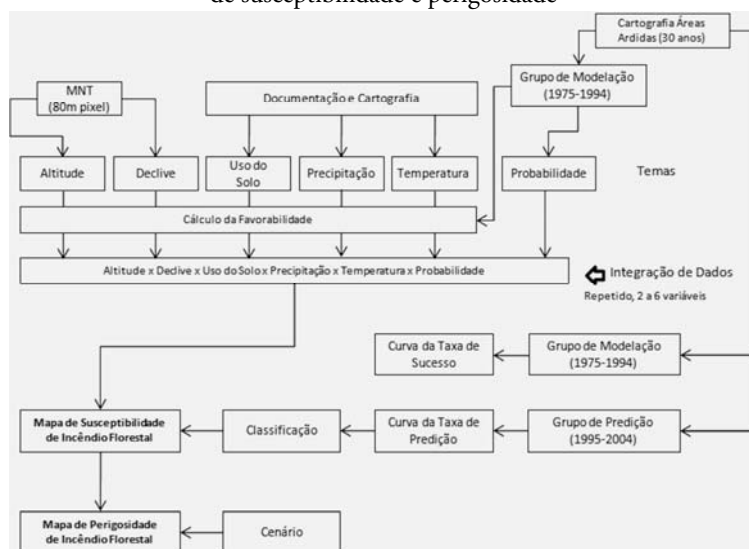
Para avaliação da susceptibilidade, o modelo integra variáveis frequentemente utilizadas em modelação de perigosidade, tais como: altimetria, declive, ocupação do solo, preci-

precipitação média anual, número médio anual de dias com temperatura mínima igual ou superior a 20°Celsius, e o histórico de incêndios (cartografia transformada em probabilidades simples). Realizou-se análise sensítiva para avaliar qual a combinação de variáveis com a melhor capacidade preditiva. A figura 1 sintetiza a metodologia adotada.

3.1. Aquisição de dados e integração das variáveis

A altimetria é um dos factores condicionantes do fogo porque «condiciona a temperatura e precipitação» (Ventura e Vasconcelos, 2006, p.101-102), e, consequentemente, o tipo e disponibilidade de combustível, bem como a sua humidade. Por seu turno, a influência do declive na progressão do fogo é conhecida. Quanto maior o declive, maior a velocidade de propagação do fogo por aquecimento dos combustíveis acima dele. O declive condiciona, também, a velocidade do vento (Macedo e Sardinha, 1993).

Figura 1 – Esquema metodológico desde os dados de origem e integração até à avaliação de susceptibilidade e perigosidade



A existência de susceptibilidade a um incêndio florestal depende da existência de combustíveis, não fazendo sentido avaliar essa susceptibilidade onde não existam condições para a ocorrência de incêndios. Assim, excluimos da ocupação do solo (CORINE Land Cover 2000), todas as áreas artificiais, águas interiores e oceano.

De acordo com Pereira *et al.* (2006), «a precipitação entre Janeiro e Abril exibe uma ligeira correlação positiva com a área ardida, possivelmente porque favorece o crescimento de combustíveis finos (...) para arder durante o Verão». Por outro lado, «observa-se uma correlação negativa (...) entre a área ardida e a precipitação do mês de Maio» (op.cit, p.149) que resulta em níveis de humidade mais elevada nesses combustíveis finos, menos disponíveis para sofrer ignição. Neste trabalho, a influência da precipitação é integrada no modelo pela preci-

pitação média anual do período 1931 - 1960. Conhecendo o regime pluviométrico português, pode assumir-se coincidência espacial entre os maiores quantitativos precipitados e os meses de Inverno, confirmando assim o que assinalam Pereira *et al.* (2006).

Ventura e Vasconcelos (2006) afirmam que as temperaturas elevadas e baixos níveis de humidade favorecem a secagem de combustíveis. Tendo em consideração essa relação, optámos por integrar esta variável como o número médio anual com temperaturas mínimas iguais ou superiores a 20°C. Supondo que é durante a noite que os esforços de supressão do incêndio têm maior probabilidade de sucesso, tomando partido das menores temperaturas e maiores humidades do ar, assumimos que os locais onde se registam mais noites tropicais são aqueles com maior susceptibilidade a incêndios florestais.

