# FIREURISK - DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA HOLÍSTICA PARA A GESTÃO DO RISCO DE INCENDIO RURAL NA EUROPA

| | |
|---|---|
| **Número de contrato: 101003890**<br>**Código do anúncio do programa:** H2020-LC-CLA-2018-2019-2020 | |
| **Tópico:** | LC-CLA-15-2020<br>Redução do risco de incêndio rural: rumo a uma abordagem de gestão integrada de gestão do risco de incêndio rural na União Europeia |
| **Instrumento:** | RIA |

## D2.6 Manual com orientações para agentes de proteção civil quando enfrentam episódios de comportamento extremo do fogo, na interface urbano-florestal, e em altitudes elevadas

| | |
|---|---|
| **Entregável:** | D2.6 |
| **Data de publicação:** | Novembro de 2024 |
| **Entidade envolvidas:** | SAFE (coordenador da versão original), ADAI (Coordenador da versão traduzida), universidade de Aveiro, universidade de Coimbra |
| **Autores da versão original em inglês** | Sébastien Lahaye, Domingos Xavier Viegas, Luís Mário Ribeiro, Miguel Almeida, Tiago Rodrigues, Thiago Barbosa, António Jorge Ferreira, Ana Isabel Miranda, Diogo Lopes, Tobias Osswald, Johan Sjöström, Rick McRae, Kiki Yunianti, Fanny Verhilac. |
| **Autores da versão traduzida em português** | Miguel Almeida, Domingos Xavier Viegas, Luís Mário Ribeiro, Carlos Ribeiro, Tiago Barbosa, Tiago Rodrigues, Ana Isabel Miranda, António Jorge, Diogo Lopes e Tobias Osswald |
| **Pacote de trabalhos:** | WP2 – Redução do risco para melhoria da proteção |
| **Tarefa:** | T2.3 – Melhoria na resposta para redução da probabilidade da ocorrência de incêndios de grande impacto |
| **Nível de disseminação:** | ☒ PU: Público |

Copyright FirEUrisk Consortium. All rights reserved. 1

# Sumário executivo

O risco de incêndio rural tem evoluído rapidamente na Europa nos últimos anos, trazendo novos desafios para os agentes envolvidos na fase resposta, tais como:

- Incêndios extremos e comportamento extremo de fogo;
- Incêndios na interface urbano-florestal;
- Incêndios em áreas de elevada altitude e em latitudes mais altas, que anteriormente não eram tão afetadas.

Observando e antecipando esses desenvolvimentos, a comunidade científica tem vindo a desenvolver conhecimento sobre os incêndios rurais. No entanto, a transferência desse conhecimento para a comunidade operacional, assim como a transformação deste conhecimento em diretrizes práticas tem sido insuficiente, devido à grande distância que frequentemente existe entre estas duas comunidades. Além disso, em vários países europeus, a comunidade operacional apresenta-se fragmentada em entidades locais, departamentais, regionais e nacionais, o que resulta em níveis de preparação muito desiguais. Assim, nem todos os agentes operacionais estão suficientemente informados nem preparados para enfrentar os novos desafios relacionados aos incêndios rurais, o que prejudica tanto sua eficiência, como a sua segurança.

O presente documente reúne os resultados de investigação feita acerca do comportamento do fogo, realizada por vários parceiros do FirEURisk. Os resultados da investigação são apresentados de forma simplificada, para que sejam acessíveis a toda a comunidade profissional. Os primeiros capítulos detalham os fundamentos do comportamento do fogo, estendendo-se depois a conceitos de comportamento extremo do fogo. Os capítulos seguintes descrevem incêndios em áreas específicas, tais como a interface urbano-florestal, zonas de elevada altitude e regiões localizada a alta latitude, assim como os mecanismos de emissão e dispersão de fumo. Os capítulos finais dedicam-se ao combate a incêndios em diferentes contextos, abordando igualmente as questões de segurança e a descrição de casos estudo.

Para maximizar os resultados após a entrega deste documento, o consórcio FirEURisk traduziu o seu conteúdo para diversas línguas, tendo em vista a sua disseminação a nível nacional entre vários países europeus e fora da Europa. Este documento refere-se à tradução para a língua portuguesa.

***Aviso legal***

O conteúdo desta publicação é de exclusiva responsabilidade dos editores e não representa necessariamente as opiniões expressas pela Comissão Europeia ou seus serviços.

Embora se acredite que as informações contidas neste documento sejam rigorosas, os autores ou qualquer outro participante do consórcio FirEUrisk não oferecem qualquer tipo de garantia em relação a este material, incluindo, mas não se limitando a garantias implícitas de comercialização ou adequação a um propósito específico.

Nem o Consórcio FirEUrisk, nem nenhum de seus membros, os seus gestores, funcionários ou agentes serão responsáveis ou passíveis de responsabilidade, por negligência ou qualquer outro motivo, por qualquer inexatidão ou omissão contida neste documento.

Sem prejuízo do disposto acima, nem o Consórcio FirEUrisk, nem nenhum de seus membros, gestores, funcionários ou agentes serão responsáveis por qualquer perda ou dano direto, indireto ou consequente causado ou resultante de qualquer informação, orientação, inexatidão ou omissão contidos neste documento.

***Direitos Autorais***

© Consórcio FirEUrisk, 2021-2025. Este relatório contém trabalho original e inédito, exceto onde é claramente indicado o contrário. O reconhecimento do material previamente publicado e do trabalho de outros foi feito por meio de citações apropriadas, menções ou ambos. A reprodução é autorizada, desde que a fonte seja devidamente citada.

## Índice


**1. INTRODUÇÃO ..... 10**

1.1. TENDÊNCIAS FUTURAS DO RISCO DE INCÊNDIO NA EUROPA ..... 10
1.2. NECESSIDADE DE DIRETRIZES DE COMBATE A INCÊNDIOS ..... 10
1.3. CONTRIBUIÇÕES ..... 11

**2. FUNDAMENTOS DO COMPORTAMENTO DO FOGO ..... 13**

2.1. FATORES QUE AFETAM A PROPAGAÇÃO DO FOGO ..... 13
2.2. METEOROLOGIA DO FOGO ..... 13
*2.2.1. Fatores meteorológicos ..... 13*
*2.2.2. Perigo de incêndio ..... 15*
*2.2.3. Perigo de incêndio e teor de humidade do combustível morto ..... 16*
2.3. PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS ..... 18
*2.3.1. Partículas de combustível ..... 18*
*2.3.2. Leitos de combustível e tipos de combustível ..... 20*
*2.3.3. Modelos de combustível ..... 23*
2.4. TOPOGRAFIA ..... 24
*2.4.1. Declive ..... 25*
*2.4.2. Orientação da Paisagem: Exposição solar e ao vento ..... 25*
*2.4.3. Elevação: Padrões de Temperatura e de Vento ..... 25*
*2.4.4. Curvatura do Terreno ..... 26*
*2.4.5. Cumeadas ..... 26*
*2.4.6. Topografia Complexa ..... 26*
2.5. TIPOS E MODOS DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ..... 27
*2.5.1. Modos de propagação ..... 27*
*2.5.2. Modos de comportamento do fogo superficial ..... 27*

**3. COMPORTAMENTO EXTREMO DO FOGO ..... 29**

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO EXTREMO DO FOGO (CEF) ..... 29
*3.1.1. Comportamento do fogo dinâmico ..... 29*
*3.1.2. Intensidade do fogo ..... 29*
3.2. DESENVOLVIMENTOS ADVERSOS DO COMPORTAMENTO EXTREMO DO FOGO ..... 30
*3.2.1. Focos secundários ..... 30*
*3.2.2. Fogos de copas ..... 32*
*3.2.3. Fogos Eruptivos ..... 33*
*3.2.4. Fogos de Junção ..... 34*
*3.2.5. Conflagrações ..... 35*
*3.2.6. Vórtices de fogo ..... 35*
*3.2.7. Eventos de fogo eruptivo ..... 36*

**4. DESAFIOS NA RESPOSTA A INCÊNDIOS COM CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS ..... 39**

4.1. INCÊNDIOS NA INTERFACE URBANO-FLORESTAL ..... 39
*4.1.1. Combustíveis naturais - vegetação ..... 39*
*4.1.2. Combustíveis antropogénicos ..... 40*
*4.1.3. Pessoas ..... 40*
4.2. INCÊNDIOS EM ZONAS DE GRANDE ALTITUDE ..... 41
*4.2.1. Comportamento determinado pela topografia ..... 41*
*4.2.2. Questão de segurança ..... 42*
*4.2.3. Desafios de acesso e resposta ..... 42*
*4.2.4 Impacto dos incêndios em altitude ..... 42*
4.3. INCÊNDIOS EM REGIÕES DE LATITUDE ELEVADA ..... 43
*4.3.1 Combustíveis e paisagens ..... 43*

*4.3.2 Demografia* ..... *43*
*4.3.3 Desafios e melhorias observados nas últimas décadas* ..... *44*
*4.3.4 Fatores para o futuro* ..... *45*

**5. EMISSÃO E DISPERSÃO DE FUMO** ..... **46**

5.1. EMISSÃO DE FUMO ..... 46
5.2. DISPERSÃO DO FUMO ..... 48

**6. MÉTODOS DE COMBATE AO INCÊNDIO** ..... **50**

6.1. ESTRATÉGIAS E TÉCNICAS DE SUPRESSÃO DO FOGO ..... 50
*6.1.1 Estratégia de supressão de incêndio* ..... *51*
*6.1.2. Técnicas de supressão de incêndio* ..... *51*
6.2. COMBATE AO INCÊNDIO EM ZONAS DE INTERFACE URBANO-FLORESTAL ..... 52
*6.2.1. Supressão do fogo na IUF* ..... *53*
*6.2.2. Proteção da população e edificações* ..... *54*
6.3. COMBATE A EPISÓDIOS DE COMPORTAMENTO EXTREMO DO FOGO ..... 54

**7. SEGURANÇA PESSOAL E SAÚDE** ..... **56**

7.1. ESTADO DE SAÚDE E DESEMPENHO MÚLTIPLO ..... 56
7.2. IMPACTO DO FUMO NA VISIBILIDADE E NA SAÚDE ..... 57
*7.2.1. Lesão aguda por inalação de fumo* ..... *58*
*7.2.2. Diagnóstico e apresentação clínica* ..... *59*
*7.2.3. Tratamento* ..... *61*
*7.2.4. Conclusões* ..... *61*
7.3. REGRAS DE SEGURANÇA ..... 61
*7.3.1. Normas de Segurança e Situações de Alerta* ..... *62*
*7.3.2. LCES - LACES* ..... *64*
*7.3.3. Recomendações adicionais para incêndios em encostas* ..... *67*

**8. CASOS DE ESTUDO** ..... **69**

8.1. GRANDES INCÊNDIOS ..... 69
*8.1.1. Incêndios de Pedrógão Grande* ..... *69*
*8.1.2. Incêndio do Garrocho (Serra da Estrela)* ..... *72*
8.2. ACIDENTES ..... 74
*8.2.1 - Acidente de Freixo de Espada-à-Cinta* ..... *74*
*8.2.2 - Acidente de Famalicão da Serra (Portugal) 2006* ..... *77*

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ..... **80**

# *Índice de Figuras*


Figura 1. Teor de humidade dos combustíveis mortos ($M_F$) na Lousã durante o mês de julho de 2022. Legenda: Medições de campo: $M_F$ de agulhas de Pinus pinaster no campo; Vareta de combustível: $M_F$ medido por sensor de humidade do combustível (CS506 10 horas); Modelação: $M_F$ estimado para agulhas de Pinus pinaster segundo Lopes et al. (2014). Período em destaque (2 a 18 de julho): onda de calor. (Ilustração do autor) ..... 18

Figura 2. Representação esquemática dos estratos do leito de combustível. (créditos de imagem: ADAI) ..... 21

Figura 3. Exemplo de simulações de comportamento do fogo, utilizando o BehavePlus 6, para 3 modelos de combustível diferentes, em diferentes declives e com vento ascendente de 20km/h. ..... 24

Figura 4. Brisas da encosta e do vale durante o dia (esquerda) e a noite (direita). (Fonte: Meteo France) ..... 41

Figura 5. Exemplo da Suécia 1996-2020. Densidade populacional (esquerda), ocorrência de incêndios florestais (≥1 ha), (meio), ocorrência de incêndios florestais (≥100 ha), (direita) (Sjöström & Granström, 2023a) ..... 44

Figura 6. Alguns dos compostos presentes no fumo emitido durante um fogo florestal (ilustração dos autores) ..... 46

Figura 7. Esquema de uma abordagem de modelação de qualidade do ar (ilustração dos autores) ..... 48

Figura 8. Campo de concentrações de PM10 ($\mu g.M^{-3}$) simulado por um modelo de dispersão local (Valente et al., 2007). ..... 49

Figura 9. Coleção de palavras relacionadas a técnicas e estratégias de supressão do fogo usadas na Europa (ilustração dos autores). ..... 50

Figura 10. SSD para a) vento fraco, b) vento moderado e c) vento forte, para as três classes de declive na formulação. (Butler, 2018). ..... 67

Figura 11. Mapa de Portugal e da área do incêndio Pedrógão Grande, com destaque para os principais locais de ignição e o desenvolvimento do fogo nos dois focos de incêndio. Os focos de incêndios de Escalos Fundeiros e de Regadas foram aqueles que deram origem ao episódio de frentes convergentes descrito anteriormente. (ilustração dos autores) ..... 69

Figura 12. Vistas das colunas de fumo dos focos de incêndios de Escalos Fundeiros e de Regadas às 18:00 (a) e 18:15 (b), mostrando a interação com o downburst. (imagens gentilmente cedidas pela Escola Tecnológica e Profissional da Zona do Pinhal) ..... 70

Figura 13. Situação operacional pelas 11:30 de 6 de agosto de 2023. (ilustração dos autores) ..... 72

Figura 14. Detalhe da situação operacional perto do Vale da Amoreira, a 15 de agosto de 2023. (ilustração dos autores) ..... 74

Figura 15. Mapa topográfico da área do incêndio de Freixo. O Norte é indicado pela seta branca no canto superior esquerdo da figura. ..... 75

Figura 16. (a) Temperatura do ar e (b) humidade relativa em Freixo em 5 de agosto de 2003. ..... 76

Figura 17. (a) Pressão atmosférica e (b) direção do vento em 5 de agosto de 2003. ..... 76

Figura 18. (a) Média a cada 10 min da velocidade do vento e (b) máxima velocidade do vento em 5 de agosto de 2003. ..... 76

Figura 19. Vista geral da área do incêndio de Famalicão. A origem do incêndio foi próximo à parte inferior no centro da figura. O acidente ocorreu no desfiladeiro centro da figura. O triângulo da figura assinala a área inicialmente afetada pelo incêndio. ..... 77

# *Índice de Tabelas*

Tabela 1. Classes de perigo de incêndio para FWI na Europa definidas pela EFFIS. Fonte: EFFIS/JRC (2023). ... 16
Tabela 2. Limites de combate a incêndios em função da intensidade do incêndio. ... 30
Tabela 3. Fatores de emissão médios (g.kg$^{-1}$ de combustível queimado, base seca) para os principais poluentes, por tipo de vegetação (Fernandes et al., 2022). ... 47
Tabela 4. Pontos fortes e limitações das técnicas de supressão de fogo na IUF ... 53
Tabela 5. Pontos fortes e limitações de diferentes técnicas face ao comportamento extremo do fogo ... 55
Tabela 6. 10 Normas de Segurança no Combate aos Incêndios (NWCG, 2022). ... 63
Tabela 7. 18 Situações de alerta (NWCG, 2022). ... 64
Tabela 8. Fator de vento e declive (Δ) para calcular o SSD em diferentes alturas de vegetação (Butler, 2018). ... 66

# *Tabela de abreviaturas*

| Abreviatura | Definição |
|---|---|
| ADAI | Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial |
| BUFE | Eventos de Incêndios Eruptivos (Blow-up) |
| BUI | Build-up index [Índice de Combustível Disponível] |
| CEF | Comportamento Extremo do Fogo |
| CFWIS | Canadian Fire Weather Index System [Sistema Canadiano de Índice Meteorológico de Incêndios] |
| $CH_4$ | Metano |
| CO | Monóxido de Carbono |
| $CO_2$ | Dióxido de Carbono |
| COHb | Carboxihemoglobina |
| COV | Compostos Orgânicos Voláteis |
| d | Densidade do Copado |
| DC | Drought Code [Íncide de Secura] |
| DMC | Duff Moisture Code [Índice de Húmus] |
| EF | Escalos Fundeiros |
| EFFIS | *European Forest Fire Information System* [*Sistema Europeu de Informação sobre Incêndios Florestais]* |
| EFFIS | European Forest Fire Information System [Sistema Europeu de Informação sobre Incêndios Florestais] |
| EMC | Teor de Humidade de Equilíbrio |
| EUA | Estados Unidos da América |
| EWE | Evento Extremo de Incêndio Florestal |
| FFDI | Forest Fire Danger Index [Índice de Perigosidade de Incêndio Florestal) |
| FFMC | Índice de Humidade dos Combustíveis Finos |
| FRP | Poder Radiativo Instantâneo do Fogo |
| FWI | Fire Weather Index |
| GFDI | *Grassland Fire Danger Index [Índice de Perigo de Incêndio em Vegetação Herbácea e Florestal (Sistema Australiano)]* |
| HR | Humidade Relativa do Ar |
| ISI | Initial Spread Index [Índice de Propagação Inicial] |
| IUF | Interface Urbano-Florestal |
| JRC | Joint Research Center [Centro Comum de Investigação] |
| LACES | *Lookouts, Anchor Points, Communications, Escape routes, and Safety zones* [*Vigias, Comunicações, Pontos de Ancoragem, Caminhos de Fuga e Zonas de Segurança]* |
| LCES | *Lookouts, Communications, Escape routes, and Safety zones* [*Vigias, Comunicações, Caminhos de Fuga e Zonas de Segurança]* |
| LEIF | Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (ADAI) |
| LM | Laboratório Móvel |
| $m_f$ | Humidade dos Combustíveis Mortos Finos |
| NFDRS | National Fire Danger Rating System [Sistema Nacional de indexação do Perigo (EUA)] |
| NFFL | *Northern Forest Fire Laboratory* [*Laboratório de Incêndios Florestais do Norte]* |
| $NH_3$ | Amoníaco |
| NMHC | Hidrocarbonetos Não Metano |

| | |
|---|---|
| NOx | Óxidos de Azoto |
| NWCG | *National Wildfire Coordination Group* [*Grupo Nacional de Coordenação dos Incêndios Florestais]* |
| PAH | Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos |
| PAI | Plano de Ação do Incidente |
| PM | Material Particulado |
| PM10 | Partículas com Diâmetro Equivalente Inferior a 10 µm |
| PM2,5 | Partículas com Diâmetro Equivalente Inferior a 2,5 µm |
| Rc | Velocidade Crítica de Propagação |
| RE | Regadas |
| RISE | Sweden's research institute [Instituto de Investigação da Suécia] |
| SAV | Relação Área Superficial/Volume |
| SSD | Distância de Separação Segura |
| VLS | Propagação Lateral Impulsionada pela Vorticidade |

# 1. Introdução

## 1.1. Tendências futuras do risco de incêndio na Europa

Nos últimos anos, a frequência e severidade dos incêndios florestais aumentaram, levando a consequências devastadoras para as comunidades e ecossistemas. Esta tendência continuará e agravará nos próximos anos, com uma trajetória que será clarificada no âmbito das atividades realizadas no *Work Package* WP3 do projeto FirEURisk (fireurisk.eu, 2024). Alguns trabalhos de investigação recentes demonstraram que:

- O risco expandir-se-á pelo território europeu e afetará áreas mais amplas (Jones *et al.*, 2022).
- A área mais exposta, ou seja, a região mediterrânica, enfrentará incêndios cada vez mais extremos (Turco *et al.*, 2018).

Simultaneamente, há cada vez mais áreas de interface urbano-florestal (IUF), cada vez mais vulneráveis e mais expostas aos incêndios rurais (Almeida *et al.*, 2023; Zikeloglou *et al.*, 2023), expondo os bombeiros a novos desafios, que podem não ter o conhecimento adequado, nem as estratégias e táticas mais apropriadas para enfrentar esta nova realidade de comportamento extremo do fogo e da sua propagação na IUF. Esta desafio é ainda maior nas novas áreas propensas a incêndios. Mais importante ainda, a falta de conhecimento e estratégias e táticas inadequadas podem comprometer a sua segurança e expor as suas vidas.

## 1.2. Necessidade de diretrizes de combate a incêndios

Do ponto de vista operacional, as entidades com responsabilidade na gestão a incêndios florestais têm uma estrutura fragmentada, tanto na Europa, como noutros continentes (Lahaye *et al.*, 2018a). Em cada país, os serviços nacionais, regionais ou sub-regionais de gestão da floresta e do risco de incêndio gerem os seus recursos de acordo com os seus próprios procedimentos. Estes procedimentos podem estar alinhados com as normas nacionais, mas geralmente também se baseiam no contexto local e na experiência adquirida nos incêndios, a qual varia de região para região. Os recursos económicos e humanos também são variáveis, pelo que o nível de conhecimento e operacionalização difere entre entidades.

Na perspetiva científica, têm vindo a ser desenvolvidos vários projetos a nível europeu, e fora da Europa, com vista ao avanço no conhecimento e compreensão do comportamento do fogo, assim como de todo o ciclo de gestão do risco de incêndio. O projeto FirEURisk distingue-se dos demais projetos por agregar o know-how e os desenvolvimentos de vários equipas de investigação, estabelecendo uma ponte entre a comunidade científica e a comunidade operacional.

O objetivo deste documento é recolher um conjunto de conceitos e diretrizes que poderão fazer parte do currículo de formação de bombeiros e de outros agentes no âmbito da gestão dos incêndios florestais, por vezes referidos como "incêndios rurais", numa perspetiva que integre as várias componentes dos incêndios. Dada a relevância da formação aos bombeiros neste âmbito, será dada particular ênfase à supressão do fogo no caso de grandes incêndios ou com comportamento extremo. Assume-se que uma boa formação e treino, aliada a uma sensibilização dos perigos são aspetos-chave no que respeita à segurança contra incêndios, contribuindo significativamente para a redução de acidentes e perda de vidas humanas.

O combate a grandes incêndios extremos induz perigos excecionais para os bombeiros. Estas situações são frequentemente caracterizadas por situações de calor extremo, chamas intensas,

projeções massivas e comportamento de fogo rapidamente mutável e inesperado, criando condições perigosas para os agentes de combate. Os incêndios nas IUF também geram situações desafiadoras. Os bombeiros têm de se desdobrar para proteger vidas, independentemente do nível de risco e do comportamento do fogo, que muitas vezes é errático. Esse comportamento é de facto impulsionado pela disposição da vegetação e das características das povoações, em cenários que por vezes incluem camiões de gás, carros e outros materiais muito inflamáveis ou explosivos.

O conceito de incêndios na IUF tem sido amplamente investigado no projeto FirEUrisk, analisando ocorrências passadas, avaliando a exposição da população e dos bens, avaliando a vulnerabilidade das comunidades, casas e infraestruturas. Assim, para além do conhecimento adquirido ao longo de anos pelos seus autores, o presente documento utiliza os resultados projeto FirEUrisk na proposta de orientação dos procedimentos operacionais na IUF. Por outro lado, os autores contactaram a sua rede de contactos de especialistas na matéria para definir técnicas específicas de resposta que se afiguram por ser mais adequadas em diferentes situações, incluindo no contexto do risco em áreas com altitudes elevadas e em regiões europeias localizadas a altas latitudes.

O conteúdo deste documento baseia-se no currículo utilizado por alguns dos seus autores na formação de bombeiros e outros agentes operacionais em tópicos de combate a incêndios sobretudo em condições de comportamento extremo do fogo, tendo em vista um combate em maior segurança.

As principais contribuições do presente documento serão extraídas para construir um "Manual Europeu para Bombeiros". Este manual pode ser essencial para aumentar a consciencialização, utilizando uma abordagem simplificada, enquanto explora aspetos essenciais dos incêndios florestais, considerando-se que todos os agentes de proteção civil deles beneficiarão. Isto é especialmente verdade do ponto de vista da segurança, pois grande parte dos conteúdos deste documento decorreu da investigação sobre o comportamento extremo do fogo e da análise de acidentes e de grandes incêndios que causaram perdas significativas de vidas.

## 1.3. Contribuições

Este documento capitaliza as contribuições de várias equipas do projeto FirEUrisk. O trabalho baseia-se, primeiramente, na extensa experiência da Equipa ADAI na investigação de acidentes relacionados com incêndios envolvendo tanto civis como agentes operacionais (cf. Viegas *et al.*, 2001; Viegas *et al.*, 2005; Viegas *et al.*, 2008; Viegas, 2004, 2009, 2013, 2017; Ribeiro *et al.*, 2020) e no estudo de grandes incêndios desenvolvido a pedido das autoridades nacionais (cf. Viegas *et al.*, 2012; Viegas *et al.*, 2013; Viegas *et al.*, 2017; Viegas *et al.*, 2019). A investigação derivada sobre o comportamento extremo do fogo inclui alguns conceitos inovadores sobre o comportamento do fogo que são apresentados e referidos abaixo, mas são resumidos aqui para consistência: (i) Conceito de comportamento dinâmico do fogo (cf. Viegas, 2004; Viegas & Pita, 2004); (ii) Conceito de fogo eruptivo (cf. Viegas, 2006; Viegas & Simeoni, 2011); (iii) Conceito de fogo de junção (cf. Raposo *et al.*, 2018); (iv) comportamento oscilatório do fogo (cf. Viegas *et al.*, 2021).

O primeiro autor do documento também reproduziu aqui materiais extraídos dos seus estudos sobre a segurança dos bombeiros (Lahaye *et al.*, 2018b; Lahaye *et al.*, 2018b; Lahaye *et al.*, 2018c) e de programas de formação do desenvolvimento de capacidades de analista do comportamento do fogo, que atualmente são ministrados em França.

O capítulo sobre metodologias de combate a incêndios é baseado nos resultados de entrevistas e inquéritos a respondentes europeus realizados por investigadores juniores do *SAFE Cluster*.

Finalmente, investigadores seniores do Instituto RISE (Suécia), da Universidade de Aveiro (Portugal) e da Universidade de *New South Wales* (Austrália) contribuíram em áreas específicas descritas no documento.

# 2. Fundamentos do comportamento do fogo

## 2.1. Fatores que afetam a propagação do fogo

A propagação de um incêndio florestal depende de vários fatores que afetam o comportamento do fogo e podem ser agrupados, de acordo com Viegas (2004), em quatro conjuntos de fatores: 1) topografia; 2) vegetação; 3) meteorologia e 4) tempo.

Embora os fatores anteriormente referidos não sejam independentes uns dos outros, é possível analisar cada um deles separadamente para entender melhor seu papel na propagação e no comportamento do fogo. O papel da topografia, combustíveis e meteorologia serão abordados posteriormente. O fator "Tempo" corresponde ao tempo cronológico e realça o caráter dinâmico dos processos de normal propagação do fogo, mas que são evidenciados em incêndios com comportamento extremo.

Nos capítulos 3 a 6, esses fatores serão analisados, apresentando vários conceitos e ideias para entender melhor o conceito de Comportamento Extremo do Fogo (CEF).

Na abordagem acima, a supressão do incêndio não é considerada, mas como veremos, se as condições forem favoráveis para a supressão do incêndio, maiores serão as possibilidades de que o combate ao incêndio tenha sucesso para impedir a propagação do fogo.