O histórico de áreas ardidas integra-se no modelo como uma probabilidade simples, que nos permite distinguir os locais onde o fogo é um fenómeno recorrente, daqueles onde ocorreu casuisticamente. Este registo histórico é também utilizado para determinar a favorabilidade de todas as outras variáveis, já que o passado nos apresenta de que modo cada classe de cada variável se comportou face ao fogo. Adicionalmente, o histórico de incêndios funciona como uma variável proxy para um factor que, de outro modo, seria extremamente complexo integrar no modelo: o comportamento humano, responsável, em Portugal, por mais de 97% dos incêndios registados (Beighley, 2009).

Em todos os modelos utilizámos um sub-conjunto de 20 anos de áreas ardidas (1975-1994) para calcular os scores de favorabilidade, e os restantes 10 anos (1995-2004) para realizar validação independente dos resultados da susceptibilidade.

Realizámos a avaliação da susceptibilidade com base em dois pressupostos: 1) A probabilidade de ocorrência de áreas ardidas pode ser avaliada quantitativamente através de relações estatísticas entre as áreas ardidas no passado e um conjunto de bases de dados espaciais; e 2) Assume-se que os incêndios florestais, avaliados pelas respectivas áreas ardidas, ocorrem sob condições que podem ser caracterizadas pelos temas incluídos na referida base de dados que, assim, são considerados como factores condicionantes (ou de predisposição), integrantes do modelo assumido. A equação para cálculo dos scores de favorabilidade de todas as variáveis, excepto probabilidade, segue o trabalho de Fabbri *et al.* (2002) e apresenta-se como:

$$Sfx = \frac{umAx}{\Omega x} \times 100 \quad (1)$$

Em que Sfx é o score de favorabilidade da classe x, umAx é o número total de unidades (ou pixéis) ardidos na classe x, e Ωx é o total de unidades (pixéis) dessa mesma classe x.

Adicionalmente, a transformação da informação histórica em probabilidade simples obedeceu à seguinte equação (2):

$$pa = \frac{f}{N} \times 100 \quad (2)$$

Em que pa é a probabilidade (simples, não condicionada), f é o número de vezes que a unidade matricial ardeu, e N o número de anos da série.

Depois de calculados todos os scores de favorabilidade e probabilidade, integrámos as variáveis do seguinte modo:

$$\begin{aligned}
 UC &= pa \cap Sf1 \cap Sf2 \cap \dots \cap Sfn \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow UCF = F(pa) \times F(Sf1) \times F(Sf2) \times F(\dots) \times F(Sfn)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Em que UC é a condição única que resulta da intersecção das variáveis modeladas, e F é o valor de favorabilidade.

A intersecção dos scores de favorabilidade de todas as variáveis resulta numa condição única (UC), que pode traduzir-se no modelo como uma favorabilidade dessa mesma condição única (UCF), resultante da multiplicação de todos os scores de favorabilidade. Deve notar-se que, sendo o modelo multiplicativo, sempre que um score de favorabilidade resultou zero, foi transformado em 1, tornando-se, assim, neutro na multiplicação.

Para identificar cada modelo, resultado da integração de um diferente número de variáveis, cada uma é representada por uma letra, a saber: A – Altimetria, D – Declive, C – Ocupação do solo, R – Precipitação, T – Temperatura, P – Histórico. Combinando estas letras, identifica-se quais as variáveis utilizadas, e.g., um modelo identificado por «ACD» denota a integração da altimetria, ocupação do solo e declive.

As favorabilidades das condições únicas (UCF na Eq.3) de cada modelo, quando ordenadas de forma decrescente e cruzadas com as áreas ardidas, permitem a computação de dois tipos de curva: sucesso e predição. A curva de sucesso resulta da tabulação cruzada entre os resultados do modelo e as áreas ardidas que lhe deram origem, pelo que esta curva permite avaliar o ajuste entre o modelo e os seus dados que o geraram. A curva de predição resulta da tabulação cruzada entre os resultados do modelo e um conjunto de áreas ardidas que não foram utilizadas no modelo, conforme referido na secção 3.1, pelo que estas curvas podem utilizar-se para aferir a capacidade preditiva do modelo, relativa a incêndios futuros.

3.2. Discussão

O primeiro modelo efectuado foi o CDP, assumindo que a susceptibilidade a incêndio florestal se pode avaliar por integração do combustível (ocupação do solo), declive e padrão histórico. Trata-se de um modelo com elevadas taxas de sucesso e predição (Fig. 2; Tabela 1 e Tabela 2): os 30% de território mais susceptível enquadram mais de 90% das áreas ardidas contidas no modelo (sub-conjunto 1975-1994), e para a predição, os mesmos 30% do território permitem o encaixe de 71% dessas novas áreas ardidas, não consideradas no modelo (sub-conjunto 1995-2004).