## 2.2. Meteorologia do fogo

### 2.2.1. Fatores meteorológicos

A meteorologia é o estado da atmosfera que circunda a Terra, que é descrito por uma série de parâmetros ou propriedades que estão constantemente a mudar, tanto no tempo quanto no espaço. Essas propriedades, quando descritas considerando a sua influência sobre incêndios florestais, constituem a meteorologia do fogo. Os fatores meteorológicos, que afetam direta ou indiretamente o comportamento do fogo, podem ser divididos em dois grupos: i) fatores condicionantes, e ii) fatores determinantes.

i) **Fatores condicionantes** – são favoráveis à ignição por condicionarem a carga e o teor de humidade dos combustíveis finos. Este grupo inclui os seguintes fatores: precipitação, temperatura do ar e humidade relativa.

A precipitação é expressa em milímetros (litros de água que caem no solo por metro quadrado). Esta afeta o teor de água do solo e também o teor de humidade dos combustíveis florestais (vivos e mortos). A persistência da precipitação no início do ano hidrológico (outubro no hemisfério norte) favorece o crescimento de vegetação fina (combustíveis finos), que pode estar disponível para suportar a propagação do fogo no verão. No entanto, a ausência de precipitação durante os meses que antecedem o verão, com valores muito inferiores à normal climática (valores médios de precipitação que caracterizam uma região ao longo de um período de 30 anos), pode levar a uma situação de seca ou défice hídrico que favorece a secura geral dos combustíveis florestais, que estão disponíveis para suportar a propagação do fogo e contribuem para maiores áreas queimadas pelos incêndios de verão (Viegas & Viegas, 1994).

A temperatura do ar varia num ciclo diurno devido ao efeito da radiação solar, mas também pode variar devido à entrada de massas de ar mais quentes ou mais frias. Normalmente, a temperatura do ar aumenta durante o dia (desde o nascer do sol) até cerca das 15:00 e diminui a partir dessa hora. Este ciclo diurno é de grande importância para os incêndios florestais, pois

afeta diretamente a inflamabilidade dos combustíveis florestais, uma vez que a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura dos combustíveis até o ponto de ignição depende de sua temperatura inicial, do ar circundante e do teor de humidade do combustível, que é muito dependente da temperatura do ar (Schroeder & Buck, 1970).

A Humidade Relativa do ar (HR) é a percentagem da massa de vapor de água no ar em relação à massa de vapor necessária para saturar o ambiente. Um valor de HR igual a 100% corresponde a uma atmosfera saturada, na qual há condensação, enquanto um valor de 30% ou menos corresponde a um ar muito seco, o que também favorece a secagem de combustíveis florestais. A HR também tem um ciclo diurno, mas tende a diminuir ao longo do dia (desde o nascer do sol) e aumentar no final do dia – basicamente, a HR é inversamente proporcional ao ciclo de temperatura.

ii) **Fatores determinantes** – afetam diretamente a propagação do fogo. Este grupo de fatores inclui o vento e a estabilidade atmosférica.

O vento é geralmente definido como o movimento horizontal do ar atmosférico (vento atmosférico) caracterizado pelos seguintes componentes: velocidade do vento (ou intensidade) em m/s, e direção (de onde o vento vem) referida ao Norte em graus. A velocidade e a direção do vento mudam de um ponto para o outro, e em um dado ponto o vento muda continuamente ao longo do tempo (variação lenta). Por outro lado, existe uma outra variação devido à turbulência do fluxo do vento, que se manifesta por variações bruscas na velocidade do vento num curto período. Essas variações, consideradas como rajadas, têm influência direta nas condições de propagação do fogo.

O valor da velocidade do vento aumenta com a altitude (é zero perto do solo e aumenta até atingir um valor máximo no topo da camada limite atmosférica). No entanto, em um incêndio florestal, esse perfil pode ser alterado devido ao vento induzido pelo fogo, o que pode levar ao rápido desenvolvimento do fogo mesmo se o vento atmosférico for pouco intenso. Portanto, num incêndio florestal, o vento local deve ser definido como a soma do *vento atmosférico* e do *vento induzido pelo fogo*.

A estabilidade atmosférica é caracterizada pela variação da temperatura do ar na direção vertical, medida pelo seu gradiente de temperatura ou taxa de variação, $dT/dz$, [°C/m], que determina se a atmosfera é estável, neutra ou instável. A estabilidade atmosférica pode encorajar ou suprimir o movimento vertical do ar. O calor produzido pela combustão gera um movimento vertical do ar, pelo menos próximo à superfície, mas a circulação convectiva assim estabelecida é afetada diretamente pela estabilidade do ar (Schroeder & Buck, 1970). Por sua vez, a corrente de ar para o fogo em níveis baixos é afetada, e isso produz um efeito na propagação do fogo. Além disso, de muitas maneiras indiretas, a estabilidade atmosférica afetará o comportamento do fogo, por exemplo, os ventos tendem a ser turbulentos e com muitas rajadas quando a atmosfera é instável, e esse tipo de fluxo de ar faz com que os incêndios se comportem de forma errática (Schroeder & Buck, 1970). As Tempestades com fortes correntes ascendentes e descendentes desenvolvem-se quando a atmosfera é instável e contém humidade suficiente (Schroeder & Buck, 1970). Os raios das tempestades podem provocar incêndios florestais e os ventos característicos podem ter efeitos adversos no comportamento do fogo (Schroeder & Buck, 1970). No Capítulo 3 apresentam-se mais informações a este respeito.

### 2.2.2. Perigo de incêndio

O perigo de incêndio indica a probabilidade física de que um incêndio comece e se propague (UNISDR, 2009). O perigo de incêndio é expresso como índices de perigo de incêndio que são estimados em sistemas de clima de incêndio ou sistemas de perigo de incêndio. Esses sistemas são baseados em fatores meteorológicos e no seu efeito no teor de humidade dos combustíveis florestais.

Uma variedade de sistemas de perigo de incêndio é usada em muitas partes do mundo para integrar informações meteorológicas e de combustível em uma única ou pequena quantidade de medidas (Dowdy *et al.*, 2009). Essas medidas podem então ser aplicadas a regiões para emitir avisos ou mais localmente para estimar a dificuldade de supressão de um único incêndio ou complexo de incêndios (Dowdy *et al.*, 2009).

Os principais sistemas de perigo de incêndio, geralmente usados em planos de prevenção e avaliação de incêndios ao redor do mundo, são:

- o sistema Australiano, McArthur *Forest Fire Danger Index* (FFDI) (McArthur, 1967); na Austrália, o FFDI é amplamente usado para prever a influência do clima no comportamento do fogo, e o *Australian Bureau of Meteorology* normalmente emite previsões do *Grassland and Forest Fire Danger Index* (GFDI e FFDI) para uso por autoridades e agentes de proteção civil locais (Dowdy *et al.*, 2009);
- o sistema dos Estados Unidos da América, *National Fire Danger Rating System* (NFDRS) (Deeming *et al.*, 1978; Bradshaw *et al.*, 1984); introduzido pela primeira vez em 1964, foi atualizado em 1972, 1978, 1988 e em 2016 para integrar ciência mais recente e processamento aprimorado (NWCG, 2021a); este sistema combina os efeitos de estados existentes e esperados de fatores de perigo de incêndio selecionados em um ou mais índices qualitativos ou numéricos que refletem as necessidades de proteção contra incêndio de uma área (USDA/Forest Service, 2023).
- o sistema Canadiano, Fire Weather Index System (CFWIS) (Van Wagner, 1987); é o resultado de anos de pesquisa aplicada que foi realizada no Canadá, desenvolvido em 1970 com versões atualizadas em 1976, 1984 e 1987 (Dowdy *et al.*, 2009). O CFWIS é um sistema abrangente de ferramentas projetado para avaliar fatores ambientais que influenciam a ignição, propagação e comportamento de incêndios florestais (NWCG, 2021a), e é adaptável o suficiente para ter sido implementado em países com climas muito diferentes do Canadá (Dowdy *et al.*, 2009).

O CFWIS é apresentado de forma sucinta, pois constitui uma linguagem comum para a comunidade operacional europeia abordar o perigo de incêndio.

O CFWIS baseado na versão de 1987 (Van Wagner, 1987) estima o teor de humidade dos combustíveis mortos usando uma combinação de dados meteorológicos diários às 12:00 no horário local (temperatura, humidade relativa, precipitação e vento). O sistema calcula três índices de humidade de combustível, cada um com diferentes taxas de secagem, profundidade nominal do combustível e cargas nominais do combustível: i) FFMC – Índice de Humidade dos Combustíveis Finos (representa o teor de humidade do combustíveis finos da floresta), ii) DMC – Índice de Manta morta (representa o teor de humidade de matéria orgânica compactada em decomposição – manta morta) e, iii) DC - Código de Secura (representa o teor de humidade de matéria orgânica compacta em profundidade moderada). Cada um desses índices é calculado com um intervalo de tempo diário e inclui o valor do dia anterior como uma entrada para o valor do dia atual (Dowdy *et al.*, 2009).

A combinação desses códigos produzirá os índices de comportamento do fogo: iv) ISI – Índice de propagação inicial (estima a influência combinada da velocidade do vento e do FFMC na propagação do fogo), v) BUI - Índice de combustível disponível (é uma combinação de DMC e DC, representando a disponibilidade do combustível mais profundo ou de maior tamanho) e, vi) FWI - Índice Meteorológico de Incêndio, que é a principal saída do sistema; FWI é uma combinação de ISI e BUI, representando a intensidade máxima diária do fogo em propagação como a taxa de saída de energia por unidade de comprimento da frente de fogo (Van Wagner, 1987). O aumento do FWI corresponde a um aumento do perigo de incêndio e geralmente é classificado de acordo com cinco classes: Baixo, Moderado, Alto, Muito Alto e Extremo.

Em muitos países europeus, o FWI foi adotado, pois mostrou um bom desempenho como representativo das condições de risco de incêndio quando comparado a outros sistemas de risco de incêndio (Viegas *et al.*, 1999). No entanto, a adoção do FWI por países diferentes do Canadá, ocasionalmente exige modificações nas práticas existentes (por exemplo, Alexander, 2008) e, portanto, precisa ser calibrado com dados locais, geralmente realizados por meio de uma análise de dados históricos de clima de incêndio e registos históricos de incêndio (por exemplo, De Groot *et al.*, 2005; Viegas *et al.*, 2004; Alves *et al.*, 2018).

A Tabela 1 apresenta as classes FWI definidas pela rede EFFIS (*European Forest Fire Information System*) como o método para avaliar o nível de risco de incêndio de forma harmonizada em toda a Europa (EFFIS/JRC, 2023). No entanto, dadas as diferentes condições climáticas na Europa, o EFFIS publica dois indicadores que fornecem informações sobre a variabilidade local/temporal do FWI em comparação com uma série histórica de aproximadamente 30 anos (EFFIS/JRC, 2023).

*Tabela 1. Classes de perigo de incêndio para FWI na Europa definidas pela EFFIS. Fonte: EFFIS/JRC (2023).*

| Classes de Perigo de Incêndio | FWI |
|---|---|
| Baixo | <11,2 |
| Moderado | 11,2 – 21,3 |
| Alto | 21,3 – 38,0 |
| Muito alto | 38,0 – 50,0 |
| Extremo | >50,0 |

Uma classe de perigo de incêndio "Muito Extremo" foi introduzida em junho de 2021 para fornecer discriminação sobre o nível de perigo de incêndio em áreas extensas que foram inicialmente classificadas como Perigo de Incêndio "Extremo" na região do Mediterrâneo durante os meses de verão. A classe "Muito Extremo" inclui áreas com valores de FWI acima de 70 (EFFIS/JRC, 2023).(EFFIS/JRC, 2023).

### 2.2.3. Perigo de incêndio e teor de humidade do combustível morto

As alterações climáticas afetam fortemente o teor de humidade dos combustíveis mortos (os materiais que se encontram no solo da floresta), uma vez que alteram o seu teor de água em paralelo com as condições atmosféricas (Chuvieco *et al.*, 2010). Consequentemente, os combustíveis mortos ficam mais secos e mais propensos a inflamar. O teor de humidade dos combustíveis mortos é um elemento crítico do comportamento do fogo e um dos indicadores mais utilizados e mais antigos na previsão do perigo de incêndio (Carmo *et al.*, 2022). O teor de humidade do combustível das espécies vivas não é normalmente incluído no sistema de perigo de incêndio, uma vez que é mais difícil de estimar a partir de dados meteorológicos do que a

humidade dos combustíveis mortos (Chuvieco *et al.*, 2014). No caso dos incêndios severos pode ser analisado utilizando o índice FFMC (Carmo *et al.*, 2022). Este índice de humidade é um indicador da relativa facilidade de ignição e da possível ocorrência de focos secundários, uma vez que está diretamente relacionado com o teor de humidade dos combustíveis mortos finos ($m_f$) de acordo com a Equação 1 definida por Van Wagner (1987).

$$FFMC = 59.5 \times \frac{250.0 - m_f}{147.2 + m_f} \qquad \text{Equação 1}$$

O teor de humidade dos combustíveis finos mortos (por exemplo, agulhas de pinheiro de *Pinus pinaster*) altera-se inversamente com o FFMC. Estas alterações do FFMC são incorporadas no ISI e, consequentemente, no FWI que é o parâmetro de saída final do sistema relacionado com o potencial de perigo de incêndio. Quando o teor de humidade dos combustíveis mortos é baixo (e o FFMC é elevado), os incêndios iniciam-se facilmente e o vento e outros fatores podem provocar uma propagação mais rápida e intensa do fogo (correspondente a um elevado FWI). Durante o verão o teor de humidade dos combustíveis mortos costuma variar entre os 3% e os 30% (Ribeiro, 2011). Recentemente descobriu-se que o baixo teor de humidade dos combustíveis finos pode determinar quando podem ocorrer grandes incêndios, existindo uma relação entre os limites de humidade e as transições do comportamento do fogo (Carmo *et al.*, 2022). Quando o seu valor é inferior a 5%, existe uma forte possibilidade de um incêndio florestal apresentar características extremas de comportamento do fogo (Viegas *et al.*, 2017). A variação da $m_f$ durante os grandes incêndios florestais é fundamental para a compreensão dos eventos extremos (Viegas *et al.*, 2017). Mesmo no período noturno, onde a eficácia do combate aos incêndios se torna mais favorável, pelo aumento da humidade relativa e pela diminuição da temperatura do ar, torna-se importante saber se o teor de humidade está a aumentar ou a diminuir. A tendência crescente para noites mais secas e quentes (impulsionadas por ondas de calor, por exemplo), e consequentemente a falta de recuperação da $m_f$, pode levar a incêndios florestais mais intensos durante a noite, cujo comportamento pode ser subestimado pelas equipas de supressão durante esse período.

O teor de humidade dos combustíveis mortos pode ser medido no campo (e.g. MCFIRE/ADAI, 2022; NWCG, 2021b), pode ser estimado por bastões indicadores de humidade do combustível (e.g. van der Kamp *et al.*, 2017) e pode ser estimado indiretamente por vários modelos (Viney, 1991). Os combustíveis finos mortos podem estar em equilíbrio aproximado com os seus ambientes imediatos (Lopes *et al.*, 2014). O teor de humidade de equilíbrio (EMC) de um elemento combustível sob determinadas condições ambientais constantes é o teor de humidade que o elemento atingirá se for deixado durante o tempo suficiente nessas condições (Viney, 1991). Exceto após a chuva, uma estimativa razoavelmente precisa do seu teor de humidade e, portanto, da sua inflamabilidade pode ser obtida a partir da EMC correspondente à temperatura e humidade do ar circundante imediato (Schroeder & Buck, 1970).

A Figura 1 apresenta a variação horária dos combustíveis mortos finos na Lousã – região Centro de Portugal – para julho de 2022. Este período foi marcado por uma extensa onda de calor que atingiu o país (2/Jul - 18/Jul), e o Oeste dos países europeus e uma época extrema de incêndios florestais. Como exemplo de variação de $m_f$ para os diferentes métodos, a figura apresenta: valores diários de $m_f$ de agulhas de pinheiro de *Pinus pinaster* medidos no campo através do método gravimétrico, valores horários de $m_f$ medidos num sensor de humidade de bastão de combustível (CS506 10 horas) e, valores horários de $m_f$ estimados para *Pinus pinaster* de acordo com a modelação seguida por Lopes *et al.* (2014) através de dados meteorológicos (temperatura e humidade relativa do ar).

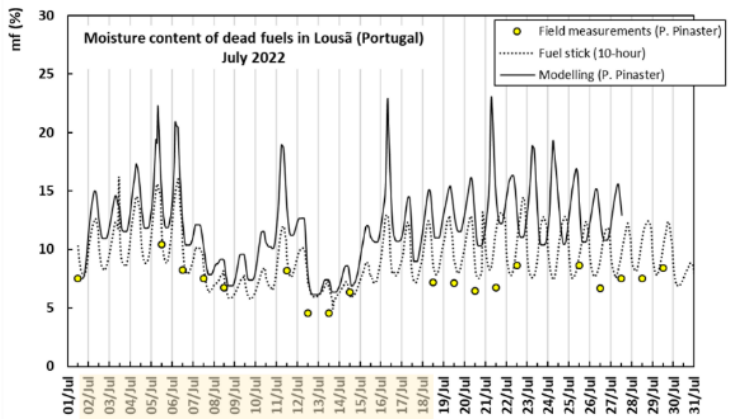



*Figura 1. Teor de humidade dos combustíveis mortos ($m_f$) na Lousã durante o mês de julho de 2022. Legenda: Medições de campo: $m_f$ de agulhas de Pinus pinaster no campo; Vareta de combustível: $m_f$ medido por sensor de humidade do combustível (CS506 10 horas); Modelação: $m_f$ estimado para agulhas de Pinus pinaster segundo Lopes et al. (2014). Período em destaque (2 a 18 de julho): onda de calor. (Ilustração do autor)*

## 2.3. Propriedades dos combustíveis

Quando se abordam os incêndios florestais, a vegetação natural é normalmente considerada como o "combustível" necessário para os processos de combustão. As propriedades físicas e químicas de qualquer combustível específico determinam a sua facilidade de ignição e de manutenção da combustão. Esta secção descreve as principais propriedades que caracterizam as partículas de combustível e os complexos de combustível.

As especificidades dos combustíveis que podem ser encontrados na interface urbano-florestal serão descritas na secção correspondente (4.1).

Numa abordagem mais genérica, os combustíveis são normalmente classificados de acordo com 2 parâmetros:

i. Estado vegetativo, dividindo-os em combustíveis vivos (ervas, arbustos, árvores) e combustíveis mortos (folhas secas ou caídas, ervas, ramos caídos, etc.). Considera-se que os combustíveis mortos têm uma maior influência na propagação dos incêndios de superfície.

ii. Estrato, considerando a sua distribuição vertical, ou seja, combustíveis do solo, combustíveis superficiais e combustíveis aéreos. O tipo de propagação do fogo está relacionado com o estrato, ou camada, em que se encontram os combustíveis: fogos de solo, de superfície e de copas. As partículas de combustível nas três camadas podem ser semelhantes ou equivalentes em propriedades.

Quando existe a necessidade de quantificar os combustíveis para modelação e avaliação do comportamento do fogo, é necessária uma descrição mais pormenorizada. Esta descrição é feita principalmente a dois níveis: as partículas e o leito de combustível.

### 2.3.1. Partículas de combustível

As partículas individuais de combustível, que formam qualquer tipo de combustível, têm várias características distintas que contribuem de forma diferente para os processos de ignição e combustão. Ao nível das partículas, as propriedades mais importantes dos combustíveis florestais são:

i. Classe de dimensão das partículas

Esta é uma das propriedades do combustível que mais afeta a combustão e o comportamento do fogo (Byram, 1959), uma vez que as partículas mais pequenas requerem uma quantidade menor de energia ou de tempo para entrar em combustão. A relação entre a dimensão das partículas e o teor de humidade do combustível é muito acentuada. De acordo com a classificação original, não publicada, de George Byram em 1963 (Byram & Nelson, 2015), mais tarde adotada para o Sistema Nacional de Classificação de Perigo de Incêndio (*National Fire-Danger Rating System)* nos EUA (Bradshaw *et al.*, 1984), os combustíveis são divididos de acordo com o seu "tempo de retardação" (*timelag interval)*. Este é definido como "o tempo necessário para que os combustíveis percam aproximadamente dois terços do seu teor de humidade inicial". Em termos simples, se a humidade de uma partícula de combustível estiver em equilíbrio com o ambiente (EMC, já referido na Secção 2.2), ou seja, sem ganhos nem perdas, o tempo de retardação dessa partícula corresponde ao tempo médio que levaria a atingir novamente esse equilíbrio caso houvesse uma alteração das condições ambientais.

As classes consideradas têm o nome do intervalo de tempo médio necessário: 1 hora, 10 horas, 100 horas e 1000 horas. O raciocínio subjacente a este conceito é que, em condições ambientais constantes, a taxa de secagem do combustível depende da espessura das partículas (Byram & Nelson, 2015): as partículas mais finas perdem humidade mais rapidamente do que as partículas mais grossas. Estas classes representam as seguintes dimensões do combustível, respetivamente: 1Hr) fino ou leve, com diâmetro menor que 6 mm (agulhas, folhas, ervas); 10Hr) regular, com diâmetro entre 6 e 25 mm (ramos finos e caules de arbustos); 100Hr) médio, com diâmetro entre 25 e 75 mm (ramos); 1000Hr) grosso ou pesado, com diâmetro maior que 75 mm (ramos grossos e troncos).

ii. Forma

Esta propriedade é expressa como a relação área superficial/volume (SAV), ou seja, a relação entre a superfície exterior de uma partícula e o seu volume, geralmente em $cm^2/cm^3$ ($cm^{-1}$) ou em $m^2/m^3$ ($m^{-1}$). Traduz a aptidão de uma partícula para a combustão, uma vez que a quantidade de energia que pode receber por unidade de tempo aumenta com a superfície exposta (Rothermel, 1972).

As partículas de combustível com SAV grande incendiar-se-ão mais rapidamente do que as partículas com SAV relativamente pequena. Por exemplo, os grandes troncos têm valores baixos de SAV e as agulhas de pinheiro ou as herbáceas têm valores elevados de SAV.

iii. Composição química

O processo de combustão pode ser influenciado pela composição química dos combustíveis, em maior ou menor grau, acelerando ou retardando a combustão. Bradshaw *et al.* (1984) consideram três propriedades químicas importantes: a) poder calorífico, ou a energia disponível por unidade de massa de combustível através da combustão; b) teor mineral total, a fração de uma massa de combustível composta por minerais inorgânicos (apenas os minerais orgânicos podem sustentar a combustão); e c) teor mineral efetivo, ou o teor mineral ativo numa partícula de combustível que interfere com os processos químicos da combustão, nomeadamente a libertação de gases voláteis.

iv. Densidade

A densidade afeta a ignição e a velocidade de propagação (Countryman, 1982). Juntamente com o teor de humidade, tem um forte impacto na condutividade térmica de um combustível (Chandler *et al.*, 1983). Os combustíveis com uma densidade mais baixa inflamam-se em menos tempo para a mesma quantidade de calor ou requerem menos calor para a mesma quantidade de tempo.

v. Teor de humidade

Representa a quantidade de água por massa seca do combustível e influencia diretamente a possibilidade de um combustível se inflamar e entrar em combustão. Em termos de avaliação do comportamento do fogo, a humidade do combustível vivo e morto deve ser distinguida.

A humidade do combustível morto depende essencialmente das condições ambientais (Bradshaw *et al.*, 1984), e diferentes classes de tamanho podem ter diferentes teores de humidade no mesmo instante. Como é de esperar, a velocidade de propagação do fogo (Viegas *et al.*, 2013) e a probabilidade de ignição (Viegas *et al.*, 2014) aumentam à medida que a humidade do combustível diminui. Um teor de humidade dos combustíveis finos mortos muito baixo (inferior a 5-7%) indica uma elevada probabilidade de comportamento extremo do fogo (incêndios de copas, projeções de partículas incandescentes, velocidade de propagação e intensidade da frente de fogo muito elevadas). Mais informações sobre este parâmetro podem ser encontradas na Secção 2.2.3.

Os combustíveis vivos têm teores de humidade que resultam da interação de processos físicos e fisiológicos (Pyne *et al.*, 1996), por conseguinte, a sua variabilidade temporal é muito diferente da dos combustíveis mortos (Rego *et al.*, 2021). O teor de humidade do combustível vivo é geralmente superior ao teor de humidade do combustível morto, para as mesmas condições ambientais, ultrapassando frequentemente os 100%.

### 2.3.2. Leitos de combustível e tipos de combustível

Ao descrever os combustíveis florestais numa determinada área, a disposição de todas as partículas de combustível nas diferentes camadas verticais (solo, superfície e combustíveis aéreos) é designada por leito de combustível. Cada camada, ou estrato, pode ter diferentes tipos de combustíveis naturais. Um leito de combustível pode ter um, dois ou os três estratos. Por exemplo, uma pastagem tem normalmente apenas um (herbáceas), os matos podem ter dois (herbáceas, folhada, arbustos) e uma floresta adulta pode ter os três (camada orgânica, folhada, herbáceas, arbustos e árvores).

A delimitação de cada estrato no perfil vertical é, de certa forma, subjetiva, mas segue normalmente a representação esquemática da Figura 2.

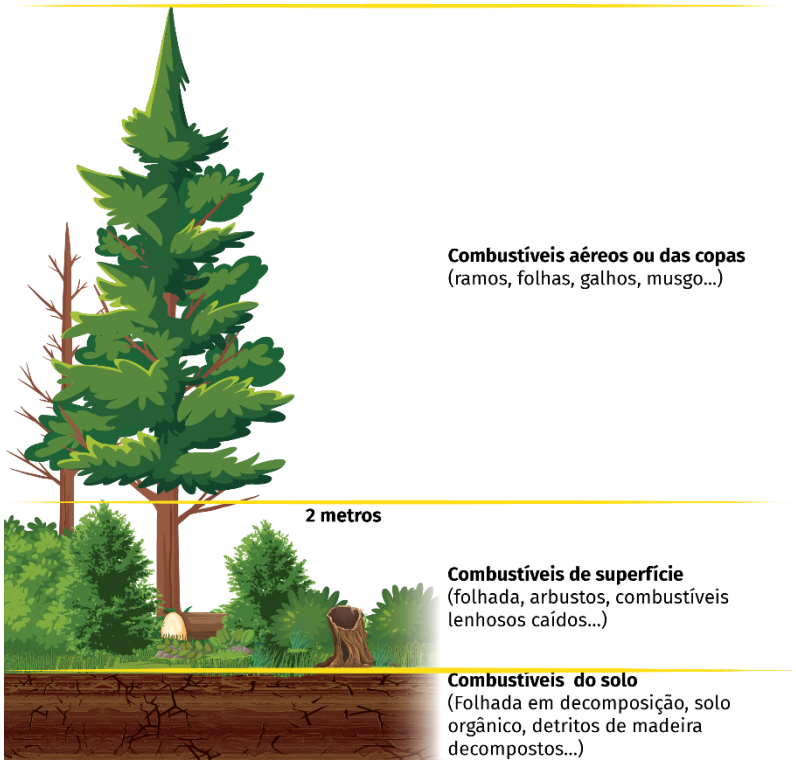



*Figura 2. Representação esquemática dos estratos do leito de combustível. (créditos de imagem: ADAI)*

Esta caraterização está diretamente relacionada com as necessidades dos modelos de comportamento do fogo, podendo cada um deles suportar uma propagação específica do fogo: fogo de solo, fogo de superfície e fogo de copa. Mais detalhes podem ser encontrados na secção de propagação do fogo.