Num segundo modelo, adicionou-se outra variável, a altimetria. O modelo ACDP mantém taxas elevadas (Tabela 1 e Tabela 2); no entanto, mantendo os 30% do território mais susceptível como referência, a taxa de sucesso é ligeiramente inferior, mas a taxa de predição é pouco melhor que a anterior. Seguidamente, avaliámos o impacto da precipitação na susceptibilidade. O modelo com cinco variáveis, ACDPR, exhibe piores resultados (Tabela 1 e Tabela 2). A taxa de predição é similar à do anterior modelo (ACDP), mas a taxa de sucesso piora. Para completar esta série de modelos, adicionou-se a temperatura.

Com seis variáveis, o modelo ACDPRT, tem resultados menos satisfatórios, já que tanto o sucesso quanto a predição são piores do que qualquer modelo anterior, como se verifica, nas Tabelas 1 e 2.

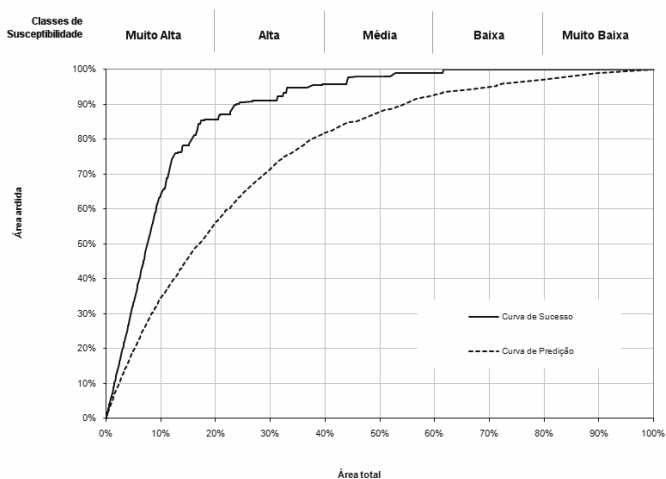
Não obstante os bons resultados obtidos, quisemos avaliar a resposta do modelo se lhe fossem retiradas as áreas ardidas no passado (como antes exposto, transformadas em probabilidades simples). Deste modo, foram construídos novos modelos, desta vez sem a variável P.

O primeiro modelo desta segunda série foi o modelo CD. Por comparação com o modelo CDP, quando se utilizam apenas a ocupação do solo e declive, tanto as taxas de sucesso como as de predição diminuem (Tabelas 1 e 2). É notável, porém, a semelhança da capacidade preditiva dos modelos CD e CDP, com uma diferença de apenas cerca de 1%. Acrescentando a variável 'Altimetria' (modelo ACD) verifica-se que, por comparação com o modelo ACDP, o sucesso piora, mas a predição tem um comportamento próximo. Por comparação com o modelo anterior (CD), juntar a altimetria resulta num ganho discreto, normalmente abaixo de 1%, tanto no sucesso quanto na predição.

Adicionar a precipitação a esta série de modelos (ACDR) gera resultados similares (Tabelas 1 e 2). A taxa de sucesso aumenta ligeiramente, mas nem sempre, e a taxa de predição fica abaixo do anterior ACD até cerca de 70% do território susceptível.

Por último, o modelo ACDRT, em que se adiciona a temperatura, tem uma taxa de sucesso melhor, mas perde, globalmente, capacidade preditiva, quando comparado com outros modelos (Tabelas 1 e 2).

Figura 2 – Curvas de sucesso e de predição para o modelo CDP, com representação das cinco classes de susceptibilidade a incêndios florestais



Para uma melhor percepção do comportamento dos vários modelos, calcularam-se as áreas abaixo da curva (AUC) (Tabela 3). O modelo CDP não é o melhor em todas as marcas do território susceptível, no entanto, endereça maior percentagem de áreas ardidas futuras requerendo para isso menor área de território susceptível. Em apenas 20% do

território (a classe com maior susceptibilidade), integra maior percentagem de área ardida futura do que qualquer outro modelo, e fá-lo com poucas variáveis. A respectiva AUC mostra claramente que é o modelo com a melhor taxa de sucesso. Pelo exposto, o modelo CDP foi adoptado como modelo de referência para o cálculo da susceptibilidade a incêndio florestal. Como a curva de predição é muito regular, sem quebras muito claras que pudessem guiar a classificação, optámos por uma classificação quintílica, com cada classe contendo aproximadamente 20% do território susceptível (ver fig. 2). A figura 3 ilustra a susceptibilidade a incêndios florestais em Portugal continental. A capacidade preditiva de cada classe de susceptibilidade deriva da taxa predição do modelo CDP, e pode descrever-se do seguinte modo: 52% da área total ardida no futuro, localizar-se-á na classe de susceptibilidade muito alta. Pelo contrário, na classe de susceptibilidade muito baixa, apenas se encontrarão 3% das áreas afectadas por incêndios no futuro.

Tabela 1 – Taxas de sucesso dos modelos. Os valores mais significativos assinalam-se a **negrito**.

Area	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
CDP	64,12 %	85,46 %	90,87 %	95,77 %	97,83 %	99,00 %	99,97 %	100 %	100 %
ACDP	59,47 %	81,72 %	90,42 %	95,57 %	97,42 %	98,88 %	99,73 %	99,97 %	99,99 %
ACDPR	55,76 %	79,66 %	88,84 %	94,06 %	96,35 %	98,26 %	99,52 %	99,82 %	99,98 %
ACDPRT	55,59 %	79,12 %	88,60 %	93,55 %	95,73 %	97,44 %	98,99 %	99,77 %	99,97 %
CD	36,39 %	60,07 %	75,92 %	84,83 %	89,21 %	92,62 %	94,96 %	97,84 %	99,00 %
ACD	37,51 %	62,38 %	76,24 %	84,78 %	89,59 %	93,36 %	95,77 %	97,69 %	99,27 %
ACDR	36,90 %	62,25 %	77,50 %	85,22 %	90,00 %	93,25 %	95,50 %	97,36 %	99,00 %
ACDRT	36,78 %	62,47 %	78,36 %	85,75 %	90,19 %	93,25 %	95,09 %	97,01 %	98,82 %

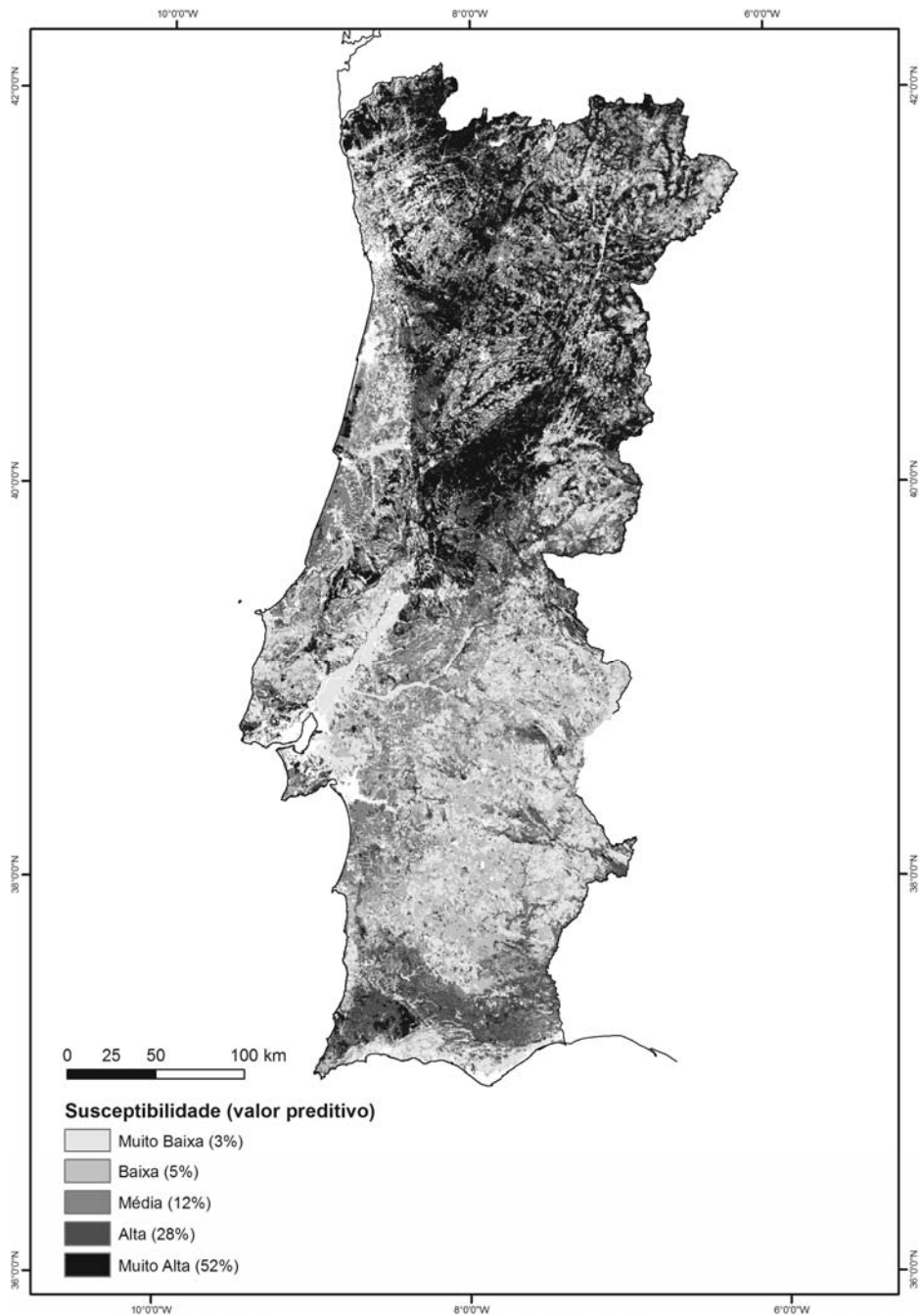
Tabela 2 – Taxas de predição dos modelos. Os valores mais significativos assinalam-se a **negrito**.