Na década de 1930, Hornby (1936) introduziu o termo "tipo de combustível", baseado em critérios qualitativos, que estabelecia quatro tipos com base no seu potencial de propagação do fogo e resistência ao controlo. Atualmente, o termo é aplicado para descrever genericamente a vegetação predominante no leito de combustível ou mesmo em cada estrato. Por exemplo, um leito de combustível pode ser um pinhal, se os pinheiros forem predominantes em geral, mas a camada superficial pode ser considerada arbustos ou folhada, se um deles prevalecer nessa camada específica. Ao selecionar a camada responsável pela propagação do fogo, isto é importante para a modelação do comportamento do fogo.

No que diz respeito à gestão do fogo, as espécies de vegetação não são muito relevantes, uma vez que a mesma espécie pode apresentar comportamentos de fogo muito diferentes quando o seu leito de combustível e as características das partículas são diferentes (Anderson, 1982; Riaño *et al.*, 2002).

As características mais importantes do leito de combustível a considerar na avaliação do comportamento do fogo são:

i. Carga de combustível

A carga de combustível exprime a massa de material vegetal combustível por unidade de área e é geralmente expressa em kg/m$^2$ ou t/ha. Dependendo das necessidades dos modelos de comportamento do fogo, este parâmetro pode ser apresentado como um valor total ou dividido por estrato (solo, superfície, copas), classe de tamanho (fino, regular, médio e grosso) ou estado vegetativo (vivo e morto).

Para um leito de combustível específico, a carga de combustível e o teor de humidade determinam a quantidade de combustível consumido e o calor libertado durante a combustão.

A quantidade de combustível que é consumida influencia diretamente os efeitos do fogo na vegetação e nos solos (Rego *et al.*, 2021), propagação e intensidade do fogo (Alexander & Cruz, 2020) e os potenciais impactos das emissões de fogo e de fumo (Miranda, 2004; Fernandes *et al.*, 2022).

ii. Altura do combustível

Também designada por profundidade, esta é uma estimativa da dimensão vertical da zona de combustão e é necessária para estimar a compactação do leito de combustível (Cruz & Viegas, 1995). Embora possa exigir alguma formação para definir o topo do leito de combustível, este parâmetro pode ser medido fácil e rapidamente, pelo que é normalmente utilizado em técnicas de dupla amostragem para estimar a carga de combustível.

iii. Compactação

A compactação de um leito de combustível refere-se ao combustível disponível por unidade de volume e é incorporada na previsão do comportamento do fogo como densidade aparente ($kg/m^3$).

O grau de compactação reflete a disponibilidade de ar para a combustão de cada partícula e a facilidade de transferência de calor para as partículas imediatamente à frente do fogo (Chandler *et al.*, 1983). Nos combustíveis terrestres, a compactação influencia significativamente a variação do teor de humidade, uma vez que os combustíveis altamente compactados limitam a evaporação.

Uma menor compactação significa que há mais oxigénio disponível para a combustão. No entanto, se as partículas de combustível estiverem demasiado afastadas, deixa de haver proximidade suficiente para a necessária troca de calor e a consequente ignição das partículas adjacentes. Todas as classes de tamanho têm um ponto de compactação ideal que maximiza a transferência de calor e a presença de oxigénio e, portanto, a combustão

iv. Continuidade

A continuidade do combustível exprime "o grau ou a extensão da distribuição contínua ou ininterrupta das partículas de combustível num leito de combustível, afetando assim a capacidade de um incêndio manter a combustão e propagar-se" (Drury, 2020). Existe continuidade quando os combustíveis se encontram na zona de combustão um do outro, ou seja, quando a combustão de um tem um efeito de pré-aquecimento sobre o outro.

Este termo é utilizado para os combustíveis de superfície (continuidade horizontal) e para os combustíveis em escada (continuidade vertical). “Combustíveis em escada” é o termo usado para designar o leito de combustível mais ou menos contínuo que pode suportar a propagação do fogo a partir dos combustíveis de superfície para os combustíveis das copas.

v. Humidade de extinção

Esta propriedade representa o teor de humidade do combustível de um leito a partir do qual um incêndio não se propaga. É um parâmetro essencial para a aplicação do modelo de Rothermel, que inicialmente o considerou constante entre todos os tipos de combustível (30%). Rapidamente se verificou que podia variar com a compactação do leito de combustível, a

dimensão das partículas de combustível, a velocidade do vento e o declive (Bradshaw *et al.*, 1984) ou mesmo a localização no perímetro do incêndio (Fernandes *et al.*, 2008).

Os valores de humidade de extinção utilizados nos modelos de combustível (ver abaixo) podem ir de 12% a 40%, dependendo das condições acima mencionadas. Nos combustíveis vivos, os valores podem ser mais elevados.

### 2.3.3. Modelos de combustível

Com a publicação do modelo de propagação do fogo de Rothermel (1972) surgiu a necessidade de descrever quantitativamente os combustíveis florestais com um número relativamente reduzido de parâmetros que permitissem prever o comportamento do fogo à superfície. Assume-se que a vegetação é homogénea numa determinada área, tal como a meteorologia e a topografia, permitindo que o fogo mantenha características constantes, que podem então ser previstas (Ribeiro *et al.*, 2021).

Rothermel definiu o modelo de combustível como "conjunto completo de dados de entrada [do combustível] para o modelo matemático de propagação do fogo" e listou parâmetros para 11 modelos de combustível (Scott & Burgan, 2005). Albini (1976) aperfeiçoou ainda mais esses modelos de combustível e acrescentou dois outros, criando o que atualmente se designa por 13 modelos de combustível originais de comportamento do fogo, ou os 13 modelos de combustível do NFFL (Northern Forest Fire Laboratory). Este conjunto, amplamente utilizado em todo o mundo, agrupa os combustíveis em 4 classes (herbáceas, arbustos, árvores e resíduos de exploração), de acordo com o vetor primário de propagação do fogo, e foi descrito em pormenor por Anderson (1982). Mais recentemente, Scott & Burgan (2005) alargaram este conjunto de modelos para 40, a fim de caraterizar um maior número de situações e visualizar melhor o efeito da gestão dos combustíveis, utilizando ferramentas de simulação do comportamento do fogo.

Na Europa, houve algumas tentativas de criar modelos de combustível adaptados, como o sistema Prometheus (PROMETHEUS, 2000), o projeto FUELMAP (FUELMAP, 2011) que desenvolveu a classificação dos combustíveis europeus utilizados pelo EFFIS – European Forest Fire Information System (EFFIS, 2017) ou o projeto FirEUrisk, que desenvolveu uma classificação do tipo de combustível com um cruzamento com os modelos de combustível de Scott & Burgan (Aragoneses *et al.*, 2023).

O modelo de Rothermel (1972) prevê a propagação do fogo à superfície, pelo que os modelos de combustível descrevem normalmente a camada de combustíveis à superfície. As características que são quantificadas num modelo de combustível, já descritas acima, são:

- Carga de combustível por estado vegetativo (vivo ou morto) e classe de tamanho (1 hora, 10 horas, 100 horas).
- Altura do leito de combustível.
- Rácio superfície/volume das partículas de combustível por estado vegetativo (vivo ou morto).
- Poder calorífico.
- Humidade de extinção dos combustíveis mortos.

As ferramentas de simulação do comportamento do fogo, como o BehavePlus (Andrews, 2014) ou o FlamMap (Finney, 2006), têm os 13 e 40 conjuntos de modelos de combustível já incorporados, permitindo aos utilizadores simular facilmente o comportamento do fogo. A Figura 3 ilustra os resultados do cálculo da velocidade de propagação do fogo no BehavePlus 6 para diferentes declives, com o vento a favor do declive a 20 km/h, em 3 modelos de combustível diferentes do conjunto NFFL.

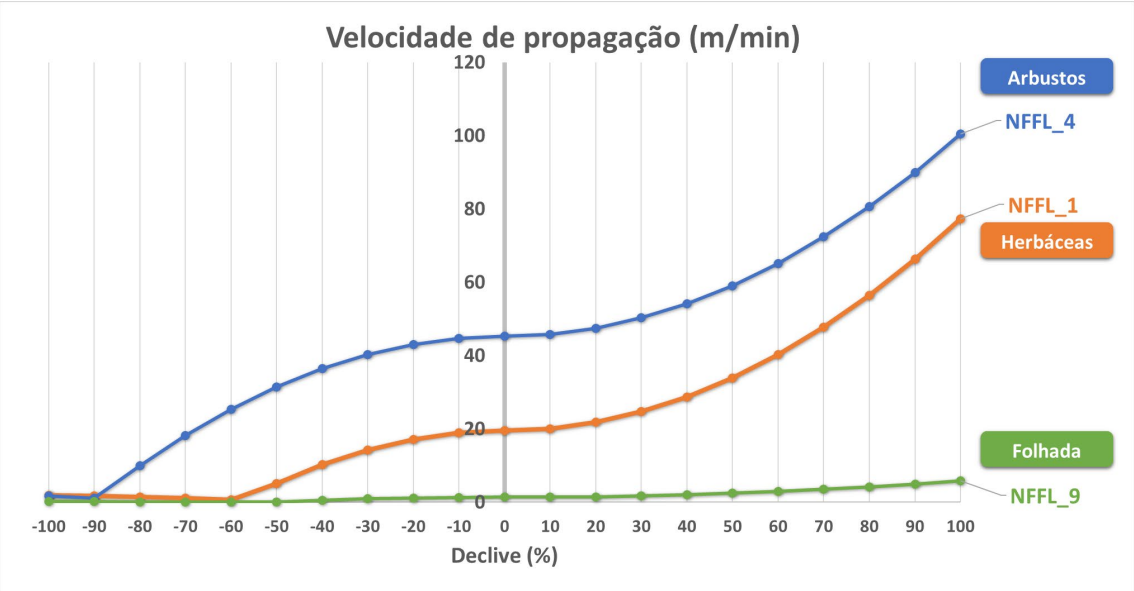



*Figura 3. Exemplo de simulações de comportamento do fogo, utilizando o BehavePlus 6, para 3 modelos de combustível diferentes, em diferentes declives e com vento ascendente de 20km/h.*

Muitas vezes são necessários modelos de combustível personalizados para regiões específicas, por exemplo, o conjunto de 14 modelos de combustível desenvolvidos para o Centro de Portugal por Cruz (2005) ou o conjunto de 18 modelos desenvolvidos por Fernandes *et al.* (2009) para Portugal Continental. Este desenvolvimento inclui a quantificação das propriedades do leito de combustível e das partículas de combustível identificadas anteriormente, mas, mais importante ainda, a calibração dos modelos de combustível face ao comportamento observado do fogo (Rego *et al.*, 2021)

Em termos de aplicação prática, para além da utilização de ferramentas de simulação de incêndios, os modelos de combustíveis são normalmente acompanhados de estimativas de propagação do comportamento do fogo para uma fácil avaliação no terreno, muitas vezes com guias fotográficos para permitir uma correspondência visual dos modelos de combustíveis com os complexos de combustíveis observados (Anderson, 1982; Cruz, 2005; Patrick, 2009).

## 2.4. Topografia

A topografia é um aspeto fundamental na propagação e no comportamento do fogo. A topografia inclui vários aspetos ou parâmetros do terreno, que também podem ser descritos como paisagem. Aqui apresentamos algumas ideias gerais, bem como as secções dedicadas a alguns aspetos que alteram significativamente o comportamento do fogo. Em certas condições, a propagação do fogo pode ser dominada pelo efeito da topografia, envolvendo também padrões convectivos específicos.

Em resumo, a topografia pode influenciar vários aspetos importantes para o comportamento do fogo, incluindo:

- Padrões de vento – as correntes de vento podem ser canalizadas ou criadas por características da paisagem, diferenças de altitude, ou por locais específicos, ou seja, podem ser afetadas pela presença de desfiladeiros, áreas montanhosas (brisas de montanha) ou pelo mar (brisas marítimas).
- Acumulação e localização de combustível – as regiões da paisagem com maior sombra ou humidade, como as encostas ou desfiladeiros, podem ter um aumento de produção e

acumulação de combustível. Por outro lado, zonas mais secas, como encostas e cumes expostos, podem levar ao desenvolvimento de um combustível com menor carga, mas por ser mais contínuo e mais seco, pode induzir uma propagação do fogo mais rápida e intensa.

- Aceiros naturais e artificiais – Grandes massas de água e grandes cadeias montanhosas podem funcionar como aceiros integrados na paisagem devido à falta de combustível. Alterações provocadas pelo homem que impactam as encostas ou a topografia, como por exemplo as centrais eólicas e outras para produção de energia, ou os socalcos, podem afetar a propagação do fogo.

### 2.4.1. Declive

O declive em relação à referência horizontal, ou gradiente de terreno, é um parâmetro importante que caracteriza a topografia. Pode ser medido como um ângulo ou uma percentagem de inclinação (indicando a quantidade de metros que subimos quando nos deslocamos horizontalmente por uma determinada distância). As encostas mais íngremes são bem conhecidas como um fator-chave na propagação e intensidade do fogo. Durante a combustão a inclinação as chamas aproximam-se do combustível, o que devido ao seu menor ângulo favorece significativamente os processos de transferência de calor, levando ao aumento da progressão do fogo a subir uma encosta. No entanto, se a frente de incêndio progride contra o declive, progredir de forma descendente, estes fenómenos não são tão eficazes e a propagação do fogo diminui devido ao aumento do ângulo entre a chama e o combustível. Os incêndios que se propagam em encostas descendentes fazem-no com uma velocidade de propagação próxima ou menor do que a velocidade de propagação num solo horizontal. Conhecer o papel da topografia e em particular de uma determinada característica da paisagem é crucial para compreender o comportamento do fogo, modelar e melhor conduzir as medidas de supressão de incêndios.

Ângulos de inclinação acima de 20º (36%) a 25º (47%) podem ter um efeito importante na propagação e na aceleração do fogo. Isto é particularmente importante para ângulos de inclinação superiores a 30º (58%) para os quais a deslocação de pessoal apeado ou mesmo em veículos se torna difícil e perigosa. Ângulos de inclinação acima dos 40º (84%) não são comuns, uma vez que o solo não se mantém estável nestes declives, mas pode ocorrer em algumas regiões, como é o caso das colinas vulcânicas.

### 2.4.2. Orientação da Paisagem: Exposição solar e ao vento

As encostas viradas a sul no hemisfério norte (e vice-versa para o Hemisfério sul) são normalmente mais secas devido ao aumento da exposição solar e aumento do vento. Sabe-se que estas paisagens apresentam um menor teor de humidade do combustível, o que leva a um aumento da propagação do fogo quando comparadas com outras exposições da paisagem.

### 2.4.3. Elevação: Padrões de Temperatura e de Vento

Em condições normais, a altitude pode afetar a temperatura e os padrões do vento. Além disso, a tipologia e o crescimento da vegetação e o teor de humidade do combustível podem ser alterados em conformidade. No geral, estes aspetos podem alterar o comportamento do fogo devido às alterações provocadas pela elevação. O aquecimento desigual das encostas e dos vales pode originar brisas de montanha, que são em geral ascendentes durante o dia e descendentes durante a noite, podendo contrariar as correntes da circulação geral do vento.

### 2.4.4. Curvatura do Terreno

A curvatura do terreno pode alterar a propagação do fogo, alterando a sua velocidade devido ao ângulo da chama e à eficiência de transferência de calor para os combustíveis não queimados. Em síntese, as encostas planas (sem curvatura) têm um comportamento de incêndio mais previsível, enquanto as encostas côncavas estão normalmente associadas a um aumento da propagação do fogo, mais próximas do topo ou da base, dependendo da localização das encostas mais íngremes na paisagem, respetivamente. Um caso relevante é o terreno em forma de desfiladeiro, em que a forma côncava do terreno aumenta o fluxo convectivo em direção à zona de combustão, provocando um efeito de feedback que produz aceleração da velocidade de propagação do fogo. Por vezes simples ravinas nas encostas podem ter este efeito de aceleração das correntes de convecção num fogo e alterar o seu comportamento.

### 2.4.5. Cumeadas

As cumeadas estão normalmente associadas a padrões complexos de vento, nomeadamente a mudanças de direção devido à separação e recirculação do fluxo e formação de vórtices horizontais. O vento pode ter características adicionais quando flui sobre ou em torno da linha de cumeada, criando padrões complexos de comportamento do fogo, que podem acelerar ou abrandar a sua velocidade de propagação. Se o fogo for impulsionado pelo vento, pode propagar-se de forma horizontal rapidamente ao longo da cumeada e alargar a sua dimensão transversal, entrando assim na encosta descendente com uma frente muito mais larga. Estas áreas podem também estar associadas a uma maior probabilidade de formação de vórtices de fogo ou de propagação horizontal prolongada do fogo, sendo ambas descritas abaixo como características específicas do comportamento do fogo. Por outro lado, em condições particulares, as cumeadas podem funcionar como barreiras naturais, induzindo a diminuição da propagação do fogo devido aos efeitos do vento ou dos declives.

### 2.4.6. Topografia Complexa

A Topografia complexa é um termo que integra a presença de diversas características paisagísticas, normalmente associadas ao aumento dos declives e às particularidades do terreno. A topografia complexa afeta significativamente o comportamento do fogo e as atividades de supressão, uma vez que é mais difícil prever eficazmente o comportamento do fogo e estabelecer estratégias seguras. Encostas complexas, as características do terreno e de exposição levam a múltiplas propriedades dos combustíveis e de direção do vento ou fluxo de ar, resultando em padrões alternativos de propagação do fogo que são difíceis de prever e simular. Este cenário cada vez mais difícil está geralmente associado a uma maior probabilidade de ocorrerem comportamentos extremos de fogo.

As características complexas da topografia e do fogo estão associadas a interações complexas com o fluxo do vento e, portanto, a um comportamento do fogo potencialmente surpreendente e difícil de prever. Por exemplo, em cumeadas inclinadas (cf. Abouali *et al.*, 2021), o fogo pode propagar-se mais rapidamente na descida do que na subida em partes do terreno.

A presença de desfiladeiros em encostas planas também deve ser considerada um fator de risco acrescido, uma vez que o comportamento do fogo é completamente modificado na encosta quando entra no desfiladeiro próximo, mesmo se este for relativamente pouco profundo.

Quando os incêndios são afetados principalmente pela topografia, a propagação e o comportamento do fogo são aumentados por padrões induzidos pelo terreno, incluindo maior intensidade ou mudança de direção causada por encostas mais íngremes, exposição à luz solar

ou padrões de vento locais. A elevação pode alterar as condições locais, levando a uma alteração na propagação dos incêndios. As curvaturas e cumeadas do terreno podem representar alterações adicionais na progressão do fogo associadas a encostas, padrões de vento e modos específicos de comportamento do fogo, ou seja, vórtices de fogo verticais e horizontais. A topografia complexa acrescentará múltiplas características que são difíceis de integrar, potenciando a intensidade e a incerteza da propagação do fogo.

## 2.5. Tipos e modos de propagação do fogo

### 2.5.1. Modos de propagação

De acordo com as camadas da cobertura vegetal em que se propagam, podemos distinguir os seguintes tipos de incêndios:

- Fogos de solo - são aqueles que se propagam, geralmente com combustão sem chama, sob a superfície do solo, consumindo a matéria orgânica existente no solo ou nas camadas orgânicas / húmus.
- Fogos de superfície - são aqueles que se propagam, geralmente com pelo menos uma frente de fogo, consumindo os combustíveis que estão acima do solo, como resíduos, folhada, herbáceas, arbustos e pequenas árvores.
- Fogos de copas – são aqueles que se propagam consumindo a folhagem das copas das árvores, geralmente com apoio do fogo de superfície por baixo das copas e propagando-se de uma árvore para outra.
- Focos secundários – são aqueles que se propagam pela combustão de partículas incandescentes, libertadas em algum dos tipos de fogo anteriormente descritos, que são transportadas pelo vento atmosférico ou induzido pelo fogo, ou por qualquer outro mecanismo de transporte, e que caem sobre leitos combustíveis, iniciando novas ignições

A maior parte dos tipos de incêndio refere-se a incêndios de superfície, que estão presentes em todos os grandes incêndios e são responsáveis pela maior parte das áreas ardidas. Torna-se importante considerar as especificidades dos incêndios de solo quando se trata da operação de extinção e rescaldo e no caso específico dos incêndios de turfa. Nesta fase não são considerados no trabalho. Os incêndios de copas e os focos secundários são tratados como casos particulares de comportamento extremo de incêndio nas secções correspondentes.

### 2.5.2. Modos de comportamento do fogo superficial

De acordo com o seu comportamento, podemos considerar os seguintes modos de propagação do fogo superficial:

- Comportamento do fogo marginal - Corresponde às situações de incêndio em início ou em fase de extinção, quando o incêndio pode ou não se propagar. Ocorre quando as condições de ignição ou propagação não são boas, por exemplo porque os combustíveis têm um grande teor de humidade ou estão distribuídos de forma muito distante no espaço. Este modo é importante para analisar a eficiência dos agentes de extinção como a água ou os retardantes e o eventual processo de reacendimento. Os requisitos de supressão de incêndio (quantidade mínima de água ou de um retardador de fogo para suprimir um

incêndio) enquadram-se neste tipo de comportamento ao fogo. Algumas técnicas de tratamento de combustível (modificando a compactação do leito de combustível ou criando aceiros) também se enquadram neste tipo de comportamento ao fogo. As condições necessárias para que um fogo controlado se inicie e comece a propagar exige uma pesquisa específica. As condições para o reacendimento de um incêndio considerado extinto correspondem ao comportamento do fogo marginal. Os incêndios de turfa que ardem com combustão lenta – sem chama – podem ser considerados neste modo de comportamento do fogo marginal.

- Comportamento do fogo estático – Corresponde ao regime de propagação do fogo em que as propriedades de propagação são assumidas constantes ao longo do tempo. Se as condições de ambiente não se alterarem durante um período, as propriedades de propagação do fogo, nomeadamente a velocidade de propagação, consideram-se constantes. Neste caso, o procedimento habitual de estimativa das propriedades médias de propagação do incêndio em cada período é aceitável, uma vez que correspondem aos valores médios dessa propriedade ao longo de todo o período. Nesta abordagem, assumimos que o comportamento do fogo depende dos três fatores comuns descritos (topografia, vegetação e meteorologia) ou do modo mais comum de comportamento do fogo. Como veremos, este modo de comportamento do fogo é muito particular e só ocorre em condições muito restritas. Apesar disso, este é o modo habitual ou mais comum de comportamento do fogo considerado na maioria dos estudos.
- Comportamento do fogo dinâmico – No caso geral, a interação do fogo com o meio envolvente modifica as propriedades de propagação do fogo ao longo do tempo, mesmo que as condições de ambiente (topografia, vegetação e meteorologia) se mantenham constantes ou uniformes. A descrição das propriedades do fogo envolve explicitamente a variável tempo, e o processo de obtenção de valores médios das propriedades de propagação do fogo pode não ser válido. Este modo de comportamento do fogo é o mais comum, particularmente relevante em grandes incêndios e na análise de acidentes. Como descrito nos capítulos seguintes, o comportamento extremo do fogo é importante para estas questões.

# 3. Comportamento extremo do fogo

## 3.1. Caracterização do comportamento extremo do fogo (CEF)

O conceito de "Evento extremo de incêndio florestal (EWE)" foi definido em Tedim et al (2018) utilizando vários critérios como aquele em que vários parâmetros que caracterizam a propagação, dimensão ou impacto do fogo excedem determinados limites. É de notar que EWE e "Comportamento Extremo de Fogo (CEF)" não são a mesma coisa. Um EWE terá certamente um ou mais episódios de CEF, mas podemos observar CEF mesmo em incêndios relativamente pequenos que não são classificados como EWE

Na perspetiva da segurança na supressão de incêndios utilizamos a seguinte definição de EFB (Viegas, 2012): *O Comportamento Extremo do Fogo é o conjunto de características e propriedades de propagação de um incêndio florestal que impedem a possibilidade de o controlar em segurança utilizando os recursos técnicos e conhecimentos atuais disponíveis*.

### 3.1.1. Comportamento do fogo dinâmico

Tradicionalmente considera-se que o comportamento do fogo num determinado ponto é afetado por três fatores: (i) Topografia, (ii) Vegetação e (iii) Meteorologia, que compõem o conhecido "triângulo dos fatores do fogo". Cada um dos fatores acima referidos e o seu respetivo papel foram descritos anteriormente. Uma extensa investigação e observação da propagação do fogo mostraram que, em muitos casos, mesmo quando estes três conjuntos de fatores intervenientes se mantêm constantes, o comportamento do fogo se altera, devido à sua interação com o meio ambiente, e a velocidade de propagação não se mantém constante. Isto levou-nos (Viegas 2005) a propor o conceito de "quadrado dos fatores de incêndio", acrescentando ao conjunto dos fatores indicados anteriormente, o fator "tempo cronológico".

Torna-se importante reconhecer o carácter dinâmico da propagação do fogo, no sentido em que os processos convectivos criados pela interação entre o fogo e a sua envolvente (também designado por "acoplamento fogo-atmosfera") induzem alterações no comportamento do fogo, nomeadamente na velocidade de propagação, tornando-se esta explicitamente dependente do tempo. Existem casos particulares em que esta variação, por vezes súbita, da velocidade de propagação do fogo ao longo do tempo pode causar consequências graves para a segurança dos operacionais durante o combate.

Apenas na cauda e flancos do incêndio, na ausência de inclinação ou vento, a velocidade de propagação é praticamente constante e igual à designada "velocidade básica de propagação" $R_o$. Em todos os outros casos, a velocidade de propagação do fogo irá variar com o tempo, mesmo que os outros fatores (combustível, declive ou vento) se mantenham constantes.

Uma vez que o comportamento de um incêndio varia com o tempo, por uma questão de segurança durante o combate, é importante recordar a seguinte regra:

- *O que o fogo está a fazer agora poderá ser muito diferente do que fará nos próximos minutos.*

### 3.1.2. Intensidade do fogo

É de notar que na definição de CEF dada por Viegas (2012) não são dados fatores quantitativos, pois o conceito de "extremo" tem um caráter relativo, pois depende das condições e das circunstâncias de uma pessoa que está a enfrentar um incêndio. A segurança do agente é avaliada em termos das propriedades da propagação do fogo – nomeadamente a intensidade de propagação da sua linha de fogo – e dos recursos e conhecimentos disponíveis

para o agente. Supõe-se que quanto melhor for o treino do agente melhor preparado estará para combater incêndios mais intensos.

É implicitamente reconhecido que, com a tecnologia atual, o ataque direto a uma frente de incêndio superior a 10 MW/m não é viável. Contudo, dependendo dos recursos disponíveis, os limites de resposta são ainda muito mais baixos (Tabela 2).

*Tabela 2. Limites de combate a incêndios em função da intensidade do incêndio.*

| Recursos operacionais | Intensidade do fogo máxima (kW/m) |
|---|---|
| Ferramentas manuais | 350 |
| Água e veículos pesados | 1 700 |
| Meios aéreos ligeiros | 3 500 |
| Meios aéreos pesados | 10 000 |

## 3.2. Desenvolvimentos adversos do comportamento extremo do fogo

### 3.2.1. Focos secundários

Um foco secundário consiste numa nova ignição que se desenvolve fora do perímetro de uma frente de chamas que lhe deu origem. Entre várias classificações, a mais comum é aquela que tipifica os incêndios por focos secundários com base na sua distância em relação ao incêndio original, nomeadamente:

- Focos secundários de curta distância – a poucos metros de distância do perímetro do incêndio original; são normalmente rapidamente "atingidos" pela frente de fogo original. Contribuem principalmente para aumentar a velocidade de propagação do fogo, muitas vezes surpreendendo aqueles que esperavam que a frente principal avançasse com velocidade constante.
- Focos secundários de média distância – a algumas dezenas de metros de distância, conduzem o avanço da frente de chamas original de forma intermitente, à medida que interagem com a nova ignição. Além de contribuírem para aumentar a velocidade de propagação do fogo, são extremamente perigosos, pois podem encurralar uma pessoa ou equipa entre duas ou mais frentes/focos, entretanto formados, especialmente durante a fase de interação.
- Focos secundários de longa distância – ocorrem a distâncias de algumas centenas de metros, sendo frequentemente considerados novas frentes, ou formar novos setores dentro do mesmo teatro de operações. Podem interagir com a frente de fogo original à medida que a distância entre eles diminui e a intensidade do fogo é suficiente elevada para causar tal interação.
- Focos secundários de muito longa distância – podem ocorrer a vários quilómetros de distância. Tipicamente, são considerados novas ocorrências que levam à dispersão dos meios de combate disponíveis na área ou região que afetam. Estes focos secundários podem interagir e fundir-se com a frente de fogo original em incêndios de mais longa duração e extensão.

O mecanismo de formação de um foco secundário envolve várias fases, nomeadamente: 1) libertação de partículas incandescentes, que consideram fagulhas e materiais de maiores dimensões, tais como folhas, ramos, pinhas ou cascas de árvores; 2) elevação das partículas incandescentes na coluna de fumo convectiva; 3) transporte, em queda, das partículas

incandescentes arrastadas pelo vento, após deixarem a coluna ascendente de fumo; e 4) aterragem das partículas incandescentes num leito de combustível inflamável. Embora seja complicado prever onde pode ocorrer um foco secundário, a análise das condições sob as quais a(s) frente(s) de chamas se desenvolve, considerando as quatro fases descritas, pode dar indicações de quando, como e onde podem ocorrer focos secundários. Por exemplo, a localização da frente de fogo pode sugerir a eminência de libertação de partículas incandescentes numa determinada área e período específicos – e.g., se a frente de fogo atingir a periferia de uma floresta adulta com stress hídrico, a probabilidade de produção de partículas incandescentes é alta; a intensidade do fogo está associada ao transporte de partículas incandescentes na coluna convectiva e, juntamente com ventos locais fortes, pode dar indicações sobre a distância a que os focos secundários podem ocorrer; e as características do leitos de combustíveis a jusante da frente de chamas, nomeadamente a sua ignitabilidade, pode apontar onde possa ser maior a probabilidade de surgimento de um foco secundário– e.g., áreas de pastagens secas ou matagais são mais propensas a inflamar do que uma área agrícola, caso aterrem partículas nestas áreas.

Os eucaliptos são normalmente associados a um grande potencial para a formação de focos secundários. De facto, o comportamento aerodinâmico das suas folhas e especialmente das cascas dos seus troncos, combinado com a sua grande inflamabilidade, torna-os altamente capazes de provocar focos secundários, com especial relevo para os de longa distância. No entanto, é importante considerar que algumas espécies de folhosas, mesmo com menor inflamabilidade, têm um grande potencial para causar focos secundários, especialmente a curtas e médias distâncias. Almeida *et al.* (2021) destacaram a significativa libertação de partículas incandescentes que resultaram da queima de sobreiros e carvalhos. Estes resultados são corroborados por alguns incidentes de incêndios passados, como o acidente de Cicouro (Portugal) em 2013, onde dois bombeiros morreram após a libertação e transporte de folhas incandescentes de carvalho terem causado vários focos secundários na área em que atuavam (Viegas *et al.*, 2013); ou o Incêndio de Regadas (Incêndio de Pedrógão Grande, Portugal), em 2017, onde a perda de controlo da situação se deveu à ignição da copa de um sobreiro, que provocou vários focos secundários nas proximidades (Viegas, *et al.*, 2017).

A dificuldade na supressão de focos secundários é acrescida por, normalmente, não ocorrem isoladamente. Uma vez que a mesma fonte liberta várias partículas incandescentes durante a passagem da frente de fogo, sujeitas às mesmas condições de vento, é comum que os focos secundários aparecerem em grupo, separados por várias dezenas de metros entre si, promovendo a sua interação, e levando à possível formação de um novo grande incêndio que, dependendo da distância, pode interagir, ou não, com a frente de chamas original. Como resultado, um grande número de focos secundários e a potencial intensidade que a sua junção pode atingir, dificultam ou impedem as operações de supressão, pondo em causa a segurança dos combatentes.

Os focos secundários estão normalmente associados ao transporte de partículas incandescentes pelo vento, pelo que é esperado que ocorram a sotavento da frente de fogo. No entanto, deve ser tido em consideração que os focos secundários também podem resultar de outros mecanismos de transporte que não o vento, como por exemplo uma pinha que rola encosta abaixo ou um animal em chamas que pode causar uma sucessão de ignições na sua fuga.

Pelo exposto, o perigo associado aos focos secundários surge não só do seu potencial efeito na frente de chamas original, acelerando-a, mas também da possibilidade de encurralar pessoas e/ou animais e da sua capacidade de ocorrer de forma a causar surpresa. Os focos secundários também podem tornar inviáveis caminhos de fuga, comprometer pontos de ancoragem ou até invalidar locais de refúgio na área de influência do incêndio.

### 3.2.2. Fogos de copas

Os fogos de copas não são apenas um tipo de incêndio, tal como os incêndios de solo e de superfície, mas são também uma manifestação de comportamento extremo do fogo. A grande energia associada aos fogos de copas e a sua capacidade de produzirem colunas convectivas intensas, gerando muitas partículas incandescentes com potencial para a formação de focos secundários a diferentes distâncias, torna este mecanismo de propagação como um dos mais difíceis de suprimir.

Os fogos de copas são normalmente subdivididos em três tipos: 1) fogo de copas passivo, em que uma árvore ou um pequeno grupo de árvores inflama, apresentando uma duração relativamente curta; 2) fogo de copas ativo, quando o fogo se propaga de forma sustentável entre as copas, suportado por um incêndio de superfície que se desenvolve na vegetação sob a copa, liberando energia de forma mais duradoura e intensa do que no fogo de copas passivo; 3) fogo de copas independente, que se caracteriza por uma propagação sustentada do fogo entre as copas, como num fogo de copas ativo, mas sem ser apoiado por um fogo de superfície sob as copas, ou seja, o fogo transita entre as copas independentemente da ocorrência de incêndio de superfície no sobcoberto.

Ao contrário dos fogos de superfície, num fogo de copas a entrada de oxigénio/comburente também ocorre por baixo, uma vez que as copas estão geralmente elevadas – num incêndio de superfície a ventilação ocorre apenas dos lados porque os combustíveis são limitados inferiormente pelo solo. Num fogo de copas ativo, o fogo de superfície pré-aquece a copa, desidratando-a e tornando-a mais suscetível a queimar. Assim, a disponibilidade simultânea de muito comburente (oxigénio do ar) e combustível (vegetação da copa) origina combustões muito intensas com alta libertação de energia. Se uma alta disponibilidade de combustível não corresponder à alta disponibilidade de comburente, a reação de combustão torna-se desequilibrada e consequentemente extingue-se. Por esta razão, os fogos de copas independentes são raros e ocorrem principalmente em condições em que o teor de humidade da copa é extremamente baixo, com uma densidade favorável à combustão. Os fogos de copas independentes são tão raros que não serão desenvolvidos neste capítulo.

Num fogo de copas, a energia libertada é tão elevada e assustadora que raramente acontecem acidentes num cenário destes que já tenha tido início há algum tempo, uma vez que o instinto humano nos encoraja a afastar-nos de um quadro tão impressionante. No entanto, a transição de um fogo de superfície, numa área arborizada, para um fogo de copas pode ser rápida, surpreendendo aqueles que se aproximarem, pensando estar a combater um incêndio de menor intensidade. É, portanto, crucial entender como o fogo transita de um fogo de superfície para um fogo de copas, chamada "transição vertical". Segundo Van Wagner (1977), a transição vertical depende da intensidade do fogo de superfície e da intensidade crítica, que, por sua vez, é função da altura da base da copa e do teor de humidade foliar. Se a intensidade crítica for superior à intensidade do fogo de superfície, a probabilidade de fogo de copas, passivo ou ativo, é alta. Se a intensidade crítica for inferior à intensidade do incêndio de superfície, o fogo provavelmente não transitará para a copa – o fogo também pode transitar através de combustíveis finos (e.g., líquenes) que existam no tronco das árvores, podendo dar origem a um incêndio de copas, que normalmente é passivo.

A transição horizontal do fogo entre copas, ou seja, para que o fogo de copas passe de passivo para ativo, requer uma densidade do copado que assegure que a distância entre os combustíveis seja favorável à propagação do fogo. Neste sentido, é estabelecido um parâmetro

designado como "velocidade crítica de propagação"[1], que é inversamente proporcional à densidade do copado "d" (Van Wagner, 1977). Se a velocidade de propagação do fogo de superfície for superior à velocidade crítica de propagação, pode ocorrer transição para um fogo de copa ativo, caso contrário, o fogo poderá permanecer como passivo. De acordo com (Rothermel, 1992), a velocidade crítica de propagação do fogo nas copas é 3,34 vezes maior do que a velocidade de propagação prevista para o Modelo de Combustível de Superfície 10 (madeira/resíduos e sobcoberto – Anderson, 1982), utilizando um fator de redução do vento de 0,4, independentemente dos combustíveis de superfície.

Em suma, para que ocorra um fogo de copas (não independente), a carga de combustível de superfície deve ser elevada, de forma a proporcionar uma alta intensidade de fogo de superfície, e a distância entre a base da copa e as chamas do fogo de superfície deve ser suficientemente pequena para que ocorra uma transição vertical. Para que o fogo de copas seja ativo, a proximidade das copas deve ser tal que o fogo possa passar de árvore em árvore. Estas definições permitem-nos compreender a importância da gestão dos combustíveis de superfície nos meios florestais, e da poda e desbaste das árvores para reduzir a probabilidade de um incêndio originar um fogo de copas que pode colocar em causa a segurança das operações de combate ao incêndio. Estes serão os principais fatores a ter em conta antes de iniciar o combate a um incêndio na floresta.

A intensidade do vento e a inclinação do terreno são também fatores a considerar, especialmente pelo aumento da taxa de propagação do fogo de superfície que proporcionam. Naturalmente, as espécies presentes na floresta desempenham também um papel importante na ocorrência ou não de fogos de copas, uma vez que a sua inflamabilidade é altamente determinante na transição vertical e horizontal. Em geral, espécies folhosas como o carvalho ou o castanheiro apresentam uma menor probabilidade de fogo de copas do que o pinheiro ou o eucalipto.

### 3.2.3. Fogos Eruptivos

Os fogos eruptivos estão associados a uma aceleração muito elevada da propagação do fogo, que pode ser similar a uma erupção. O poder destrutivo das erupções é muito elevado e pode surpreender as pessoas, nomeadamente agentes operacionais no combate. A maioria dos acidentes em incêndios está associada a este tipo de comportamento do fogo. Este tipo de comportamento está muito ligado a desfiladeiros e a encostas íngremes, mas os processos físicos envolvidos também ocorrem em noutros contextos. Na literatura são também designados por incêndios explosivos (*blow up*), embora não haja nada que os relacione com uma explosão, uma vez que o crescimento da velocidade de propagação é um processo contínuo.

Este tipo de comportamento eruptivo foi estudado sistematicamente pela primeira vez por (Viegas & Pita, 2004), que descobriram que este comportamento estava associado ao fluxo induzido pelo fogo, que é reforçado pela forma côncava do terreno de um desfiladeiro. Nas experiências laboratoriais, foi utilizada uma mesa de desfiladeiro composta por duas superfícies planas inclináveis para analisar sistematicamente este tipo de comportamento do fogo. A forma do desfiladeiro foi determinada pelos ângulos de inclinação das duas faces da mesa de combustão e pelo ângulo geral da sua linha de charneira, também designada por "linha de água". Valores maiores destes ângulos induzem valores mais elevados da aceleração da frente de fogo.

O aumento da velocidade de propagação ocorre pela dinâmica do fogo, independentemente do vento local, assim como das condições particulares do leito de combustível. O tempo

[1] $R_c = 3.0/d$ , with *c* (m/min) and d – densidade do copado (kg/m$^3$)

necessário para que a propagação do fogo atinja valores muito elevados está associado ao tempo de residência das chamas, que depende da compactação do leito de combustível, sendo menor para combustíveis finos, como as herbáceas, e maior para combustíveis mais espessos, como os arbustos.

No caso muito comum do combustível arbustivo, o tempo necessário para a aceleração total é da ordem dos vinte minutos e esta duração é observada em muitas situações de acidentes reais e incêndios experimentais onde ocorre comportamento eruptivo.

### 3.2.4. Fogos de Junção

Num incêndio florestal, acontece por vezes que duas ou mais frentes de fogo que se propagam na mesma área interagem entre si, podendo criar uma interação e um incêndio intenso com propagação muito rápida. Esta é uma situação que ocorre com bastante frequência em operações de combate a incêndios e de fogo tático. A interação de duas frentes de fogo está relacionada com as correntes de convecção que são geradas e pode assumir características de comportamento extremo do fogo, que é importante conhecer.

A situação mais simples é a interação de duas frentes de fogo idênticas fazendo um pequeno angulo entre si, ou paralelas, que se propagam em terreno plano e horizontal quando não há vento. No caso de duas frentes de fogo paralelas, estas que se propagam à mesma velocidade, quando estão afastadas, a sua velocidade de propagação é igual à velocidade de propagação base, mas à medida que se aproximam, a velocidade de propagação aumenta gradualmente devido à intensificação da corrente de convecção gerada pelas duas frentes de fogo. Quando se encontram, a intensidade da propagação aumenta subitamente e atinge valores muito elevados.

O aumento de intensidade durante a interação das frentes, mesmo que seja por um período relativamente curto, pode levar ao desenvolvimento de um incêndio ainda mais intenso e complexo. Por esta razão, ao planear a operação de combate ao mesmo, é necessário garantir que a interação destas duas frentes de fogo não ocorra, mas se for o caso deve ser suficientemente longe dos limites da área ardida para evitar problemas com possíveis focos secundários.

Em caso de vento ou de declive, a frente que corre contra o vento ou que desce o declive progride inicialmente mais lentamente, mas quando atinge a nova frente de fogo, o comportamento altera-se. Na fase final da interação, verifica-se também um aumento da intensidade da propagação. Um processo semelhante ocorre numa interação entre uma frente de fogo e um incêndio florestal quando estes se formam perto um do outro ou perto da frente de fogo principal. Se os incêndios começarem a uma curta distância um do outro, interagem no seu crescimento até se fundirem, podendo mesmo originar um comportamento diferente do incêndio. Se os incêndios começam a uma curta distância da frente principal de fogo, tendem a ser atraídos por ela. Por outro lado, com ventos fortes ou a distâncias maiores, os focos secundários podem propagar-se de forma independente e contribuir para um desenvolvimento mais rápido do incêndio.

Uma situação especial de junção de frentes de fogo ocorre quando duas frentes de fogo formam um ângulo entre si e criam uma forma em "V". O espaço entre as duas frentes é consumido após relativamente pouco tempo, mas esse processo não ocorre pelo avanço de uma frente de fogo em direção à outra, mas pelo avanço do vértice do "V", ou seja, onde as duas frentes de fogo interagem.

Viegas *et al.* (2012) investigaram a interação e a junção de duas frentes de fogo oblíquas e simétricas que se intersectam num ponto (formando uma linha de fogo em "V"). Originalmente, Viegas *et al.* (2012) referiram-se a este fenómeno como salto do fogo *("Jump Fire")* devido ao aumento súbito da velocidade de propagação da cabeça do fogo, mas após análises posteriores

alteraram este termo para fogos de junção *("Junction Fire").* Na última década, vários autores analisaram este fenómeno, passando a ser designado por fogos de junção (Viegas *et al.*, 2013; Sharples *et al.*, 2013; Raposo *et al.*, 2015; Hilton *et al.*, 2016; Thomas *et al.*, 2017; Sullivan and Gould, 2019; Filkov *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2023). Os resultados mostraram que a velocidade de evolução das frentes e as velocidades locais de propagação aumentam subitamente para valores da ordem de cem vezes a velocidade de propagação base. Recentemente, Ribeiro *et al.* (2023) investigaram o efeito de declive do Fogo de Junção com duas frentes de fogo não simétricas.

### 3.2.5. Conflagrações

As conflagrações são os incêndios que ocorrem sob condições meteorológicas de vento forte que duram relativamente muito tempo - horas ou dias - em grandes áreas, levando a uma propagação generalizada do fogo com valores elevados de velocidade de propagação e outras manifestações de comportamento extremo como incêndios de copa, vórtices de fogo e outros, mesmo em terrenos relativamente planos.

Os incêndios que ocorreram em Portugal no dia 15 de outubro de 2017 foram um exemplo de uma conflagração. Neste dia registaram-se mais de 400 ignições e destas tivemos nove grandes incêndios que queimaram um total de mais de 200kHa e causaram a morte de 52 pessoas.

### 3.2.6. Vórtices de fogo

Outra manifestação do comportamento extremo do fogo é constituída pelos vórtices de fogo ou tornados de fogo. Os vórtices de fogo são estruturas com uma extensão vertical de várias dezenas a centenas de metros, que se caracterizam por existir uma chama com um movimento de rotação muito forte e que podem transportar potenciais focos secundários no seu núcleo.

Os vórtices de fogo são criados por um fluxo ascendente gerado pelo fogo ou por áreas aquecidas do solo e estão geralmente associados a um movimento rotacional ou vórtice, causado por assimetrias no fluxo ou no terreno circundante. O movimento de rotação ocorre em torno de um eixo vertical e é semelhante ao que ocorre nos ciclones, mas em menor escala. No núcleo dos vórtices de fogo, perto do eixo de rotação, o ar gira e atinge a velocidade máxima na extremidade deste núcleo. A pressão é mais baixa nesta zona (centro) e, por conseguinte, o efeito de sucção do vórtice de fogo é maior, ao mesmo tempo inibindo a interação entre as chamas e o meio ambiente. Este facto explica porque um vórtice de fogo produz chamas ou colunas de chamas de grande altura.

O vórtice de fogo pode permanecer relativamente estático, ou seja, o seu eixo é praticamente fixo em qualquer local, ou pode mover-se e transportar o fogo consigo. O movimento é difícil de prever e pode ter uma trajetória imprevisível, ou seja, o seu eixo pode mudar de velocidade e de direção, aparentemente sem qualquer razão. Devido ao seu movimento de rotação, a ação do vento ambiente pode produzir forças com direção perpendicular à do vento, causando movimentos do vórtice que são difíceis de prever.

Como se pode compreender, um vórtice de fogo é muito difícil de combater, o que justifica a sua inclusão em casos de comportamento extremo do fogo. Quando os vórtices de fogo se deslocam de uma zona em chamas para outra fora do perímetro do incêndio, podem tornar-se extremamente perigosos. Devido ao seu movimento imprevisível, o vórtice de fogo pode mover-se para zonas onde pode promover uma propagação muito perigosa do fogo. Nalguns casos,

pode mover-se de tal forma que os agentes de intervenção podem ficar entre o vórtice e o incêndio principal que estariam a combater, criando uma situação muito perigosa.

Os grandes incêndios florestais podem resultar em vários vórtices de fogo devido às fortes correntes de convecção que são criadas. A presença de instabilidade atmosférica favorece esta formação. Como já foi referido, os vórtices de fogo têm velocidades de vento muito elevadas - que podem atingir 100 a 200 km/h - o que lhes confere um grande poder de destruição. Este efeito manifesta-se nas árvores ou em partes de edifícios, o que aumenta ainda mais o poder destrutivo do incêndio ( Viegas, Figueiredo Almeida, et al., 2017).

Os vórtices são por vezes observados em zonas ardidas porque o tornado aspira poeiras e cinzas. A formação destes tornados resulta do aumento da taxa de absorção da radiação solar pelo solo (que fica escurecido nestas zonas ardidas), criando as correntes de ar ascendentes que dão origem aos tornados.

### 3.2.7. Eventos de fogo eruptivo

Em determinadas situações, as interações do fogo com o terreno e a atmosfera podem causar um incêndio de grandes proporções, os *eventos de comportamento extremo* acontecem devido a grandes acelerações na propagação da frente de chamas e violenta convecção.

Como descrito anteriormente, o fogo "normal" propaga-se por frentes de chama e por focos secundários. Para uma correta avaliação é necessário conhecer o terreno, o combustível e a meteorologia do local onde decorre o incêndio.

O comportamento dinâmico do fogo por detrás de um *evento extremo* requer um incêndio anterior não controlado e determinadas condições do terreno e do perfil atmosférico, que, em conjunto, permitem a formação de ciclos de aumento ao longo do tempo. A carga de combustível não tem um papel significante.

As condições necessárias para *eventos de extremos* são:

1. Um incêndio em curso no tipo apropriado de combustível. Combustíveis inflamáveis, como a maioria dos prados, ardem rapidamente. As florestas e os arbustos são os principais combustíveis envolvidos.

2. Condições que podem causar chamas profundas; existem sete causas conhecidas:

- Ventos fortes (a cabeça do incêndio percorre um longo caminho durante combustão)
- Uma mudança de vento, tornando um flanco num nova e maior cabeça do incêndio
- Crescimento eruptivo
- Propagação lateral impulsionada pela vorticidade (VLS), a principal causa de grandes danos causados pelo fogo
- Utilização incorreta do pinga-lume
- Muitos focos secundários
- Ignição interior, em que as ilhas não queimadas se tornam mais tarde inflamáveis e o seu calor é adicionado ao calor do incêndio principal.

Algumas dessas condições, como a vorticidade lateral, exigem que o fogo esteja em determinadas formas de relevo em momentos críticos (ou seja, momentos de ventos elevados e baixa humidade do combustível).

*Condições atmosféricas adequadas ao desenvolvimento de uma piro-convecção violenta*

É importante saber o que está a acontecer acima do local do incêndio - observar as nuvens, voar com balões meteorológicos, aviação ou assumir outras ações proativas na aquisição de dados.

A camada convectiva é fundamental. As inversões devidas a processos como a subsidência podem bloquear a convecção. Se a camada de convecção estiver inferior a cerca de 4°C, podem formar-se nuvens convectivas como colunas de fumo (*PyroCumulonimbus* –) ou, se for superior a cerca de 8°C, pode ocorrer um incêndio provocado pelo vento. Os *eventos extremos* tendem a não ocorrer com valores intermédios.

O ciclo meteorológico diário pode já não ser dominante - 30% dos *eventos extremos* ocorrem durante a noite. Isto requer frequentemente a mistura de ar seco da atmosfera, e pode ser facilitado por terrenos acidentados.

Existem ferramentas de previsão para *eventos de extremos*, baseadas em estudos de muitos eventos – cf.:

http://www.highfirerisk.com.au/hpf/bufo_2.xlsx

ou

http://www.highfirerisk.com.au/hpf/bufo.pptx

*Consequências potenciais de eventos de fogo extremos*

Uma escalada de duas ou três horas do incêndio num ou mais sectores, que pode ser considerada incontrolável - até mesmo impossível de sobreviver. Nesse período, os *eventos de fogo extremo* consomem tipicamente cerca de 7.000ha, numa extensão de 16km com uma largura de 7km. Podem ser muito maiores. Não podem ser suprimidos. Muitas vezes, depois a intensidade do fogo diminui, permitindo que a supressão comece quando as condições se tornarem seguras no local do incêndio (por exemplo, através da remoção de árvores perigosas ou linhas elétricas). É melhor não haver pessoas nas proximidades de um *evento de fogo extremo*, se as previsões puderem ser feitas com tempo suficiente.

Para um pequeno incêndio, o *evento de fogo extremo* envolverá todo o terreno. Os incêndios maiores podem envolver um ou mais sectores, enquanto os complexos de incêndios podem necessitar de envolvimento ao nível da divisão.

*Preocupações de segurança*

Para a duração e extensão dos *eventos de fogo extremo*, o Plano de Ação do Incidente (PAI) para os sectores/divisões afetados deve ter apenas um objetivo: salvar vidas.

As questões de segurança incluem:

- Muitos focos secundários, permitindo maiores intensidades nas zonas de junção e rápida perda de perceção situacional.
- Combustão com pouco oxigénio, conduzindo a fenómenos de incêndio incomum.
- Crescimento eruptivo, permitindo uma aceleração prolongada do fogo em desfiladeiros e comprometendo a segurança das equipas pelo avanço do fogo em sua direção.
- Pode ser muito perigoso utilizar pinga-lume.
- Perda rápida das rotas de fuga.

- Os ventos Foehn eventualmente mudam de um fluxo laminar descendente para um fluxo turbulento, alterando o comportamento do incêndio.

Os sectores sem *comportamento do fogo extremo* devem ser continuamente reavaliados em termos de segurança.

Os problemas surgem não só de fortes escoamentos descendentes (como as nuvens convectivas como colunas de fumo que se formam tipicamente a favor do vento do fogo de superfície), mas de reflexos da camada convectiva, especialmente onde o terreno coloca o incêndio perto da camada.

*Como lidar com um evento de fogo extremo?*

Manter o fogo fora das principais formas de relevo em momentos críticos. Compreender quando o fogo pode entrar em VLS (propagação lateral impulsionada pela vorticidade) ou áreas propensas a crescimento eruptivo. Saber quando os ventos aumentam ou a humidade do combustível desce abaixo dos 5%. As secções de planeamento necessitam de competências específicas para o fazer. É possível queimar essa área quando as condições forem mais favoráveis?

Não usar pinga-lume em momentos críticos. Certos padrões de ignição podem criar *eventos de fogo extremo* nessas alturas. Isto tem de constar do Plano de Ação para Incidentes.

Evacuar antes do início de um *evento de fogo extremo*, se for expetável. Quando um *evento de fogo extremo* se inicia, as equipas de bombeiros podem estar em risco tanto quanto o público.

Muitos membros da Equipa de Gestão de Incidentes têm um papel a desempenhar para manter as equipas em segurança:

- Oficial de segurança: certificar-se de que toda a gente sabe o que fazer.
- Analista do comportamento do fogo ou especialista técnico: previsões pormenorizadas.
- Oficial de Situação / Oficial de Planeamento: Garantir que os produtos de informação são adequados.
- Oficial de Operações / Controlador de Incidentes: aplicação do PAI.
- Observadores de campo (terrestres e aéreos - incluindo pessoal sénior de operações): o que observar e como - abrangendo a preparação do *evento de fogo extremo*; início; duração; declínio.

Formadores do Serviço de Bombeiros: necessitam fornecer formação que abranjam a terminologia e perceção do comportamento dinâmico do fogo. Uma mensagem de segurança relacionada com riscos de segurança incomuns necessita que todos os intervenientes compreendam os termos utilizados (por exemplo, VLS). O mesmo se aplica à tomada de decisões.