Area	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
CDP	34,52 %	56,36 %	71,31 %	81,77 %	87,87 %	92,68 %	95,02 %	97,11 %	99,79 %
ACDP	33,91 %	56,31 %	71,65 %	82,08 %	88,41 %	92,53 %	95,40 %	97,55 %	99,23 %
ACDPR	33,37 %	55,65 %	71,14 %	80,63 %	87,06 %	92,21 %	95,42 %	97,61 %	99,32 %
ACDPRT	33,08 %	54,13 %	69,11 %	79,06 %	85,55 %	90,51 %	94,22 %	97,00 %	99,06 %
CD	30,48 %	53,29 %	70,12 %	80,15 %	87,04 %	92,39 %	94,74 %	96,96 %	98,81 %
ACD	31,04 %	53,99 %	70,36 %	81,01 %	87,81 %	92,25 %	95,24 %	97,50 %	99,22 %
ACDR	30,05 %	53,10 %	69,35 %	79,53 %	86,35 %	92,02 %	95,28 %	97,57 %	99,30 %
ACDRT	29,25 %	51,68 %	67,61 %	77,83 %	84,56 %	90,23 %	94,02 %	96,89 %	99,02 %

Tabela 3 – Áreas abaixo da curva para as curvas de sucesso e predição, para todos os modelos de susceptibilidade.

	CDP	ACDP	ACDPR	ACDPRT	CD	ACD	ACDR	ACDRT
Sucesso	89,04%	87,87%	86,79%	86,47%	78,29%	79,08%	79,07%	79,15%
Predição	76,87%	77,06%	76,60%	75,50%	75,61%	76,05%	75,57%	74,39%

Figura 3 – Susceptibilidade a Incêndios Florestais em Portugal Continental



4. AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE

816

O mapa de perigosidade tem a mesma aparência do mapa de susceptibilidade, mas as suas classes não são qualitativas, são valores probabilísticos, determinados para um determinado cenário de áreas ardidas futuras. Para a avaliação da perigosidade de um pixel numa classe de susceptibilidade, utilizamos a seguinte equação:

$$P = 1 - \left(1 - \frac{aaf_x}{at_x} \times vpred_x \right) \quad (4)$$

Em que P é a probabilidade, aaf é a área total ardida no cenário, at é a área total da classe de susceptibilidade x, vpred é o valor preditivo da classe de susceptibilidade x. A tabela 4 mostra um exemplo de cálculo da perigosidade para cada classe de susceptibilidade num cenário em que, num dado ano, ardam um total de 500 mil hectares.

Tabela 4 - Avaliação da perigosidade para as classes de susceptibilidade a incêndio florestal, num cenário de 500 mil hectares ardidos num ano.

Classe de Susceptibilidade	Área (nr. de pixeis, pixel=80m)	Valor Preditivo	Probabilidade por Pixel
Muito Baixa	2.783.096	0,03	0,85 %
Baixa	2.780.358	0,05	1,40 %
Média	2.758.308	0,12	3,38 %
Alta	2.634.032	0,28	8,42 %
Muito Alta	2.401.267	0,52	16,81 %

5. CONCLUSÕES

Mostrámos que a susceptibilidade e a perigosidade de incêndio florestal podem avaliar-se, para Portugal continental, recorrendo a poucas variáveis, como o histórico, o declive e a ocupação do solo. As relações entre o fogo, a ocupação do solo e o declive permitem identificar as áreas onde a susceptibilidade é superior, e adicionar-lhes o histórico permite uma melhor identificação das áreas onde os incêndios obedecem a um padrão de recorrência, o que é muito relevante no país, em função da causalidade dos incêndios, fundamentalmente de origem humana. Com apenas três variáveis, consegue-se um modelo de implementação rápida e processamento simples, mantendo um bom compromisso entre a simplicidade e a capacidade preditiva. Demonstrámos que adicionar mais variáveis não se traduz num aumento relevante da capacidade preditiva do modelo.

Demonstrámos, ainda, que as variáveis meteorológicas não adicionam valor acrescido suficiente à capacidade preditiva dos modelos, pelo que não se encontra justificação para a sua inclusão na modelação. A informação meteorológica é relevante numa base diária, para previsão das condições de severidade do fogo e muito relevantes quando o fogo já é uma realidade, mas não tem suficiente expressão na identificação e cartografia da susceptibilidade a longo prazo, ou estrutural.

Finalmente, a avaliação da perigosidade é muito útil na preparação para os piores cenários, podendo auxiliar, entre outras coisas, na determinação do número de hectares onde gerir combustíveis, a dimensão das faixas de gestão de combustíveis ou criação de mosaicos, ou mesmo a dimensão óptima para estradas florestais, localização e densidade de pontos de água ou dimensionamento de faixas de segurança em torno de edificado nos interfaces urbano/florestais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bachmann, A. & Allgöwer, B. 1999, 'The need for a consistent wildfire risk terminology', *The Joint Fire Science Conference and Workshop*, Boise, Idaho, E.U.A.
- Beighley, M. 2009, 'Forest defense against fire in Portugal, situation and capability', *The Forest, the Path to sustainable prosperity – International Seminar*, 2 de Junho, Lisboa, Apresentação Powerpoint.
- Chuevico, E. & Congalton, R.G. 1989, 'Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping', *Remote sensing of the environment*, 29, 147-159.
- Daveau, S., Coelho, C., Costa, V.G. & Carvalho, L. 1977, 'Répartition et rythme des précipitations au Portugal', *Memórias do Centro de Estudos Geográficos*, 3, Lisboa.
- Fabbri, A., Chung, C. F., Napolitano, P., Remondo, J., & Zêzere, J. L. 2002, 'Prediction rate functions of landslide susceptibility applied in the Iberian Peninsula', edited by Brebbia, C. A., *Risk Analysis III*, Series: Management Information Systems, WIT Press, Southampton, Boston, vol. 5, 703–718.
- Lourenço, L. 2004, 'Risco Meteorológico de Incêndio Florestal', *Estudos*, 44, Coimbra.
- Macedo, F.W. & Sardinha, A.M. 1993, 'Fogos Florestais', Vol I, 2ª Ed, Publ. Ciência e Vida, Lisboa, 430p.
- Pereira M.G., Trigo R.M., DaCamara C.C., Pereira J.M.C. & Leite S.M. 2005, 'Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal', *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 11-25.
- Pereira, J.M.C.P, Carreiras, J., Silva, J. & Vasconcelos, M. 2006, 'Alguns conceitos básicos sobre os fogos rurais em Portugal', *Incêndios Florestais em Portugal, Caracterização, Impactes e Prevenção*, ISAPress, Lisboa, 133-161.
- Trigo R.M., Pereira J.M.C., Pereira M.G., Mota B., Calado M.T., DaCamara C.C. & Santo F.E. 2006, 'The exceptional fire season of summer 2003 in Portugal', *International Journal of Climatology*, 26, 1741-1757.
- UNDRO 1979, 'Natural Disasters and Vulnerability Analysis', *Report of Expert Group Meeting 9-12 July 1979*, Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Geneva.
- Ventura, J. & Vasconcelos, M.J. 2006, 'O fogo como processo físico-químico e ecológico', *Incêndios Florestais em Portugal, Caracterização, Impactes e Prevenção*, ISAPress, Lisboa, 93-113.
- Verde, J. 2008, 'Avaliação da Perigosidade de Incêndio Florestal', *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Geografia Física*, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Viegas, X., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A. & Bernard, S. 1999, 'Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe', *International Journal of Wildland Fire*, 9 (4) , 235–246.