# 4. Desafios na resposta a incêndios com características específicas

## 4.1. Incêndios na Interface urbano-florestal

A Interface Urbano-Florestal (IUF) consiste numa área onde a vegetação e as infraestruturas estão presentes de forma expressiva, com a presença temporária ou permanente de pessoas. Assim, nestas áreas, além da vegetação, também estão presentes vários tipos de infraestruturas, tipicamente ocupadas ou utilizadas por pessoas, o que lhes confere características distintas que obrigam a uma abordagem específica. Devido às atividades humanas, a probabilidade de ignições na IUF é maior do que em áreas florestais. Além disso, o valor dos elementos presentes na IUF também é normalmente superior, destacando-se ainda a possível perda de vidas humanas e animais, bem como a potencial destruição de infraestruturas com elevado valor económico, social e/ou cultural.

Existem várias classificações da IUF. Uma delas envolve o tipo de coexistência entre vegetação e infraestruturas. A IUF do tipo “interface” inclui uma demarcação clara entre a área de infraestruturas e a área ocupada por vegetação. Tipicamente, o tipo de IUF "interface" está associada a uma área edificada rodeada por uma floresta – dentro desta tipologia, existe uma situação especial de edifícios isolados rodeados por vegetação. No entanto, pode também acontecer que uma área florestal apareça rodeada por edifícios, como no caso dos parques urbanos, sendo esta referida como "IUF oclusa". Existe também a possibilidade de um cenário de IUF onde a vegetação e as infraestruturas aparecem misturadas na mesma área, sendo conhecida como "IUF de intermix".

O tipo de infraestruturas define outra classificação da IUF. Um cenário onde a vegetação coexiste com edifícios (e.g., casas residenciais, edifícios comerciais ou de serviços, etc.) é referido como "interface urbano-florestal (padrão)". Se os edifícios são industriais, é chamada "interface indústria-floresta". Existe também o tipo particular designado “IUF linear”, onde os elementos infraestruturais se estendem ao longo de uma linha, como vias-férreas, autoestradas ou redes de distribuição de energia.

Dadas as características únicas, heterogeneidade e complexidade dos cenários, os desafios associados a incêndios na IUF são significativamente diferentes daqueles enfrentados em cenários de incêndios em áreas claramente dominadas por vegetação – florestas, matas, matos, prados, etc. Os principais desafios associados aos três principais componentes da IUF são explorados nas secções seguintes.

### 4.1.1. Combustíveis naturais - vegetação

A vegetação presente na IUF é tipicamente dividida em vegetação espontânea e vegetação ornamental ou cuidada (e.g., regada, podada). Na tipologia "interface” da IUF, especialmente em áreas mais distantes dos edifícios, a vegetação é normalmente espontânea e, portanto, semelhante à vegetação encontrada nas áreas florestais. Na IUF linear, a vegetação é também predominantemente espontânea, podendo ser encontrados pequenos segmentos com vegetação cuidada/ornamental. Em cenários de interface oclusa, a vegetação poderá ser ornamental e espontânea, geralmente mais cuidadosamente gerida do que na tipologia "interface".

Em edifícios isolados (caso específico da tipologia “interface” ou num cenário de “intermix”), a presença de vegetação ornamental bem mantida é comum. A manutenção da vegetação geralmente envolve rega, o que é altamente benéfico para a redução do risco de incêndio, uma vez que aumenta a humidade do combustível. As espécies de plantas nestes cenários também

diferem da vegetação espontânea, apresentando diferentes inflamabilidades. Por exemplo, enquanto as hortênsias têm características muito favoráveis para a mitigação do risco de incêndio, outras espécies como os loureiros apresentam uma inflamabilidade mais alta do que várias espécies espontâneas (Almeida *et al.*, 2022).

As sebes vegetais típicas de jardins, que se observam muitas vezes na proximidade de edifícios, podem constituir-se um fator de perigo de incêndio, se não forem devidamente selecionadas e mantidas. Algumas espécies (e.g., *Cupressus arizonica*), especialmente quando aparadas para manter uma forma desejada, acumulam muito material combustível seco no seu interior, tornando-as altamente predispostas a arder com grande intensidade. Outras espécies usadas nas sebes (e.g., *Prunus laurocerasus*) deixam cair as folhas e ramos mortos, apresentando um comportamento mais favorável para a gestão do risco de incêndio. Ribeiro & Almeida (2020) apresentaram um estudo detalhando as características de inflamabilidade de várias espécies comumente usadas em sebes vegetais.

### 4.1.2. Combustíveis antropogénicos

Os combustíveis antropogénicos, i.e., não naturais, incluem os materiais que não são vegetação, incluindo infraestruturas (ou os seus componentes mais inflamáveis), equipamentos (por exemplo, veículos, cabos elétricos, maquinaria industrial ao ar livre) e outros tipos de combustíveis (por exemplo, lenha, botijas de gás).

Estes combustíveis de origem humana, são tão diversos que complicam significativamente a compreensão, caracterização e modelação do comportamento do fogo na IUF, uma vez que as suas características de inflamabilidade são muito diferentes. Além disso, estes elementos podem representar uma fonte de perigo adicional, levando a deflagrações ou explosões (por exemplo, botijas de gás), colapsos e esmagamentos (por exemplo, queda estrutural) ou eletrocussões (por exemplo, cabos elétricos), entre outros riscos.

### 4.1.3. Pessoas

A presença de civis no teatro de operações acrescenta várias dificuldades, não apenas devido à maior responsabilidade na sua proteção, mas também porque, numa situação de incêndio, frequentemente as pessoas encontram-se sob grande stress, exibindo comportamentos motivados pelo pânico. Além disso, entre a população, pode haver indivíduos com necessidades especiais, como crianças, idosos ou pessoas com limitações de saúde (por exemplo, problemas cardiorrespiratórios), físicas ou psicológicas, entre outras. Por isto, a decisão de evacuar ou abrigar no local, que será abordada na Secção 6.2, requer uma consideração equilibrada que tenha em conta vários fatores.

Embora o risco de incêndio na IUF seja frequentemente associado à chegada das chamas ao espaço construído, o mecanismo de projeção de partículas incandescentes (descrito na Secção 3.2) é o que traz mais dificuldades. Em estudos conduzidos por Ribeiro *et al.* (2020), entre 963 edifícios afetados pelos incêndios de Pedrógão Grande, em Portugal, em 2017, 61% foram ignificados pela projeção de partículas incandescentes, enquanto 21% começaram a arder devido ao contacto direto com as chamas. Dá-se ainda nota de que os telhados (62% dos casos) e as janelas (16%) foram os componentes estruturais que se mostraram mais vulneráveis aos incêndios florestais por terem sido as componentes estruturais primeiramente ignificadas.

No relatório sobre os incêndios de 15 de outubro de 2017, também em Portugal, Viegas *et al.* (2019) descreveram que, das 140 instalações industriais danificadas pelo conjunto de incêndios que tiveram início nesse dia, 53% foram ignificadas devido à projeção de partículas

incandescentes, em contraste com 27% que foram ignificadas pelo impacto direto das chamas. Neste caso, as aberturas como respiradouros (29%), as paredes (19%) e os telhados (17%) foram as componentes estruturais que apresentaram maior vulnerabilidade.

Resumindo, a IUF constitui-se como um cenário dinâmico e intrincado que introduz desafios particulares à gestão de incêndios florestais. A coexistência de combustíveis naturais e combustíveis antropogénicos, incluindo várias infraestruturas e equipamentos, induz o fogo a ter um comportamento complexo e difícil de prever e modelar. A presença de pessoas complica ainda mais esta situação, pois as reações instintivas de pânico, a tendência para a salvaguarda de bens a todo o custo ou mesmo a vontade, por vezes irracional, de ajudar, complicam as operações de resposta ao incêndio. A projeção de partículas incandescentes emerge como um mecanismo crítico nos incêndios na IUF, contribuindo significativamente para a propagação do fogo e apresentando uma grande ameaça às estruturas. Os principais estudos na área revelam que a projeção de partículas incandescentes é uma causa significativa de ignições de edifícios durante incêndios florestais, sublinhando a maior suscetibilidade dos telhados e janelas. A heterogeneidade e características únicas que a IUF apresenta exigem abordagens que integram vários domínios técnicos e científicos, abrangendo as várias fases da gestão do fogo, desde a prevenção à resposta e recuperação dos impactos causados.

## 4.2. Incêndios em zonas de grande altitude

Os incêndios a grande altitude, ou seja, em zonas montanhosas, caracterizam-se por um comportamento específico, que pode ser muito diferente do comportamento normal em zonas mais planas. O problema e o impacto destes incêndios em altitude, tanto para a população como para os ecossistemas, tem também características muito específicas (Mayer *et al.* 2020).

### 4.2.1. Comportamento determinado pela topografia

A primeira especificidade é o modo de propagação dos incêndios. A forte declividade das encostas e a presença de vales induzem brisas, ou seja, ventos locais, que influenciam muito o modo de propagação dos incêndios. Estas brisas são induzidas pela radiação térmica que varia entre as cristas e os barrancos. Trata-se de um fenómeno diurno, pelo que o comportamento do fogo, e mesmo a direção de propagação, muda ao longo do ciclo diurno (Figura 4).

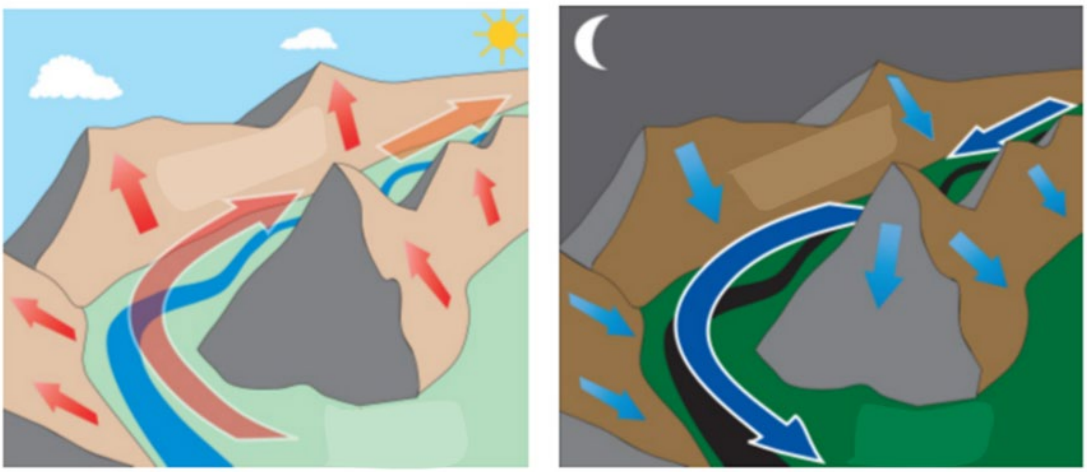


*Figura 4. Brisas da encosta e do vale durante o dia (esquerda) e a noite (direita). (Fonte: Meteo France)*

Quando a brisa da encosta está a subir, ao longo das tardes, o fogo move-se para cima muito rapidamente, com uma forma estreita. Uma vez no topo da crista, a propagação frontal pára e o fogo alarga-se lentamente. Este alargamento aumenta ao longo da noite.

### 4.2.2. Questão de segurança

Quando o declive é mais acentuado do que um limiar, aproximadamente 20°, a chama pode "colar" ao declive (Edgar *et al.* 2016). Isto resulta numa escalada dramática da velocidade de propagação do fogo, de modo que toda a encosta pode ser incendiada em poucos minutos, por vezes dezenas de segundos. Este fenómeno conduziu a vários aprisionamentos de bombeiros, conforme relatado nos capítulos seguintes.

### 4.2.3. Desafios de acesso e resposta

Devido à topografia, o acesso aos incêndios a grande altitude é geralmente difícil. As estradas e os caminhos são estreitos e não podem, muitas vezes, ser utilizados por veículos pesados de combate a incêndios com água. Para os meios apeados, o acesso à linha de fogo a partir do caminho motorizado mais próximo demora por vezes várias horas a pé.

Consequentemente, estes territórios frequentemente não podem ser cobertos por equipas com veículos, como acontece nas zonas planas. Os meios de resposta devem antes consistir em:

- Meios aéreos, nomeadamente helicópteros com capacidade flexível de lançamento de água e de embarque de equipas de bombeiros com o seu equipamento.
- Veículos ligeiros com tração às quatro rodas.
- Equipas dedicadas de bombeiros com:
    - Forte formação (incluindo questões de segurança) e experiência de fogo,
    - Boa aptidão para evoluir em terreno montanhoso,
    - Capacidade de utilizar ferramentas manuais,
    - Capacidade de recolher água de fontes remotas,
    - Capacidade de utilizar opções de contra-queimadas (consultar o Entregável 2.2 *Report on training session for prescribed burnings - Relatório sobre a sessão de formação para queimadas prescritas*),
    - Autonomia e flexibilidade para se adaptar às mudanças no comportamento do fogo.

As equipas dedicadas acima descritas podem deslocar-se a pé até à linha de fogo ou podem ser transportadas por helicópteros, quando disponíveis.

### 4.2.4 Impacto dos incêndios em altitude

Nas zonas montanhosas, mesmo pequenos incêndios podem ter consequências devastadoras. A queima da vegetação que estabiliza o solo induz efeitos em cascata:

- Queda de rochas
- Deslizamentos de terra
- Encostas propensas a avalanches
- Erosão do solo

Devido ao longo ciclo da floresta em altitude, os incêndios de copas responsáveis pela substituição dos povoamentos também alteram durante muito tempo a função de proteção da floresta ao solo (Mayer *et al.* 2020).

## 4.3. Incêndios em regiões de latitude elevada

A região de alta latitude da Europa (Ilhas Britânicas, Noruega, Suécia, Finlândia e Estados Bálticos) normalmente não desperta muita atenção em relação aos incêndios florestais. Os anos de seca prolongada ocorrem regularmente, mas por vezes com vários períodos de chuva entre eles (Sjöström & Granström 2024). A maior parte da Suécia, da Finlândia e dos Estados Bálticos pertencem à zona boreal ou hemiboreal, onde dominam as coníferas fortemente geridas com pequenas inclusões de árvores de folha caduca. A Noruega e o norte do Reino Unido têm muitas montanhas altas, para além de urze costeira e florestas costeiras de coníferas, enquanto o resto do Reino Unido é dominado por terras aráveis e prados (Morton *et al.*, 2020).

### 4.3.1 Combustíveis e paisagens

Se estiverem suficientemente secas, as florestas boreais têm leitos de combustível muito inflamáveis. A mistura predominante de pinheiro silvestre e abeto norueguês favorece uma camada profunda de musgos, frequentemente penetrada por arbustos anões que constituem um excelente combustível durante o tempo seco. As plantas não vasculares, como os musgos, trocam humidade diretamente com o ar e tornam-se tão secas como a folhada fina durante um dia seco de verão. Antes do início da silvicultura industrial (meados do século XIX), as regiões boreais apresentavam uma área ardida 100 vezes superior à dos regimes de incêndio atuais (Niklasson & Granström, 2000). Uma infraestrutura bem estabelecida de acessibilidade florestal e elevados incentivos à supressão de incêndios nas florestas produtivas ajudaram a uma redução notável das áreas ardidas, em contraste com as zonas remotas do Norte da América do Norte e da Sibéria, onde os incêndios ardem frequentemente em zonas exclusivamente selvagens, com fraca acessibilidade e recursos humanos limitados em termos de edifícios ou infraestruturas.

No Reino Unido e na Noruega, os incêndios queimam sobretudo paisagens abertas dominadas por urze e prados Davies *et al.* (2013). Os incêndios nessas regiões concentram-se sobretudo na primavera, antes de os índices tradicionais de perigo de incêndio se tornarem elevados. A razão para isso é que a fase fenológica de dormência dos arbustos e prados do Norte fornece grandes quantidades de combustível fino morto que rapidamente se torna inflamável com baixa humidade, apesar de um solo saturado de água. Isto pode causar incêndios rápidos em períodos secos ocasionais durante partes do inverno sem neve, como os incêndios noruegueses de Lærdal e Frøya de janeiro de 2014 (Log, 2016) e vários incêndios em ilhas ao largo da costa escocesa (Fulton, 2024). Durante o período de crescimento da vegetação (concomitante com as probabilidades de elevado perigo de incêndio florestal), estas paisagens são menos propensas ao fogo devido à vegetação vascular verde que mantém um elevado teor de humidade no leito de combustível.

### 4.3.2 Demografia

Tal como na maioria das regiões, a origem dos incêndios segue a densidade populacional, mas os maiores e mais intensos incêndios do Norte da Europa ocorrem em zonas pouco povoadas (Figura 5). Embora exista uma cobertura suficiente de florestas de coníferas em todas as zonas boreais, as zonas mais rurais sofrem de (i) um longo período de tempo para detetar incêndios, (ii) um longo período de tempo para encontrar e alcançar o incêndio, e (iii) restrições fiscais que resultam na escassez de recursos e de pessoal (Sjöström & Granström, 2023a).

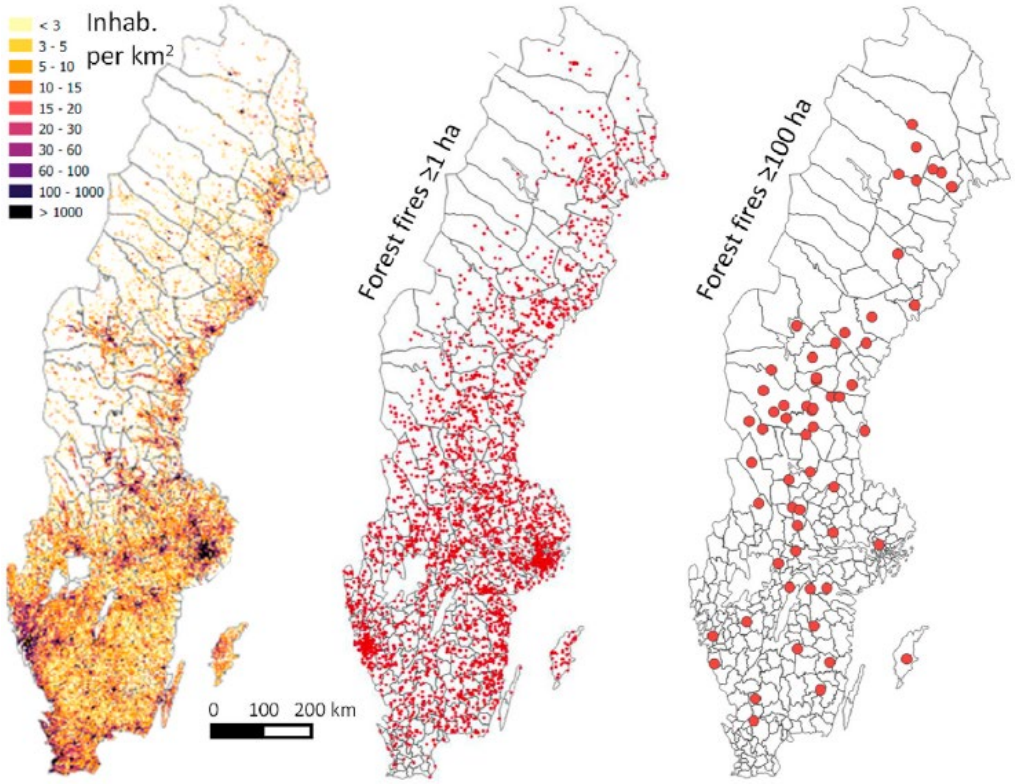



*Figura 5. Exemplo da Suécia 1996-2020. Densidade populacional (esquerda), ocorrência de incêndios florestais (≥1 ha), (meio), ocorrência de incêndios florestais (≥100 ha), (direita) (Sjöström & Granström, 2023a).*

Uma vez que a probabilidade de o incêndio escapar ao ataque inicial aumenta exponencialmente com o tempo de início do combate, as longas distâncias no Norte constituem um desafio, reforçado pela diminuição da população desde a década de 1970. Isto resultou em distâncias mais longas entre os quartéis de bombeiros e em tempos de resposta mais longos (principalmente com bombeiros empregados a tempo parcial ou voluntários). Há cinquenta anos, os conhecimentos sobre o combate aos incêndios florestais estavam difundidos entre a população, mas atualmente são do conhecimento de poucos, o que provoca dificuldades durante as épocas altas

### 4.3.3 Desafios e melhorias observados nas últimas décadas

- Durante a década de 1990 e o início da década de 2000, a disponibilidade de recursos na Europa boreal diminuiu, com o consequente aumento do tempo de resposta aos incêndios florestais.
- O potencial de propagação na floresta de produção comercial é muito grande, mas é frequentemente subestimado durante o ataque inicial.
- A escassez de recursos e o rescaldo insuficiente (que é da responsabilidade do proprietário) foram dois fatores importantes para os grandes incêndios ocorridos em toda a Escandinávia em 2018.
- O combate a incêndios em condições de frio, escuridão e vento exige mais preparação do que durante os incêndios de inverno na Noruega em 2014, em que foram destruídos cerca de 100 edifícios (alguns pertencentes à lista do património mundial da UNESCO). As condições climatéricas proibiram a utilização de helicópteros e o gelo entupiu as mangueiras com as baixas temperaturas (Log, 2016).

- O sistema de gestão de incêndios do Reino Unido não tem em conta o aspeto fenológico e não pode dar um prognóstico adequado para a maioria dos incêndios.

Nos últimos cinco anos, registaram-se algumas melhorias.

- Os programas de combate aéreo a incêndios (Suécia e Noruega) patrocinados pelo Estado e pela UE aumentaram a utilização de asas fixas ou helicópteros nas fases iniciais do incêndio, ao contrário das décadas anteriores em que os recursos aéreos eram utilizados apenas após o fracasso do ataque inicial.
- A reorganização dos serviços de bombeiros para um comando e controlo mais centralizados permite um acesso mais fácil aos recursos em zonas altamente rurais.
- O aumento do número de meios aéreos em caso de alarme aumenta a taxa de sucesso da supressão precoce.
- A maioria dos edifícios arde nos incêndios da primavera em incêndios muito pequenos, muitas vezes com início diretamente no exterior (ou no interior) dos jardins. O potencial de melhoria através da sensibilização para os riscos e de métodos de limpeza simples é elevado.
- Um modelo de alerta para incêndios em herbáceas na primavera está operacional na Suécia desde 2021 (Sjöström & Granström, 2023b)

#### 4.3.4 Fatores para o futuro

- A continuação do despovoamento das zonas rurais agravará as dificuldades de recrutamento.
- Instrumentos simples de gestão dos solos. Estas incluem (i) a limitação da plantação de *Pinus contorta*, que é mais inflamável do que o *P Sylvestris* nativo e (ii) a limitação do desbaste agressivo pré-comercial de árvores de folha caduca (predominantemente bétula ou choupo). A inclusão de árvores de folha caduca reduz a inflamabilidade da camada de musgo (Vermina Plathner et al, 2022).
- Formação dos bombeiros após várias épocas com meteorologia desfavorável à ocorrência de incêndios.
- O combate aos incêndios deve ser coordenado e concluído a partir do solo e não do ar. O conhecimento de táticas e métodos desvanece-se rapidamente sem prática.
- Práticas simples de jardinagem aumentam significativamente a probabilidade de sobrevivência dos edifícios nos incêndios florestais do Norte: (1) um relvado gerido à volta do edifício, (2) reduzir as pilhas de combustível perto das fachadas e (3) árvores de folha caduca à volta do jardim (Vermina Plathner *et al.*, 2023).

# 5. Emissão e dispersão de fumo

## 5.1. Emissão de fumo

O fumo libertado pelos fogos florestais contém quantidades significativas de dióxido de carbono ($CO_2$), monóxido de carbono (CO), metano ($CH_4$), óxidos de azoto (NOx), amoníaco ($NH_3$), material particulado (PM) (nomeadamente partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 µm, ou PM2,5, e partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 10 µm, ou PM10), hidrocarbonetos excluindo o metano (NMHC) e outros compostos químicos. A Figura 6 ilustra diferentes compostos que compõem o fumo. Estes compostos podem ter consequências severas para qualidade do ar local e regional (e.g., Valente *et al.*, 2007; Miranda *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2011; Martins *et al.*, 2012; Keywood *et al.*, 2015; Osswald *et al.*, 2023), reduzindo a visibilidade, contribuindo para o "smog" fotoquímico e deteriorando a qualidade do ar em geral, afetando assim a saúde humana (e.g., Miranda *et al.*, 2010, 2012; Johnston *et al.*, 2012; Dennekamp *et al.*, 2015; Reid *et al.*, 2016; Haikerwal *et al.*, 2016, Sebastião *et al.*, 2019).

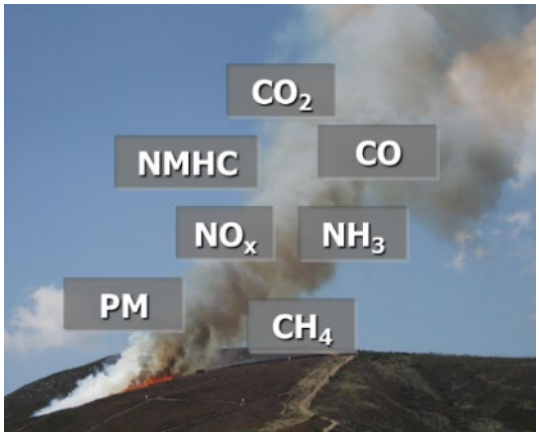



*Figura 6. Alguns dos compostos presentes no fumo emitido durante um fogo florestal (ilustração dos autores).*

É possível estimar as emissões atmosféricas de fogos florestais considerando vários fatores inter-relacionados: características dos combustíveis, eficiência da combustão, tipo de fogo, meteorologia e localização geográfica. As estimativas das emissões dos fogos florestais também implicam conhecer a área queimada e a duração do fogo.

O tipo de vegetação e a sua carga de combustível (ou carga de biomassa) são dois dos fatores mais importantes para estimar as emissões de fogos florestais. Variações nas características do combustível podem contribuir com até 80% das incertezas na estimativa das emissões dos fogos florestais (Ottmar *et al.*, 2009).

Na estimativa das emissões devem ser consideradas as diferentes fases da combustão, nomeadamente pré-ignição, em chama, em combustão lenta e incandescente. A duração ou predominância das diferentes fases depende do tipo/mistura do combustível, da sua humidade e das condições atmosféricas. Segundo Lobert e Warnatz (1993), durante a combustão em chama, os compostos mais emitidos são $CO_2$ e vapor de água e, em menor quantidade, NOx, dióxido de enxofre ($SO_2$), azoto ($N_2$) e partículas com alto teor de carbono. As emissões mais oxidadas são predominantes devido à alta eficiência de queima. Na fase de combustão lenta são dominantes as emissões de compostos parcialmente oxidados ou reduzidos, nomeadamente CO e outros, como $CH_4$, NMHC e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), $NH_3$, compostos de

enxofre e partículas com baixo teor de carbono. O CO é, no entanto, o principal composto associado a esta fase.

A eficiência da combustão também é relevante ao calcular as emissões provenientes dos fogos florestais. Geralmente, é definida como a razão entre o carbono libertado na forma de $CO_2$ e o carbono total presente no combustível. Também é comum utilizar a eficiência modificada, que consiste na razão entre o carbono libertado na forma de $CO_2$ e a soma de $CO_2$ e CO. Em configurações experimentais, de campo ou laboratoriais, a eficiência de combustão é expressa como a fração consumida do combustível disponível, sendo diretamente dependente do tipo de vegetação e do seu teor em humidade.

Por fim, o fator de emissão consiste na massa de poluente emitida por massa de combustível consumido ou área queimada. Os fatores de emissão variam, dependendo do poluente, do tipo de combustível e da eficiência de combustão (e da fase de combustão). Por exemplo, fogos florestais, em que a combustão lenta domina, podem emitir uma massa de poluentes (excluindo dióxido de carbono) várias vezes maior do que a de um fogo em que o combustível é consumido durante a fase de chama (Peterson, 1987).

Foram selecionados fatores de emissão para condições características dos países do sul da Europa (Fernandes *et al.*, 2022), com base numa revisão bibliográfica que considerou tipos de uso do solo, além de valores selecionados de acordo com estudos anteriores (Miranda 2004; Alves *et al.*, 2011; Martins *et al.*, 2012, Van Der Werf *et al.*, 2017; Vicente *et al.*, 2017, 2012). A Tabela 3 lista os fatores de emissão médios (em $g.kg^{-1}$ de combustível queimado, base seca) para poluentes atmosféricos relevantes. Todos os valores foram obtidos a partir de fogos florestais experimentais.

*Tabela 3. Fatores de emissão médios ($g.kg^{-1}$ de combustível queimado, base seca) para os principais poluentes, por tipo de vegetação (Fernandes et al., 2022).*

| Espécies | Eucalipto [c, d, e] | Outras resinosas[b] | Carvalho, Castanheiro, Sobreiro[b] | Acácia[c, d, e] | Outras folhosas[a] | Pinheiro-bravo[c, d, e] | Pinheiro manso[b] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **PM10** | 21 | 10 | 13 | 11 | 8.3 | 13 | 10 |
| **PM2.5** | 19 | 9 | 11 | 10 | 6.3 | 11 | 9 |
| **NOx** | 5 | 3 | 3 | 5 | 3.11 | 3 | 5 |
| **CO** | 170 | 100 | 128 | 232 | 102 | 204 | 91 |
| **$SO_2$** | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.4 | 0.8 | 0.8 |
| **$NH_3$** | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 2.17 | 0.6 | 0.6 |
| **$CO_2$** | 1408 | 1497 | 1393 | 1561 | 1585 | 1398 | 1487 |
| **$CH_4$** | 6 | 6 | 6 | 4.7 | 5.82 | 6 | 5 |

a Van Der Werf *et al.* (2017)
b Miranda (2004)
c Vicente *et al.* (2012)
d Vicente *et al.* (2017)
e Alves *et al.* (2011)

Atualmente, há um esforço considerável da comunidade científica para quantificar as emissões dos fogos florestais através de abordagens de deteção remota (e.g., Monteiro *et al.*, 2013; Ichoku and Ellison, 2014; Darmenov e da Silva, 2015; Chuvieco *et al.*, 2016; Van Der Werf *et al.*, 2017). Além disso, o poder radiativo instantâneo do fogo (FRP, na sigla em inglês) é utilizado como medida da taxa de emissão de energia radiante pelo fogo, permitindo derivar

diretamente a quantidade de combustível queimado, especialmente para facilitar aplicações em tempo real (Sofiev *et al.*, 2009; Kaiser *et al.*, 2012; Nguyen *et al.*, 2023).

## 5.2. Dispersão do fumo

Os gases e partículas emitidos sofrem dispersão e transformações químicas na atmosfera à medida que são transportados. Os seus efeitos podem ser sentidos a longas distâncias da fonte, ou seja, do fogo florestal. Embora a maioria dos fogos florestais se limite a algumas centenas de hectares, os seus impactos, sem fronteiras naturais ou políticas, podem ser sentidos e relatados a consideráveis distâncias dos limites físicos da progressão do fogo. Dependendo das condições meteorológicas, as plumas de fumo podem permanecer na atmosfera por longos períodos, com alteração das suas características físico-químicas.

A qualidade do ar de uma determinada região, frequentemente expressa em termos de concentração de poluentes, depende não apenas das suas emissões, mas também de processos que regulam a dinâmica da atmosfera, tais como: o transporte ou advecção e a dispersão; as transformações químicas sofridas pelos poluentes (e.g., processos fotoquímicos); e os mecanismos de remoção desses poluentes da atmosfera (deposição seca e húmida).

A avaliação dos efeitos dos fogos florestais na qualidade do ar pode ser baseada em medições e/ou resultados de modelos numéricos. Não obstante a realização de algumas campanhas de monitorização (e.g., Miranda *et al.*, 2005; Valente *et al.*, 2007; Miranda *et al.*, 2010), geralmente não são efetuadas medições específicas de qualidade do ar para situações envolvendo fogos florestais, e os dados medidos provêm principalmente das redes existentes de monitorização da qualidade do ar. A aplicação de modelos de qualidade do ar para avaliar a contribuição dos fogos florestais para episódios de poluição atmosférica está a tornar-se uma técnica cada vez mais frequente (e.g., Rea *et al.*, 2016; Turquety *et al.*, 2020; Osswald *et al.*, 2023).

Um modelo numérico de qualidade do ar tem como objetivo estimar os campos de concentração C(x,y,z,t) de um poluente emitido para a atmosfera. A Figura 7 apresenta esquematicamente um modelo de qualidade do ar. O modelo simula as interações dos poluentes na atmosfera e o impacto resultante na qualidade do ar, utilizando informações como valores de emissão e meteorológicos, entre outros dados.

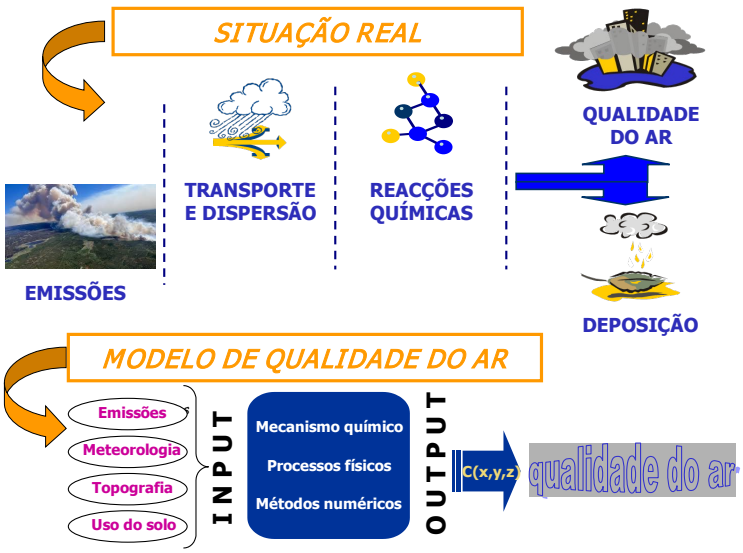



*Figura 7. Esquema de uma abordagem de modelação de qualidade do ar (ilustração dos autores).*

Existem vários modelos numéricos de qualidade do ar, que variam conforme a escala do processo a ser analisado e o tipo de abordagem ou formulação a ser utilizada. Considerando a escala espacial, distinguem-se modelos globais ou planetários, modelos de macroescala, mesoescala e escala local ou microescala. Em termos temporais, os modelos podem ser classificados como de curto prazo ou longo prazo. As escalas espaciais e temporais estão intimamente relacionadas; por exemplo, um modelo de escala local é geralmente de curto prazo.

Um exemplo de um modelo de dispersão em escala local é o DISPERFIRE (Miranda *et al.*, 1994; Valente *et al.*, 2007), que se baseia numa abordagem Lagrangeana para a modelação da dispersão. Este modelo foi aplicado a um fogo experimental e validado com dados medidos no decorrer de uma campanha específica de monitorização. A Figura 8 mostra o campo de concentrações de PM10 estimado pelo DISPERFIRE, para a queima de parcelas experimentais.

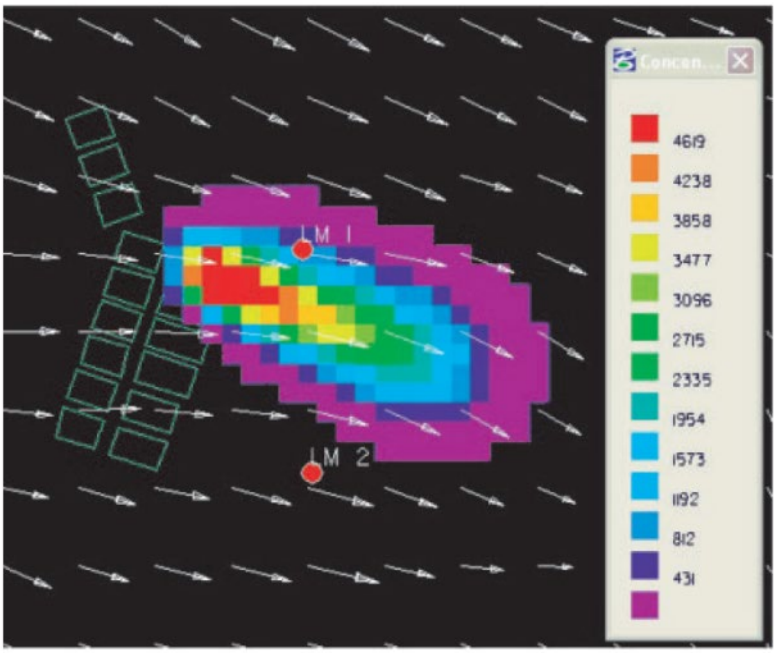



*Figura 8. Campo de concentrações de PM10 (µg.m$^{-3}$) simulado por um modelo de dispersão local (Valente et al., 2007).*

Os valores simulados foram comparados com medições realizadas por equipamentos num laboratório móvel (LM1 na Figura 8). Os valores estimados (entre 431-812 µg.m$^{-3}$) concordaram razoavelmente com o valor medido (486 µg.m$^{-3}$), no mesmo período.

Em resumo, compreender a emissão e a dispersão de fumo é crucial para prevenir os efeitos na saúde humana das populações expostas e dos bombeiros. Atualmente, existe conhecimento sólido, bem como dados e ferramentas, que podem ajudar a capacitar os envolvidos a prever e reagir ao fumo provenientes dos fogos florestais de forma eficaz.

# 6. Métodos de combate ao incêndio

Um inquérito feito por entrevistas relativas às estratégia e técnicas de supressão de incêndios florestais foi realizado pela entidade SAFE em abril-maio de 2023 para desenvolver este capítulo. O inquérito e as entrevistas focaram nos seguintes aspetos:

- Ataque inicial para manter os incêndios tão pequenos quanto possível
- Combate a incêndios extremos
- Combate a incêndios na zona de influência urbana

O inquérito recebeu respostas de 27 bombeiros de dez países: Espanha, Portugal, Itália, Croácia, França, Grécia, Irlanda, Rússia, Alemanha e África do Sul. As entrevistas foram realizadas com quatro peritos: dois da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil de Portugal (informadores 1 e 2), um dos Bombeiros e Salvamento do Departamento de *Bouches du Rhone*, em França (informador 3), e um dos *Bombeiros Florestais de Castilla La Mancha*, em Espanha (informador 4).

## 6.1. Estratégias e técnicas de supressão do fogo

De acordo com o inquérito, uma maioria significativa de 89% dos bombeiros afirmou que a estratégia e as técnicas que têm vindo a empregar revelaram-se eficazes no combate aos incêndios durante a fase de resposta inicial ou ataque inicial. As técnicas e estratégias utilizadas estão resumidas na Figura 9, sendo a estratégia aérea a abordagem mais frequentemente mencionada nos inquéritos. Isto sugere que a maioria dos países europeus utiliza esta estratégia para a gestão dos incêndios florestais.

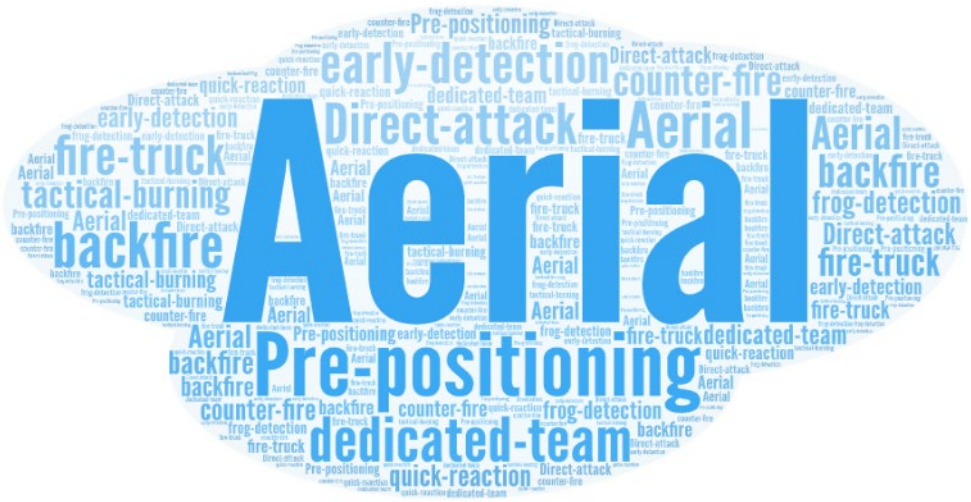



*Figura 9. Coleção de palavras relacionadas a técnicas e estratégias de supressão do fogo usadas na Europa (ilustração dos autores).*

Este capítulo tem por objetivo distinguir entre estratégia de supressão de incêndios e técnica de supressão de incêndios. Uma estratégia de supressão de incêndios refere-se a uma abordagem ou plano geral desenvolvido para combater e controlar os incêndios. Em contrapartida, a técnica de supressão de incêndios refere-se a um método ou abordagem específica utilizada para extinguir ou controlar um incêndio.

## 6.1.1 Estratégia de supressão de incêndio

**a. Estratégia Aérea**

As estratégias aéreas na supressão de incêndios envolvem a utilização de aeronaves para combater e controlar os incêndios florestais. Estas estratégias aproveitam as capacidades das aeronaves para aplicar várias técnicas de supressão de incêndios a partir do ar, efetuar reconhecimentos e apoiar operações de combate a incêndios em terra.

**b. Estratégia de pre-posicionamento**

A estratégia de pré-posicionamento na gestão de incêndios florestais envolve o posicionamento estratégico de recursos e pessoal em áreas de alto risco para melhorar as capacidades de resposta e os esforços de supressão de incêndios florestais. O objetivo é minimizar o tempo de resposta e aumentar a eficácia na contenção e extinção dos incêndios florestais.

Esta estratégia é utilizada em vários países, incluindo a França, como partilhado numa entrevista com um bombeiro do Departamento de *Bouches du Rhone*.

"Utilizamos o pré-posicionamento de forças terrestres nos pontos especiais que estão perto das estradas principais e perto do acesso à floresta. Se detetarmos um incêndio algures, enviamos muitas pessoas e camiões".

**c. Utilização de equipas helitransportadas estratégia de equipe especializada**

Uma equipa "helitransportadas" é uma equipa especializada de combate a incêndios que é transportada por helicóptero para áreas remotas para combater os incêndios florestais. São altamente treinados e especializados em técnicas de combate a incêndios, incluindo rapel a partir de helicópteros, construção de linhas de fogo e utilização de ferramentas manuais para extinguir as chamas. As equipas helitransportadas são frequentemente os primeiros a responder a incêndios florestais em áreas de difícil acesso e desempenham um papel crucial na contenção e supressão de incêndios antes que estes se possam propagar. Trabalham em coordenação com outras equipas de combate a incêndios em terra e no ar para garantir a segurança da tripulação e do público, bem como para proteger propriedades e os recursos naturais.

## 6.1.2. Técnicas de supressão de incêndio

*Ataque direto*

O ataque direto é uma abordagem de combate a incêndios que implica que o pessoal combata o incêndio junto à linha de fogo. Este método pode ser feito por equipas que utilizam ferramentas manuais, ou por equipas equipadas com um sistema de distribuição de água, ou uma combinação de ambos. O objetivo do ataque direto é extinguir diretamente o incêndio através da aplicação de água ou da remoção física de combustível através da utilização de ferramentas, com o objetivo de obter rapidamente o controlo e impedir a propagação do incêndio.

- Ataque direto à cabeça: envolve esforços de combate ao fogo diretamente virados para a cabeça, ou seja, a frente de fogo mais ativa;
- Ataque direto pela cauda: consiste em atacar o incêndio pela retaguarda e trabalhar ao longo dos flancos em direção à cabeça do incêndio
- Ataque direto pelos flancos: consiste em atacar a parte lateral do incêndio e trabalhar em torno da cabeça e da cauda.

*Ataque indireto*

Este método envolve a aplicação de táticas de supressão que têm lugar longe da borda ardente do incêndio, quer através da utilização de linhas de controlo para conter a propagação do incêndio, quer através da utilização proactiva do fogo como ferramenta de supressão.

- 
- A utilização de linhas de controlo: as linhas de controlo são barreiras construídas ou naturais, incluindo bordos de fogo tratados, que são utilizadas para controlar um incêndio. Podem ser construídas manualmente, mecanicamente ou através da aplicação de água ou de retardadores.
- Ataque Paralelo: o ataque paralelo é um tipo específico de ataque indireto em que são criadas linhas de controlo ao longo dos flancos do incêndio em direção à cabeça do incêndio e à sua volta. Este método de supressão é geralmente mais eficaz quando se utilizam veículos apropriados, tais como tratores que puxam manguais e escavadeiras.
- Fogo controlado
    - Queima defensiva - iniciar um fogo controlado para remover o combustível à frente de um incêndio que avança e extinguir o fogo controlado antes da chegada do incêndio do incêndio rural; este método é normalmente aplicado a uma distância segura da frente do incêndio e deve ser planeado atempadamente;
    - Queima ofensiva - iniciar um fogo controlado e deixá-lo arder em direção à frente de fogo que se aproxima; esta técnica combina a vantagem de remover o combustível e de criar um fluxo térmico direcionado à frente de fogo; no entanto, requer uma avaliação cuidadosa e operadores treinados.

*Ataque aéreo*

As aeronaves podem ser utilizadas em incidentes de incêndios florestais para utilizar métodos de ataque direto e indireto.

- O ataque aéreo direto consiste em aeronaves que lançam água ou retardantes de chamas sobre a área ardida
- O ataque aéreo indireto consiste em aeronaves que lançam água ou retardantes de chama em frente da área ardida para formar linhas de controlo ou para reforçar as linhas de controlo existentes.

## 6.2. Combate ao incêndio em zonas de interface urbano-florestal

Tal como descrito no Capítulo 4, os incêndios na interface urbano-florestal são um tipo complexo de incêndio que ocorre na interface entre as áreas florestais e as comunidades. Estes tipos de incêndios são particularmente perigosos e difíceis de combater porque envolvem frequentemente uma mistura de vegetação, estruturas e vidas humanas. O sul da Europa é uma região altamente propensa a incêndios, onde os incêndios extremos têm frequentemente consequências desastrosas tanto para as estruturas como para as pessoas. Enfrentar os incêndios na IUF é muito difícil, como afirma um bombeiro francês:

"Na nossa região, a dificuldade é que temos muitas casas em zonas diferentes e não podemos defender cada casa. Não podemos colocar um veículo em frente de cada casa porque são demasiadas casas a proteger, por isso é difícil se a floresta estiver muito perto da casa" (participante-3).

O objetivo do combate a incêndios em zonas IUF é extinguir o fogo antes que ele atinja uma moradia, essencialmente no limite exterior do quintal ou onde começam os combustíveis florestais (Ganteaume *et al.*, 2021).

### 6.2.1. Supressão do fogo na IUF

A Tabela 4 discute como as técnicas de supressão de incêndios descritas acima podem ser usadas para combater incêndios na WUI:

*Tabela 4. Pontos fortes e limitações das técnicas de supressão de fogo na IUF*

| Nº | Técnica | Ação |
|---|---|---|
| 1 | Ataque aéreo | O retardante de chama e a água não podem ser lançados diretamente na área devido a preocupações de segurança e à presença de pessoas, propriedades e linhas elétricas. Em vez disso, são efetuados ataques aéreos fora da IUF para criar uma barreira ou linha de contenção antes de o incêndio atingir áreas povoadas. Esta abordagem proactiva maximiza a segurança enquanto suprime eficazmente o incêndio e protege a IUF. |
| 2 | Ataque direto | Para proteger as estruturas na IUF, os bombeiros utilizam táticas de defesa de estruturas, que são ofensivas quando os recursos dirigem a cabeça do incêndio para um ponto final desejável. Se os bombeiros puderem atacar diretamente um incêndio em segurança, podem ser enviados para a ação com ferramentas manuais para remover e abafar combustíveis em combustão, mangueiras para extinguir as chamas e outro equipamento de combate a incêndios.<br>O ataque direto pode ser perigoso devido à natureza dinâmica dos incêndios em zonas de IUF. O ataque direto também deve ser realizado imediatamente quando os bombeiros encontram um foco de incêndio. |
| 3 | Ataque indireto | A criação de um corta-fogo/aceiro e a realização de um contrafogo ao longo da estrada à frente do incêndio pode ser uma tática eficaz para proteger a IUF; no entanto, antes de iniciar esse contrafogo, é necessária uma atenção especial para garantir que a realização de um contrafogo é segura e viável dadas as circunstâncias. |

Maioritariamente, a utilização de equipamento pesado para o combate a incêndios ou outros fins não é viável. Isto pode dever-se a várias razões, como espaço limitado, terreno acidentado ou preocupações com danos em infraestruturas ou propriedades. Como resultado, as equipas têm de utilizar equipamento alternativo adequado à zona de IUF. Estas ferramentas e veículos especializados são concebidos para serem ágeis, manobráveis e eficazes no combate aos incêndios florestais nas zonas de IUF. Aqui estão alguns dos equipamentos móveis e táticos de combate a incêndios que podem ser utilizados para combater incêndios em IUF:

- Bombas portáteis: estas bombas leves são concebidas para serem facilmente transportadas e operadas em locais remotos. Podem ser utilizadas para extrair água de fontes de água próximas, como piscinas, lagoas, lagos ou tanques portáteis, e fornecer água às equipas de combate a incêndios.
- Pulverizadores de mochila: os pulverizadores de mochila são dispositivos portáteis que os bombeiros podem usar às costas, permitindo-lhes mover-se rapidamente através de terrenos

acidentados enquanto aplicam água ou retardante de chamas para extinguir as chamas. São úteis para aceder a áreas onde os equipamentos maiores não conseguem chegar.

- Veículos ligeiros especializados: veículos especializados, tais como camiões de mato ou veículos todo-o-terreno, potencialmente equipados com aparelhos de combate a incêndios, são concebidos para aceder em estradas estreitas, terrenos acidentados e áreas de IUF. Esses veículos transportam pequenos tanques de água, bombas, mangueiras e outras ferramentas de combate a incêndios, permitindo que as equipas respondam e suprimam rapidamente os incêndios florestais em ambientes difíceis.

### 6.2.2. Proteção da população e edificações

Esta grande preocupação é totalmente investigada no âmbito de outra tarefa do projeto FirEUrisk e que será reportada noutro relatório[2] que será publicado brevemente.

Existem duas principais opções

- Evacuação – é, por vezes, a melhor opção, especialmente no caso de zonas de IUF vulneráveis, por exemplo, parques de campismo ou habitações ligeiras feitas de materiais combustíveis. No entanto, tem de ser planeada e organizada com a devida antecedência, antes de o fogo se aproximar da zona de proteção, uma vez que pode demorar muito tempo. O número, a disponibilidade e a segurança das vias de saída são também fatores cruciais a considerar antes de decidir sobre a evacuação.
- Abrigo no local – na maioria dos contextos europeus, os edifícios são feitos de materiais não inflamáveis que proporcionam a melhor proteção, em comparação com a evacuação. No entanto, pode ser necessária uma preparação para garantir que o abrigo não apresenta fragilidades e que as pessoas podem permanecer no interior sem entrar em pânico.

## 6.3. Combate a episódios de comportamento extremo do fogo

Conforme descrito no Capítulo 3, o combate a incêndios extremos é um grande desafio em comparação com o combate a incêndios florestais normais. Os incêndios extremos são caracterizados por calor intenso, rápida propagação e comportamento imprevisível, o que aumenta significativamente os riscos para a segurança dos bombeiros e dificulta a previsão da dinâmica do fogo. Os métodos tradicionais de combate a incêndios que envolvem principalmente o ataque direto às chamas podem não ser tão eficazes devido ao calor intenso e ao comportamento errático do incêndio, tornando a contenção e o controlo mais difíceis.

Os bombeiros entrevistados sublinharam que:

a) a combinação de táticas, incluindo a combinação de maquinaria pesada com o combate tático ao fogo, é crucial no combate a incêndios extremos.

b) é necessário mudar a mentalidade dos métodos de ataque direto para o ataque indireto.

No nosso inquérito, verificou-se que a maioria dos inquiridos (89%) considera que as suas estratégias atuais são eficazes nos ataques iniciais, mas essa eficácia não se estende às estratégias utilizadas nos incêndios extremos. Uma parte significativa (26%) considerou-as ineficazes ou muito ineficazes, enquanto apenas 30% as considerou eficazes. Além disso, a maioria dos inquiridos (40%) manteve-se neutra quanto à eficácia destas estratégias. Estes

[2] D2.8 "Diretrizes para redução da vulnerabilidade das comunidades a incêndios extremos e incêndios na interface urbano-florestal

resultados sublinham a necessidade de compilar recomendações baseadas em estratégias cientificamente fundamentadas que os bombeiros podem empregar para combater eficazmente os incêndios extremos.

Com base no inquérito, nas entrevistas e na revisão da literatura, a Tabela 5 resume as técnicas que podem ser utilizadas para abordar os comportamentos de incêndios extremos descritos acima.

*Tabela 5. Pontos fortes e limitações de diferentes técnicas face ao comportamento extremo do fogo*

| **Comportamento extremo do fogo** | **Técnica de supressão do fogo** | | | **Notas** |
|---|---|---|---|---|
| | **Ataque direto** | **Ataque indireto** | **Ataque aéreo** | |
| Focos secundários | Muito recomendado. Extinguir focos secundários rapidamente | Conduzir ataque indireto quando o ataque inicial e o fogo se descontrolam | Quando a equipa aérea vê o foco secundário, ataque direto vindo de cima é muito recomendado | Priorizar o ataque inicial |
| Fogos em copas | Não recomendado. Ataque direto da frente de chamas é impossível e perigoso | Abrir aceiros e *contrafogo* são recomendados | Ataque aéreo direto e indireto são recomendados. | Focar em controlar os flancos ao invés de atacar diretamente a frente de chamas |
| Fogos eruptivos | Não recomendado | Fogo tático ou de supressão é recomendado | Podem ser utilizados ataques aéreos, mas é difícil manobrar em certos cenários como os desfiladeiros. | |
| Fogos de junção | Recomendado antes da junção de frentes | Construir aceiros ou faixas de controle antes da junção de frentes | Muito recomendado para auxiliar as operações em solo e evitar a de frentes | |
| Conflagrações | Recomendado antes da intensidade do fogo ser elevada; manter-se em local seguro | Fogo controlado é recomendado | Ataques diretos ou indiretos com água e retardante são recomendados | Evacuação preventiva pode ser necessária |
| Vórtices de fogo | Não recomendado | Não recomendado | Não recomendado | Apenas esperar e ver até o fenómeno parar, porque o vórtice de fogo maioritariamente ocorre num curto período |

O capítulo seguinte fornece informações detalhadas que justificam as opções enumeradas na Tabela 5.

# 7. Segurança pessoal e saúde

## 7.1. Estado de saúde e desempenho múltiplo

Atualmente, os bombeiros estão a responder a incêndios florestais cada vez mais graves e perigosos, que são cada vez mais intensos e perigosos devido às alterações climáticas (Turco et al., 2019). Os operacionais são expostos a grandes esforços para evitarem danos cada vez maiores ou mesmo a perda de elementos críticos e vidas humanas (D. X. Viegas, Figueiredo Almeida, et al., 2017). No entanto, os operacionais também estão expostos a condições suprafisiológicas, nomeadamente pela meteorologia cada vez mais difícel de tolerar quando combatem incêndios extremos, o que pode prejudicar o seu desempenho geral, o seu bem-estar e estado de saúde a curto e longo prazo (Barros et al., 2021; Miranda et al., 2012). De facto, um bom estado de saúde e uma boa capacidade física podem melhorar a sua capacidade global de combate a incêndios e a sua segurança, especialmente durante as piores condições (Chizewski *et al.*, 2021; Lindberg, 2015; Lundström *et al.*, 2015; A. J. Silva *et al.*, 2018). Por conseguinte, é importante integrar estratégias de formação centradas na saúde e conhecimentos nos programas de formação dos bombeiros e nas rotinas de exercício. Alguns destes aspetos-chave que devem ser acrescentados aos programas de formação de bombeiros que enfrentarão incêndios extremos são brevemente apresentados de seguida:

- Estado de saúde global e fisiologia melhorada para favorecer o desempenho:
    - Saúde cardiovascular:

O sistema cardiovascular e a aptidão física são de extrema importância para os bombeiros, tendo em conta a capacidade de realizar tarefas extenuantes quando expostos a ambientes adversos. A melhoria da fisiologia cardiovascular e da capacidade de resistência deve ser introduzida e reforçada de forma progressiva e contínua. O aumento da capacidade cardiovascular e da resistência pode ser conseguido através de exercícios aeróbicos, incluindo ciclismo, corrida e natação, mas também através de exercícios específicos adequados à função. Além disso, devem ser destacados os hábitos saudáveis para o coração, que podem incidir na alimentação saudável, mas também ao evitar a exposição ao fumo e ao tabaco, stress e no aumento da acumulação de tecido adiposo, nomeadamente visceral (Dinis *et al.*, 2018; Lindberg, 2015; Lundström *et al.*, 2015; Soteriades *et al.*, 2011).

    - Capacidade física:

Para garantir a eficiência e o bem-estar dos bombeiros, é crucial estabelecer uma melhoria personalizada das capacidades físicas dos bombeiros que melhore o rendimento global, mas mais importante, que também evite lesões ou o aumento do risco de eventos relacionados com o sistema cardiovascular. Em primeiro lugar, deve ser efetuada uma avaliação física abrangente para compreender a saúde e as capacidades físicas de base, por exemplo, seguindo os parâmetros padrão do estado cardiovascular e da resistência, bem como da força muscular e da composição corporal (Lindberg, 2015; Lundström *et al.*, 2015).

    - Condicionamento físico:

Após a avaliação do estado individual, devem ser implementados programas de treino e sessões de exercício personalizados, com o objetivo de obter um condicionamento físico regular

para melhor potenciar as capacidades individuais e respetivas necessidades. O tipo de exercício aeróbico, que pode considerar corrida, levantamento de pesos, treino em circuito e movimentos funcionais, pode ser integrado para atingir as necessidades exigidas. As principais funções e tarefas de combate a incêndios durante a execução do trabalho também devem ser consideradas, por exemplo, imitando situações da vida real para potenciar a coordenação muscular e o desempenho geral relacionado com a tarefa.

Em suma, os treinos de combate a incêndios rurais devem ter sessões e programas de formação dedicados que introduzam e explorem estes aspetos físicos para promover melhores resultados físicos nas forças de bombeiros. Os bombeiros mais bem preparados estarão expostos a uma menor acumulação de lactato nos seus músculos, evitando a falha muscular e, em última análise, a exaustão ou mesmo o colapso (Lindberg, 2015; Lundström *et al.*, 2015).

- Resiliência e saúde mental, qualidade do sono e gestão de stress

Os bombeiros estão normalmente expostos a situações de ameaça e de stress que podem ter um impacto significativo no seu bem-estar mental, nos processos de tomada de decisão e no seu desempenho global. Estes aspetos são da maior importância para os aspetos de segurança e para a consciencialização e ações relacionadas com a segurança. Neste sentido, a formação dos bombeiros deve incluir a potenciação de melhores capacidades de liderança, resiliência mental e gestão do stress. A qualidade do sono é também um fator de impacto nestes aspetos, sendo da maior importância realçar e reforçar estratégias e práticas para otimizar a higiene e a saúde do sono. A gestão das perturbações do sono relacionadas com o trabalho por turnos também deve ser considerada nas equipas e forças a destacar (Lundström *et al.*, 2015; B. M. Silva *et al.*, 2022).

- Nutrição e hidratação:

Uma nutrição ajustada e uma hidratação adequada são aspetos fundamentais para manter um desempenho ótimo e a homeostase fisiológica. Os programas de treino devem também prever o planeamento de dietas e refeições equilibradas antes, durante e após grandes cargas de trabalho. Dietas saudáveis, enriquecidas em antioxidantes e outros componentes desintoxicantes, podem ser de grande importância para atenuar e recuperar do aumento da exposição ao fumo. O mesmo se aplica à hidratação, que também deve ser privilegiada antes e durante os treinos intensos, especialmente para manter a osmorregulação e os eletrólitos essenciais, mas também após a carga de trabalho para repor os níveis adequados e potenciar uma recuperação mais rápida. A formação sobre este tema também deve incluir conceitos de hidratação, tipos e a periodicidade do consumo de água ou de líquidos hidratantes específicos.

Estes hábitos saudáveis, quando promovidos de forma eficaz, atenuam os eventos adversos e a fadiga excessiva, potenciando a resiliência e um melhor desempenho em períodos de maior atividade (A. J. Silva *et al.*, 2018).

.

## 7.2. Impacto do fumo na visibilidade e na saúde

São muitas as situações em que a inalação de fumo de incêndios florestais pode ter repercussões significativas na saúde humana. A duração e a intensidade da exposição, bem como as caraterísticas das substâncias inaladas, são fatores específicos determinantes da sua expressão clínica e potencial gravidade. Outra circunstância a considerar é se a exposição ocorre na população em geral (particularmente em áreas subitamente afetadas por um ou mais

incêndios) ou em ambientes ocupacionais de risco elevado, envolvendo principalmente bombeiros, proteção civil e outras equipas.

As condições meteorológicas adversas, em conjunto com a intensidade e a direção do vento, podem fazer com que uma área geográfica significativa (e, potencialmente, uma grande população) fique exposta ao fumo durante vários dias, com potenciais implicações agudas e crónicas para a saúde pública e forças envolvidas no combate. Nem todas as pessoas expostas ao fumo desenvolverão os mesmos problemas de saúde. Fatores como a intensidade e a duração da exposição, a idade, a vulnerabilidade pessoal, entre outros elementos, são cruciais para avaliar se alguém irá enfrentar problemas de saúde relacionados com a exposição ao fumo florestal (Youssouf *et al*., 2014). Pessoas com doenças crónicas, nomeadamente, mas não exclusivamente, doenças cardiovasculares (ex., insuficiência cardíaca, doença coronária) e doenças respiratórias (p. ex. asma, doença pulmonar obstrutiva crónica - DPOC, fibrose pulmonar, insuficiência respiratória crónica), podem estar em particular risco.

A presença de atmosferas com fumo apresenta riscos consideráveis de forma imediata, incluindo a diminuição da visibilidade, a sensação de pânico e a dificuldade em sair das zonas afetadas. Esta situação pode conduzir à coexistência de dois fenómenos particularmente perigosos: as queimaduras cutâneas e as lesões agudas por inalação. Estas estão associadas a um risco acrescido de acidentes de várias causas, nomeadamente acidentes rodoviários.

O fumo dos incêndios florestais é constituído por uma combinação de partículas e gases cuja composição varia em função dos materiais queimados, como árvores, arbustos, ervas e estruturas construídas. Estas incluem partículas (geralmente medidas como PM2.5 e PM10), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) e muitos outros produtos químicos.

### 7.2.1. Lesão aguda por inalação de fumo

Em diversas situações relacionadas com incêndios florestais e outros tipos de incêndios, tanto em espaço aberto como fechado, um dos quadros clínicos mais relevantes que potencialmente ocorre e que pode levar a uma morbilidade e mortalidade significativas é a síndrome de lesão aguda por inalação de fumo, que se caracteriza por uma resposta multissistémica após a exposição a uma extensa família de agentes químicos e partículas resultantes da combustão de diversos materiais (Gill *et al*., 2015; Walker *et al*., 2015; Herndon, 2018).

Esta síndrome representa um risco significativo para a saúde das populações afetadas pelos incêndios, com um impacto particular nos bombeiros e outras forças envolvidas e é também frequentemente observada em vítimas de incêndios estruturais e industriais, bem como em diversos tipos de acidentes. Dependendo dos materiais e do cenário da combustão, pode ocorrer exposição a produtos com ação asfixiante (e.g., monóxido de carbono, ácido cianídrico), irritantes (ex., ácido bromídrico, ácido clorídrico, ácido fluorídrico, dióxido de enxofre), substâncias organo-irritantes (e.g., acetaldeído, acroleína, benzeno, formaldeído), e ainda dióxido de carbono e metano, por vezes com a coexistência de baixos níveis de oxigénio (Gill *et al*., 2015; Herndon, 2018).

Existem potencialmente quatro formas de apresentação: 1) As lesões térmicas resultam normalmente da elevada temperatura do fumo e dos gases que danificam o trato respiratório superior; 2) As lesões químicas afetam frequentemente o sistema respiratório inferior devido à inalação de subprodutos nocivos e à deposição de partículas; 3) A asfixia e a toxicidade sistémica ocorrem devido à inalação de alguns gases nocivos libertados pela combustão; 4) uma

combinação destes fatores (Spinou & Koulouris, 2018; ISBI Practice Guidelines for Burn Care, 2016).

A lesão térmica causada pela exposição a temperaturas muito elevadas afeta principalmente o trato respiratório superior e pode levar a edema, com inflamação da glote e das cordas vocais e que pode ser fatal (Walker *et al*., 2015). Os produtos químicos hidrossolúveis, como o amoníaco e o dióxido de enxofre, irritam rapidamente as vias respiratórias superiores. Em contrapartida, substâncias menos hidrossolúveis, como o fosgénio e o dióxido de azoto, não causam irritação imediata, pois são inaladas mais profundamente sem desencadear tanta tosse, resultando em danos alveolares, nomeadamente edema pulmonar não cardiogénico, que pode surgir mais tarde (Stec, 2010, Demling, 2008).

Os irritantes químicos danificam o epitélio das vias aéreas e desencadeiam uma resposta inflamatória caracterizada por infiltração de neutrófilos e ativação do fibrinogénio, podendo resultar em edema e broncoespasmo. As lesões por inalação de fumo podem ser críticas e potencialmente fatais, com risco de deterioração rápida e necessidade internamento em serviços de medicina intensiva (Spinou & Koulouris, 2018).

O monóxido de carbono e o cianeto de hidrogénio são gases asfixiantes com efeitos sistémicos e dificultam a transferência de oxigénio através da membrana alvéolo-capilar dos pulmões, resultando em hipoxémia grave e potencialmente fatal. O monóxido de carbono tem uma afinidade para a hemoglobina mais de 200 vezes superior comparativamente à do oxigénio. A sua toxicidade ocorre devido a uma combinação de hipóxia e isquémia tecidulares causadas pela formação de carboxihemoglobina (COHb), associados a danos celulares diretos. A intoxicação por CO é comum, potencialmente fatal e frequentemente subdiagnosticada devido à sua apresentação clínica inespecífica. (Guzman JA, 2012). O cérebro e o coração estão entre os órgãos mais significativamente afetados (Haponik, 1990; Lafferty, 2018).

### 7.2.2. Diagnóstico e apresentação clínica

A lesão por inalação de fumos é geralmente considerada como a causa mais comum de morte em eventos de incêndio (Spinou & Koulouris, 2018). É essencial um diagnóstico rápido e preciso e uma orientação terapêutica imediata. O diagnóstico da lesão por inalação de fumo baseia-se na história clínica da vítima, nos sinais e sintomas observados, bem como em alguns procedimentos de diagnóstico, que podem incluir análises laboratoriais, radiologia torácica e broncofibroscopia (Spinou & Koulouris, 2018; ISBI Practice Guidelines for Burn Care, 2016).

Quanto à apresentação clínica, a vítima pode apresentar diferentes graus de dificuldade respiratória, potencialmente acompanhada de alterações na voz, rouquidão, estridor e pieira (Walker *et al*., 2015; Spinou & Koulouris, 2018). A tosse é uma resposta comum à inalação de substâncias irritantes. Além disso, pode haver a presença de queimaduras na face e nas mucosas, presença de pelos nasais e/ou das sobrancelhas chamuscadas, inflamação da orofaringe com a presença de partículas carbonáceas (fuligem). Pode ocorrer redução do nível de consciência ou mesmo inconsciência (Spinou & Koulouris, 2018), diminuindo a capacidade de reação das vítimas. Podem estar presentes dores de cabeça, ansiedade, agitação, convulsões, hipotensão e vertigens.

A oximetria de pulso representa um instrumento valioso para a avaliação da saturação periférica de oxigénio; no entanto, deve notar-se que, em circunstâncias em que se forma carboxihemoglobina (relacionada com a inalação de monóxido de carbono) e/ou methemoglobina (geralmente relacionada com a queima de materiais plásticos e sintéticos), a oximetria de pulso pode produzir leituras imprecisas devido ao facto de a absorção colorimétrica da carboxihemoglobina se assemelhar à da oxihemoglobina, e muitos oxímetros não conseguem

diferenciar com precisão estas duas formas. A quantificação do monóxido de carbono no sangue pode ser efetuada por alguns métodos laboratoriais específicos. No entanto, alguns aparelhos portáteis permitem a medição da sua concentração no ar expirado, o que permite, de forma indireta, uma estimativa da percentagem de carboxihemoglobina (Rehberg *et al*., 2009).

A avaliação dos gases no sangue arterial pode fornecer informações valiosas. Em laboratórios com a tecnologia adequada, a carboxihemoglobina e a methemoglobina podem ser medidas (Dries *et al*., 2013).

Determinados níveis de carboxihemoglobina no sangue correspondem a sintomatologia distinta e de gravidade progressiva (Lafferty, 2018; Rorison & McPherson, 1992):

- 0-10% - geralmente sem sintomas;
- 10-20% - cefaleia ligeira, dispneia;
- 20-30% - cefaleia latejante, diminuição da concentração;
- 30-40% - cefaleia intensa, pensamento confuso;
- 40-50% - confusão, letargia, síncope;
- 50-60% - insuficiência respiratória, convulsões;
- >70% - coma, morte.

A radiologia do tórax pode facilitar a avaliação de alguns distúrbios respiratórios importantes tais como edema pulmonar, atelectasia e pneumonias que geralmente ocorrem numa fase posterior. Contudo, é importante salientar que na fase clínica mais precoce, as radiografias torácicas após inalação aguda de fumo podem apresentar-se sem quaisquer alterações (Adams, 2013).

A broncoscopia flexível (avaliação endoscópica das vias respiratórias), embora invasiva, pode ser muito útil porque permite a avaliação da extensão da lesão por inalação com visualização direta, facilita a classificação da gravidade através do *Abbreviated Injury Score* e pode utilizar a instilação de soro fisiológico para promover aspiração de secreções, bem como para a respetiva análise microbiológica (Spinou & Koulouris, 2018) com orientação de prescrição antibiótica. Em certas apresentações clínicas com risco de vida, caracterizadas pelo potencial de progressão rápida para obstrução completa das vias aéreas, pode ser indicada a intubação traqueal precoce; estes casos podem ser prontamente avaliados com broncoscopia, a qual pode adicionalmente orientar e auxiliar uma intubação traqueal difícil. Endorf e Gamelli (2007) propuseram critérios broncoscópicos utilizados para classificar a lesão por inalação (*Abbreviated Injury Score*), que são os mais divulgados a nível global:

- Grau 0 (sem lesão): ausência de depósitos carbonáceos, eritema, edema, broncorreia ou obstrução.
- Grau 1 (lesão ligeira): áreas de eritema ligeiras ou irregulares, depósitos carbonáceos nos brônquios proximais ou distais (qualquer um ou uma combinação).
- Grau 2 (lesão moderada): grau moderado de eritema, depósitos carbonáceos, broncorreia, com ou sem comprometimento dos brônquios (qualquer um ou combinação).
- Grau 3 (lesão grave): inflamação grave com friabilidade, depósitos carbonáceos abundantes, broncorreia, obstrução brônquica (qualquer ou uma combinação).
- Grau 4 (lesão maciça): evidência de descamação da mucosa, necrose, obliteração endoluminal (qualquer uma ou uma combinação)

### 7.2.3. Tratamento

Após a rápida remoção da atmosfera perigosa, as vítimas necessitam de monitorização e avaliação contínuas, vigiando uma potencial obstrução das vias aéreas superiores, uma vez que o edema pode desenvolver-se numa fase tardia (até 36 horas). A duração da exposição, as temperaturas atingidas e o ambiente específico do incêndio, bem como a localização, os materiais envolvidos, os níveis de oxigénio e o tipo de combustão, determinam a composição dos gases inalados e a extensão potencial da lesão (Spinou & Koulouris, 2018).

O primeiro objetivo do tratamento é manter as vias aéreas, a respiração e a circulação sanguínea adequadas. A proteção das vias aéreas é de facto de extrema importância, pelo que a intubação traqueal precoce e a ventilação mecânica podem ser necessárias em casos graves (Toon *et al*., 2010; Sheridan, 2016; Herndon, 2018). É fundamental manter e proteger as trocas gasosas e os níveis adequados de oxigénio. Em ambiente hospitalar, podem inclusive ser utilizados métodos de ventilação não convencionais, como a ventilação percussiva de alta frequência, o posicionamento em decúbito ventral e a oxigenação por membrana extracorporal (ECMO). A adequada permeabilidade das vias aéreas é também muito importante para evitar a retenção de expetoração e secreções, a atelectasia pulmonar (zonas dos pulmões onde não chega o ar) e a pneumonia. As técnicas de manutenção de permeabilidade das vias aéreas, o controlo da dor, os broncodilatadores, os mucolíticos (por exemplo, N-acetilcisteína) e os antibióticos podem fazer parte do tratamento destes casos; no entanto, os antibióticos profiláticos e os corticosteróides não são normalmente indicados (Spinou & Koulouris, 2018). Em circunstâncias específicas, no caso de intoxicação por monóxido de carbono e por ácido cianídrico, pode ser utilizada a oxigenoterapia hiperbárica, nomeadamente através do recurso a câmaras hiperbáricas.

### 7.2.4. Conclusões

O fumo dos incêndios florestais pode ter repercussões significativas em múltiplos aspetos da saúde humana, tanto em contextos profissionais como não profissionais, e pode ser responsável por importantes problemas de saúde, agudos e crónicos.

A síndrome de lesão por inalação de fumo é um quadro complexo que requer uma gestão cuidadosa por parte de uma equipa multidisciplinar. As pessoas afetadas, nomeadamente as que estão diretamente envolvidas no combate aos incêndios, podem sofrer três tipos principais de lesões: queimaduras, traumatismos e inalação de fumos. No entanto, 60-80% das mortes que ocorrem devem-se especificamente aos efeitos diretos e indiretos da inalação de fumo. (Anseeuw *et al*., 2013).

O diagnóstico atempado, orientação precoce e tratamento inicial adequado são da maior importância. Algumas vítimas podem recuperar completamente das lesões causadas pela inalação de fumo sem sofrerem problemas de saúde duradouros. No entanto, esta situação e o respetivo prognóstico são influenciados por fatores como a duração, tipologia e intensidade da exposição, composição do fumo, precocidade das intervenções terapêuticas e estado de saúde prévio individual.

## 7.3. Regras de segurança

Muitas vezes, os acidentes relacionados com incêndios florestais devem-se a um conhecimento insuficiente do comportamento do fogo. Este documento pretende colmatar essa lacuna e ajudar os gestores de incêndios a compreender conceitos fundamentais que muitas

vezes se traduzem em normas ou regras básicas que devem ser uma parte consistente da formação pessoal de todos os atores envolvidos em qualquer fase da gestão do fogo. Esta secção descreverá algumas das regras e diretrizes mais utilizadas atualmente em todo o mundo

### 7.3.1. Normas de Segurança e Situações de Alerta

Os Estados Unidos foram pioneiros na ciência moderna dos incêndios florestais, da mesma forma que foram pioneiros no desenvolvimento de protocolos e procedimentos de segurança contra incêndios. Em meados do século XX, vários acidentes fatais tiraram a vida a grandes grupos de bombeiros em alguns incêndios florestais infames nos EUA. Alguns deles são ainda hoje estudados e apresentados em ações de formação: o incêndio de Blackwater, no Wyoming (1937), com 15 mortos; o incêndio de Bryant Canyon, na Califórnia (1947), com 11 mortos; o incêndio de Man Gulch, em Montana (1949), com 13 mortos; o incêndio de Rattlesnake, na Califórnia (1953), com 15 mortos ou o incêndio de Inaja, na Califórnia (1956), com 11 mortos. Esta sequência de acontecimentos, em particular o último, desencadeou uma reação do Serviço Florestal dos EUA, tendo sido criada uma *Task Force* para analisar os acontecimentos e "Recomendar ações para reduzir as hipóteses de os bombeiros morrerem queimados durante o combate a um incêndio" (USDA Forest Service, 1957). O relatório da *Task Force* deu origem às 10 "Normas de Segurança no Combate aos Incêndios" (*Standard Fire Fighting Orders*), publicadas pela primeira vez por R.E. McArdle, (1957) e às 13 (agora 18) "Situações de Alerta" (*Watch Out Situations*). Estes dois grupos de regras consistem num conjunto de lições que a *Task Force* retirou da análise do que correu mal nos acidentes fatais. O relatório afirma que o número de vítimas poderia provavelmente ser reduzido e a supressão de incêndios poderia ser melhorada se fossem utilizadas boas práticas de combate a incêndios, uma supervisão mais próxima e um melhor funcionamento organizacional em todas as situações (Zimmerman & Parkinson, 2020). A *Task Torce* também analisou os quase-acidentes que tiveram um resultado positivo e salientou a necessidade de incluir na estratégia a previsão do comportamento do fogo e as previsões meteorológicas.

As 10 "Normas de Segurança no Combate aos Incêndios" foram amplamente adotadas, não apenas nos EUA, e estão atualmente organizadas como uma sequência de passos que os bombeiros devem seguir para garantir a segurança durante as operações. Estão agrupadas em três tópicos principais - comportamento do fogo, segurança contra incêndios e organização - que têm como objetivo criar as condições necessárias para que a 10ª regra seja aplicada. As 10 normas, ou regras, estão listadas na Tabela 6.

*Tabela 6. 10 Normas de Segurança no Combate aos Incêndios (NWCG, 2022).*

| Tópico | Nº | Normas |
|---|---|---|
| Comportamento do fogo | 1 | Manter-se informado sobre as condições e previsões meteorológicas do incêndio. |
| | 2 | Saber o que o fogo está a fazer a todo o momento. |
| | 3 | Basear todas as ações no comportamento atual e esperado do incêndio. |
| Segurança nos incêndios | 4 | Identificar e dar a conhecer os caminhos de evacuação e as zonas de segurança. |
| | 5 | Colocar vigias quando houver perigo possível. |
| | 6 | Estar alerta. Manter a calma. Pensar com clareza. Atuar com determinação. |
| Controlo Organizacional | 7 | Manter comunicações rápidas com as suas forças, o seu supervisor e as forças adjacentes. |
| | 8 | Dar instruções claras e certificar-se de que são compreendidas. |
| | 9 | Manter o controlo das suas forças em todos os momentos. |
| | 10 | Combater o fogo de forma agressiva, tendo em conta, em primeiro lugar, a segurança. |

Este conjunto de ordens foi redigido de forma a ser autoexplicativo, mas podem ser encontradas informações mais pormenorizadas no sítio Web do Grupo Nacional de Coordenação dos Incêndios Florestais dos EUA (*National Wildfire Coordinating Group*) (https://www.nwcg.gov/publications/pms110, visitado em 17/11/2023).

As 18 Situações de Alerta (*Watch Out Situations*) (NWCG, 2022) foram enumeradas para descrever situações particulares que devem constituir um alerta para todos os bombeiros, caso se deparem com alguma delas durante uma operação de combate a incêndios (daí o termo "*watch out*" ou “alerta” numa tradução livre). Estas situações, listadas na Tabela 7, são uma espécie de expansão das 10 Normas de Segurança no Combate aos Incêndios.

*Tabela 7. 18 Situações de alerta (NWCG, 2022).*

| Nº | Situações de alerta |
|---|---|
| 1 | Fogo que não foi explorado e avaliado |
| 2 | Em zonas não vistas à luz do dia |
| 3 | Zonas de segurança e vias de evacuação não identificadas |
| 4 | Desconhecimento das condições meteorológicas e dos fatores locais que influenciam o comportamento do fogo |
| 5 | Desinformados sobre a estratégia, as táticas e os perigos |
| 6 | Instruções e tarefas não claras |
| 7 | Falta de comunicação com os membros da equipa/supervisor |
| 8 | Construção de uma linha de fogo sem um ponto de ancoragem seguro |
| 9 | Construir uma linha de fogo a descer com o fogo por baixo |
| 10 | Tentativa de ataque frontal ao fogo |
| 11 | Combustível não queimado entre si e o fogo |
| 12 | Não pode ver o fogo principal; não está em contacto com alguém que possa |
| 13 | Numa encosta onde o material rolante pode incendiar o combustível abaixo |
| 14 | O tempo está a ficar mais quente e seco |
| 15 | O vento aumenta e/ou muda de direção |
| 16 | Há frequentes focos secundários ao longo da linha |
| 17 | O terreno e os combustíveis tornam difícil a fuga para zonas de segurança |
| 18 | Dormir a sesta perto da linha de fogo |

À semelhança das 10 Normas de Segurança no Combate aos Incêndios, estas situações de alerta foram redigidas de forma a serem autoexplicativas e podem ser encontradas mais explicações no sítio Web do Grupo Nacional de Coordenação de Incêndios Florestais (*National Wildfire Coordinating Group)* (https://www.nwcg.gov/publications/pms118, visitado em 17/11/2023).

Uma das intenções destas duas ferramentas é serem interiorizadas por todos os indivíduos que possam trabalhar em ações de gestão de incêndios, particularmente no combate a incêndios, e "colocar ênfase na identificação de pontos de alarme que lembrem os bombeiros de reanalisar os conceitos de LCES" (Zimmerman, 2020).

### 7.3.2. LCES - LACES

O sistema LCES foi desenvolvido por Paul Gleason (1991), um experiente supervisor de equipas de "*Hotshots*" (Bombeiros profissionais) do Serviço Florestal dos EUA, no rescaldo do incêndio Dude em 1990, no Arizona. Apesar de todo o esforço colocado na adoção das 10 normas e 18 situações, bem estabelecidas na altura, este incêndio tirou a vida a 6 bombeiros. Gleason foi convidado a investigar o acidente e extrair algumas lições. No seu relatório, declarou: "Ao longo da minha carreira, lidei com a supressão de incêndios florestais, como supervisor de um grupo de "*hotshots*", tendo ocorrido apenas ferimentos ligeiros naqueles que supervisionei diretamente. Isso deve-se principalmente a duas razões: sorte (que não pode ser ignorada) e lições básicas que aprendi com os bombeiros excecionais com quem tive a oportunidade de trabalhar". Foram precisamente essas "lições básicas" que ele conseguiu incorporar no acrónimo LCES, que corresponde a *Lookouts* (Vigias), *Communications* (Comunicações), *Escape routes* (Caminhos de fuga) e *Safety zones* (Zonas de segurança). A ideia subjacente era que todas as pessoas numa frente de fogo observassem constantemente este conjunto de itens relacionados com a segurança. Todos os bombeiros devem estabelecer o LCES

antes de iniciar qualquer atividade num incêndio. O Guia de Bolso de Resposta a Incidentes do NWCG (NWCG, 2022) lista os itens que devem ser observados em cada tópico, que estão transcritos em baixo:

1) *Lookout(s)* - Vigia(s)
    a. Experiente, competente, de confiança
    b. Vigias suficientes em bons pontos de observação
    c. Conhecimento da localização dos combatentes
    d. Conhecimento dos locais de fuga e de segurança
    e. Conhecimento dos pontos de alarme
    f. Mapa, kit meteorológico, relógio, plano de ação em caso de incidente
2) *Communication(s)* - Comunicação(ões)
    a. Frequências de rádio confirmadas
    b. Procedimentos de reserva e horários de registo estabelecidos
    c. Fornecer atualizações sobre qualquer alteração da situação
    d. Fazer soar o alarme cedo, não tarde
3) *Escape Route(s)* - Caminho(s) de fuga
    a. Mais do que um caminho de fuga
    b. Evitar caminhos de fuga íngremes e a subir
    c. Assegurar que não há solo solto, rochas ou vegetação
    d. Cronometrar o tempo tendo em conta fatores como a pessoa mais lenta, a fadiga e a temperatura
    e. Marcado para dia ou noite
    f. Avaliar o tempo de fuga em função da velocidade de propagação
    g. Veículos estacionados para a fuga
4) *Safety Zone(s)* - Zona(s) de segurança
    a. Sobreviver sem um abrigo contra incêndios (*fireshelter*)
    b. Zonas queimadas na totalidade
    c. Características naturais (zonas rochosas, água, prados)
    d. Locais construídos (cortes rasos, estradas, heliportos)
    e. Avaliar corretamente a dimensão e eventuais perigos
    f. A favor do declive? A favor do vento? Combustíveis pesados? Cada um significa mais impacto térmico, o que significa uma zona de segurança maior

Com mais ou menos adaptações, o sistema LCES é atualmente o protocolo de segurança básico utilizado em todo o mundo e é visto como uma simplificação das 10 Normas de Segurança no Combate aos Incêndios nos seus elementos essenciais, mantendo o foco na segurança.

Em 2001, Thorburn & Alexander propuseram a inclusão de um "A" para Pontos de Ancoragem (*Anchor Points*), novamente na sequência de um acidente fatal, desta vez em Alberta, Canadá, em 1995. Os autores definem "ponto de ancoragem" como uma barreira à propagação do fogo, concebida para ser empregue como ponto de partida para iniciar o trabalho de supressão do fogo, de modo a minimizar a possibilidade de ser ultrapassado por um incêndio.

Este novo protocolo, LACES, foi adotado pela Agência de Proteção contra Incêndios de Alberta e por muitos outros serviços de bombeiros fora dos EUA, nomeadamente nos países mediterrânicos.

LACES tem uma implementação sequencial: os vigias (**L**ookouts) observam o fogo que está a ser combatido a partir de um ponto de ancoragem (**A**nchor point) e comunicam (**C**ommunications) todas as observações importantes às equipas que, em caso de perigo, podem utilizar os caminhos de fuga (**E**scape routes) para chegar a uma zona de segurança (**S**afety zone).

Este último ponto, a zona de segurança, é da maior importância para salvaguardar a possível retirada em caso de perigo. Em teoria, uma zona de segurança é uma área de refúgio pré-planeada que pode ser usada em caso de encurralamento sem a necessidade de utilização de abrigos contra incêndios (*fireshelter*) (Page & Butler, 2017). A escolha de uma zona de segurança nem sempre é fácil, e vários modelos (por exemplo, Butler & Cohen, 1998; Butler, 2014) e directrizes (por exemplo, Green & Schimke, 1971; Butler & Cohen, 1998b) foram produzidos para ajudar nesta tarefa. Retemos aqui uma das mais recentes sugestões de Butler (2018), em que combina o declive, a velocidade do vento e a altura do combustível, para avaliar a Distância de Separação Segura (SSD, de *Safe Separation Distance*) que deve ser observada para considerar uma área de segurança efetiva. A SSD é calculada através da Equação 2, onde Δ é o fator de inclinação-vento, de acordo com a Tabela 8.

SSD = 8 x altura do combustível x Δ Equação 2

A Figura 10 exemplifica a variação da SSD com o declive e o vento, de acordo com a formulação acima.

*Tabela 8. Fator de vento e declive (Δ) para calcular o SSD em diferentes alturas de vegetação (Butler, 2018).*

**SSD (*Safe Separation Distance*) = 8 x altura da vegetação x Δ**

| **Fator Declive-Vento (Δ)** | | | |
|---|---|---|---|
| | **Declive do terreno (%)** | | |
| **Velocidade do Vento (km/h)** | Plano (<15%) | 15-30% | >35% |
| Fraca (0-10) | **1/0.7/0.7** | **1/1/1** | **4/2/2** |
| Moderada (10-25) | **2/1/1** | **4/2/1** | **6/3/2** |
| Forte (>30) | **4/2/2** | **6/3/2** | **8/3/2** |

Combustível < 3m / 3m < Combustível > 15m / Combustível > 15m

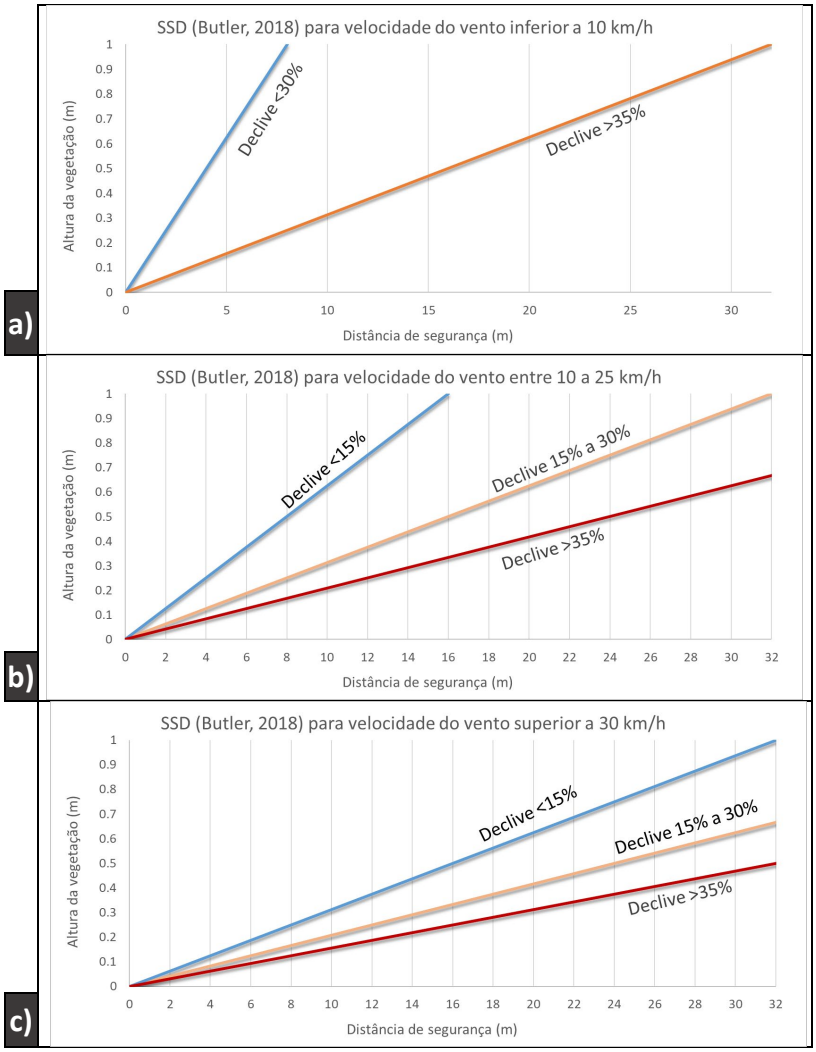



*Figura 10. SSD para a) vento fraco, b) vento moderado e c) vento forte, para as três classes de declive na formulação. (Butler, 2018).*

## 7.3.3. Recomendações adicionais para incêndios em encostas

Lahaye *et al.* (2018b) investigaram 103 casos de encurralamento em todo o mundo, a maioria dos quais no Sul da Europa (Lahaye *et al.*, 2018c) e na Austrália (Lahaye *et al.*, 2018d). Salientaram que 40% dos casos ocorreram quando as equipas encurraladas se encontravam numa encosta com inclinação superior a 20°, acima da posição da linha de fogo. O mesmo estudo constatou que 30% dos encurralamentos que estudaram ocorreram em declives propensos a propagação lateral impulsionada pela vorticidade, ou seja, declives virados para a esquerda com inclinação superior a 20° e velocidade do vento superior a 20 km/h (J. Sharples *et al.*, 2012).

Como resultado, estas duas situações críticas de alerta são agora consideradas com cuidado nas formações de analistas do comportamento do fogo ministradas em New South Wales (Austrália) e em França desde 2023.

Da mesma forma, podemos também mencionar a "Lista de controlo para a construção de linhas de fogo em declive" do NWCG dos EUA (NWCG, 2022). Combater um incêndio ou construir uma linha de fogo em declive, com o fogo abaixo, é algo a evitar a todo o custo, a menos que seja absolutamente necessário. Se for necessário, então vários passos extra devem ser

considerados. A lista de controlo refere-se ao protocolo LCES mas inclui os pontos de ancoragem em dois itens. Por esta razão, optámos por fundi-los, adaptando a lista de verificação original do NWCG (2022) para apresentar aqui:

1) Discutir as tarefas com o(s) supervisor(es) e os chefes de equipa antes de iniciar o trabalho de descida. Os responsáveis devem permanecer no local de trabalho até à sua conclusão.
2) Só começar a trabalhar depois de o local de trabalho ter sido minuciosamente explorado e a viabilidade do trabalho avaliada pelo(s) supervisor(es) ou chefes de equipa.
3) Coordenar o LACES para todo o pessoal envolvido.
   - O(s) supervisor(es) da equipa está(ão) em contacto direto com o vigia que pode ver o incêndio.
   - Estabelecer comunicação entre todas as equipas.
   - Acesso rápido à(s) zona(s) de segurança no caso de o fogo passar por baixo da(s) equipa(s).
   - O ponto de partida será ancorado para que a(s) equipa(s) construa(m) a linha de combate a partir do topo.
4) Utilizar o ataque direto sempre que possível. Se não for possível, a linha de contenção deve ser completada entre os pontos de ancoragem antes de ser fazer fogo tático.
5) A linha de combate não deve ficar dentro ou adjacente a um desfiladeiro.
6) Monitorizar a parte de baixo do incêndio; se existir potencial para o incêndio se propagar, tomar medidas para proteger os flancos.

Para finalizar esta secção, e apesar de todas as regras, listas de verificação ou ferramentas que foram aqui apresentadas, ou outras que certamente poderão existir noutros locais, destacamos aqui 3 das mais importantes "Regras de Atuação para a Sobrevivência do Bombeiro" da Associação Internacional de Chefes de Bombeiros dos EUA, Secção de Segurança, Saúde e Sobrevivência (*International Association of Fire Chiefs of the United States Safety, Health and Survival Section*) (IAFC, 2016), relacionadas com o combate a incêndios estruturais e perfeitamente aplicáveis ao combate a incêndios florestais:

(…)
3) NÃO arrisque a sua vida por vidas ou bens que não podem ser salvos.
4) ARRISCAR UM POUCO, de maneira controlada, para SALVAR Propriedade que pode ser salva.
5) ARRISCAR de maneira VIGILANTE e CONTROLADA para proteger e salvar vidas SALVÁVEIS.
(…)

Isto resume o que deve ser a prioridade no combate aos incêndios florestais: a segurança individual e coletiva.

# 8. Casos de estudo

## 8.1. Grandes incêndios

### 8.1.1. Incêndios de Pedrógão Grande

Os incêndios que começaram no início da tarde de 17 de junho de 2017, perto de Pedrógão Grande (PG), são lembrados como os mais dramáticos alguma vez registados em Portugal, não apenas por terem levado a cerca de 45 mil hectares de área ardida, envolvendo vegetação e território edificado, mas sobretudo por terem causado a morte de 66 pessoas. A descrição seguinte baseia-se em Viegas *et al.* (2017) e Viegas *et al.* (2023).

O complexo de incêndios teve duas ignições principais – Escalos Fundeiros e Regadas –, ambas iniciadas sob uma linha elétrica de 15 kV, em dois locais separados por aproximadamente 3 km (Figura 11). A interação entre um episódio de trovoada e os dois focos de incêndio foi amplamente analisada em Pinto *et al.* (2022) usando dados de estações meteorológicas, assim como observações de satélite e de radar. Como resultado dessa interação, os dois focos de incêndio começaram a desenvolver-se ficando fora de controlo. As condições raras que resultaram dessa interação levaram à junção dos dois incêndios ao final da tarde daquele dia, tal como será descrito de seguida. Este processo em que duas frentes de fogo se juntam é designado por "frentes convergentes" (Viegas *et al.*, 2012; Raposo *et al.*, 2018) e é acompanhado por processos convectivos intensos, que resultam na propagação muito rápida do fogo, que neste caso causou a morte de 66 pessoas num período de menos de duas horas. A propagação do incêndio foi acompanhada pelo desenvolvimento de uma coluna de fumo muito alta e por processos convectivos violentos, que foram reportados em Viegas *et al.* (2017), mostrando a relevância dos processos associados à convergência das duas frentes no desenvolvimento do incêndio de PG – seguramente que o desenvolvimento do incêndio teria sido bastante diferente se apenas uma das ignições tivesse ocorrido.

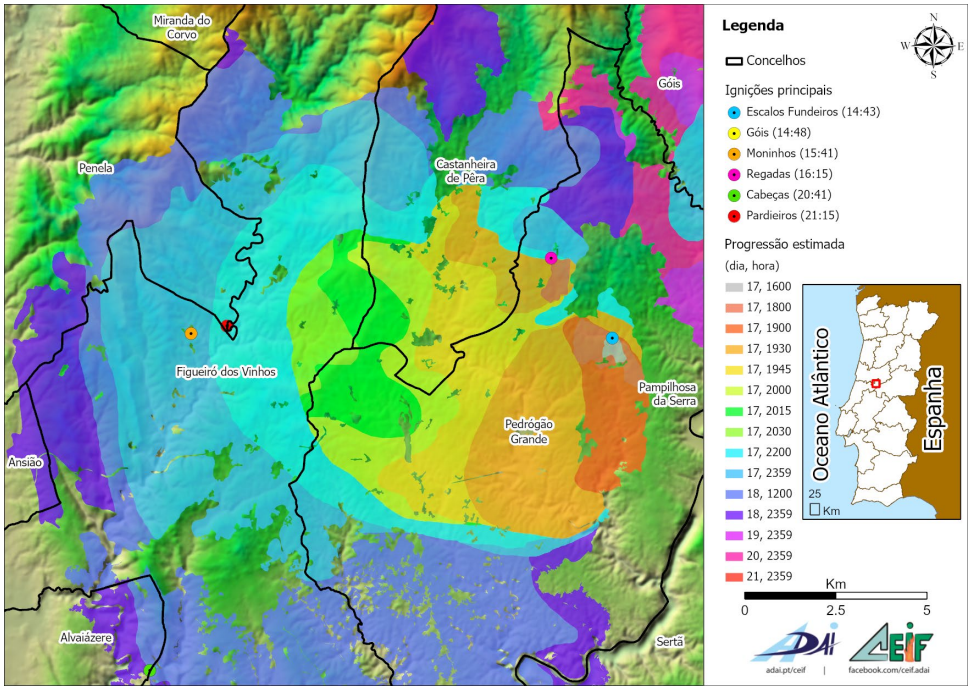



*Figura 11. Mapa de Portugal e da área do incêndio Pedrógão Grande, com destaque para os principais locais de ignição e o desenvolvimento do fogo nos dois focos de incêndio. Os focos de incêndios de Escalos Fundeiros e de*

*Regadas foram aqueles que deram origem ao episódio de frentes convergentes descrito anteriormente. (ilustração dos autores)*

*(a)* *(b)*



*Figura 12. Vistas das colunas de fumo dos focos de incêndios de Escalos Fundeiros e de Regadas às 18:00 (a) e 18:15 (b), mostrando a interação com o downburst. (imagens gentilmente cedidas pela Escola Tecnológica e Profissional da Zona do Pinhal)*

*Ignição e propagação do fogo*

O incêndio de Pedrógão Grande ocorreu no distrito de Leiria, no centro de Portugal (Figura 11), durante um período de seca, com temperaturas do ar acima de 40°C e humidade relativa muito baixa. O vento na região soprava de noroeste (NW) e não era muito forte. Um grande sistema convectivo de mesoescala desenvolveu-se sobre a Península Ibérica centro-ocidental e moveu-se para oeste-noroeste (W-NW), causando vários incêndios devido a relâmpagos. No entanto, pelas 14:30 (todas as horas indicadas são horas locais – UTC+1), quando o incêndio de Escalos Fundeiros teve início, a parte mais ativa deste sistema ainda estava a cerca de 100 km de distância, e não foram registadas descargas elétricas na área do incêndio até às 18:00 (Pinto *et al.*, 2022).

O incêndio de Pedrógão Grande foi causado por duas ignições principais que ocorreram perto de Escalos Fundeiros (EF), pelas 14:30, e perto de Regadas (RE), pelas 15:40. Ambas as ignições terão sido causadas por uma linha elétrica tocada pela folhagem de árvores que estavam muito próximas das linhas. Os dois locais estão separados por 3,2 km, mas a estrada de EF para RE era de difícil acesso para veículos pesados. Como havia outras ignições na área, os recursos de combate a incêndios estavam dispersos e não havia meios terrestres e aéreos suficientes para lidar com a situação vivida no incêndio de EF, que às 15:30 começou a originar vários focos secundários e a ameaçar várias casas na aldeia de EF. Quando o incêndio de RE foi detetado, não foram disponibilizados recursos de combate suficientes para pôr cobro a esta nova ignição, e o fogo desenvolveu-se quase por conta própria.

Entre as 18:00 e as 18:15, uma corrente descendente do sistema convectivo de mesoescala, que ainda não estava sobre a região do incêndio, forçou a coluna de fogo a inclinar-se em direção ao sudoeste (SW), espalhando chamas por uma ampla área e tornando o controle do incêndio praticamente impossível a partir desse momento. Este processo foi registado continuamente por câmaras de vídeo instaladas na Estação dos Bombeiros de Pedrógão Grande. Duas imagens gravadas às 18:00 e 18:15 pela câmara voltada para o norte são apresentadas na Figura 11. O processo dessa corrente descendente foi cuidadosamente estudado, usando vários métodos,

nomeadamente radar e sensores terrestres, para analisar o fluxo muito complexo produzido pela trovoada e pelo fogo em Pinto *et al.* (2022).

O incêndio de EF começou a propagar-se em direção à vila de Pedrógão Grande, varrendo um grande número de aldeias. Ao mesmo tempo, o incêndio de RE, que era de menor dimensão, também se desenvolveu completamente fora de controlo, em direção ao noroeste (NW), formando o lado direito de uma grande pinça que agora avançava como uma frente curva de fogo com mais de 20 km de comprimento, ameaçando uma área aproximadamente circular de 10 km de diâmetro onde viviam centenas de pessoas, que sentiram as suas vidas ameaçadas por este incêndio de intensidade excecional.

*A convergência das frentes*

Há evidências de que, depois das 19:30, ambos os fogos tinham os seus flancos interiores muito próximos um do outro, formando um pequeno ângulo entre eles, portanto, com as condições ideais para interagirem como num episódio de frentes convergentes, estudado por Viegas *et al.* (2012), Raposo *et al.* (2018) e Ribeiro *et al.* (2023). Entre as 19:30 e as 20:30, o processo de fusão induziu ventos muito fortes na área a jusante do fogo. A velocidade de propagação da "cabeça do fogo" seria da ordem de 14 km/h. A queima rápida de uma grande quantidade de combustíveis produziu uma coluna de convecção que atingiu uma altura de cerca de 12 km, por volta das 20:10, permanecendo a essa altura por várias horas. Foram registadas chamas que se distanciavam 50-100 m da vegetação que sustentava a queima, criando um ambiente perto do solo como o interior de uma fornalha. Existem relatos de árvores que começavam a arder do topo para a base; algumas pessoas que estavam naquela área disseram que estavam numa escuridão absoluta e relataram que o "ar estava cheio de bolas de fogo". Além disso, pedaços de madeira, ramos e cascas voavam por toda a parte, normalmente dando origem a novos focos de incêndio. Em pelo menos duas áreas, turbilhões de vento torceram e quebraram muitas árvores com troncos acima de 20 cm de diâmetro. Estima-se que a velocidade do vento necessária para causar aquele efeito seja da ordem de 200 km/h. Fenómenos semelhantes foram observados no episódio de convergência de frentes registados nos incêndios McIntyre e Bendora, perto de Canberra (Austrália), a 18 de janeiro de 2003, com um fogo de propagação muito rápida (27 km/h) e um turbilhão que partiu troncos de árvores com mais de 30 cm de diâmetro (Doogen, 2006).

A perceção da violência do incêndio, causada pelo ruído produzido pelas suas chamas, que pareciam rugir e que ameaçavam destruir tudo no seu caminho, levou muitos cidadãos a decidirem fugir das suas casas. Alguns tomaram esta decisão apesar de saberem que as suas casas geralmente suportariam a passagem de um incêndio, o que realmente veio a acontecer. Ao fugirem nos seus carros, muitas pessoas, por vezes famílias inteiras, foram apanhadas pelo fumo e pelas chamas, perdendo as suas vidas. Particularmente dramática foi a situação de um troço de 200 m da Estrada N326-1, entre Figueiró dos Vinhos e Castanheira de Pêra, no qual 30 pessoas perderam a vida, dentro ou perto dos seus carros. A insuficiente manutenção da vegetação nas proximidades das principais estradas contribuiu para a falta de condições de sobrevivência. Realça-se a existência de um pinheiro em particular que estava muito próximo da borda da estrada e caiu sobre a estrada devido ao vento muito forte induzido pelo fogo, atravessando-a de um lado para o outro. Esta árvore causou um grande tumulto na estrada levando a que vários carros colidissem, impedindo a progressão de outras viaturas, e criando uma armadilha mortal da qual vários carros não conseguiram sair. Com base no testemunho de sobreviventes e de pessoas que passaram por aquela estrada antes ou durante o acidente, foi possível identificar pelo menos 16 pessoas cujas mortes podem ser diretamente atribuídas à queda desta árvore.

O incêndio principal foi controlado no dia 22 de junho, pelas 23:50, com o esforço de mais de 1400 operacionais, depois de consumir uma vasta área e de deixar um rasto trágico sem precedentes em Portugal.

### 8.1.2. Incêndio do Garrocho (Serra da Estrela)

O incêndio Garrocho (Serra da Estrela), ocorrido em Portugal, é notável pelas lições operacionais que oferece. Este incêndio florestal destaca-se pelo seu tamanho, cobrindo uma área de aproximadamente 25 mil hectares, assim como pela sua duração, permanecendo ativo durante 12 dias, de 6 de agosto de 2023 a 17 de agosto de 2023, tendo sido extinto apenas a 3 de setembro de 2023. Felizmente, não houve vítimas a lamentar, e os principais impactos incluíram danos em vários edifícios e a afetação de uma grande área natural protegida.

O alerta de incêndio foi dado às 01:18 do dia 6 de agosto de 2023, sendo que, desde a fase inicial, os meios de combate ao fogo enfrentaram grandes dificuldades de combate devido ao acesso limitado aos locais onde a atuação seria mais eficaz, o que foi especialmente agravado por ser período noturno. Apesar de aparentemente estar quase contido em várias ocasiões, vários incidentes perturbaram a estratégia implementada. Dois desses incidentes serão descritos de seguida, assim como algumas das principais lições que deles podem ser extraídas.

*Fogo eruptivo num desfiladeiro após a intervenção de um helicóptero de combate ao fogo*

Por volta das 10:23 do primeiro dia de incêndio, um helicóptero de combate ao fogo entrou no teatro de operações, largando a sua equipa de quatro membros. Apoiada por descargas aéreas de água, esta equipa iniciou o combate apeado ao fogo, descendo a encosta, com a intenção de fechar esse flanco na base do desfiladeiro (Figura 13).

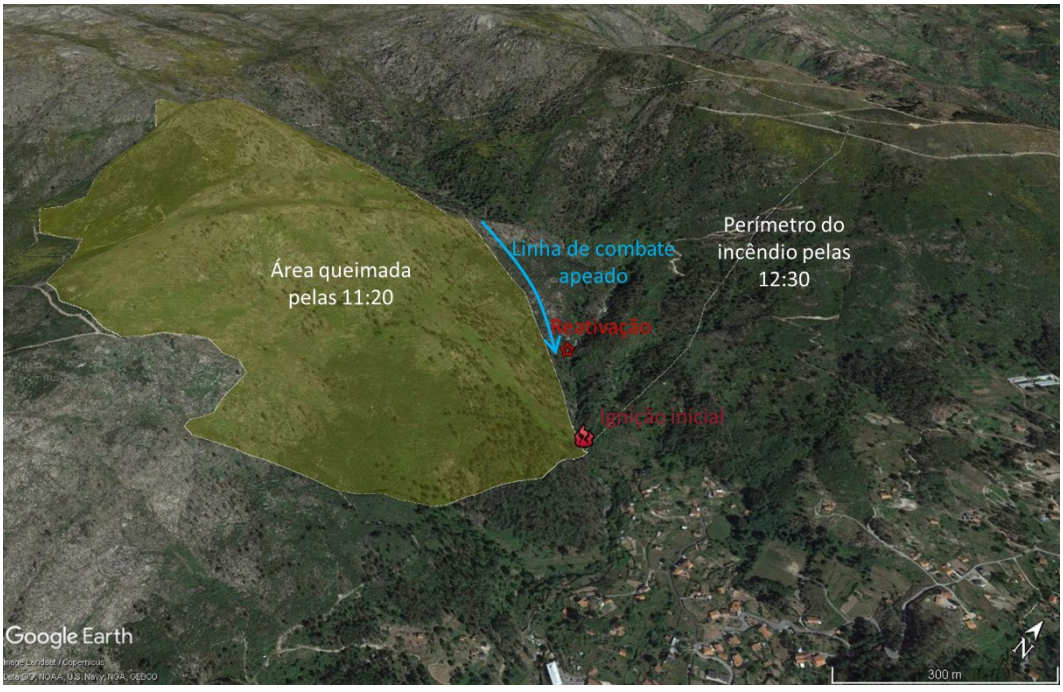



*Figura 13. Situação operacional pelas 11:30 de 6 de agosto de 2023. (ilustração dos autores)*

O reservatório de abastecimento de água do helicóptero estava a apenas 5 km do local de descarga, mas estava cerca de 600 m mais alto em altitude, reduzindo significativamente a

autonomia e o tempo de operação do helicóptero. Após cerca de uma hora, a equipa de combate terrestre, apoiada pelo helicóptero, quase alcançou a base do flanco. O resto do perímetro do fogo estava perto de ser resolvido, restando apenas uma pequena seção junto à base do desfiladeiro. No entanto, o helicóptero precisava de reabastecer de combustível, antes de a missão ter sido completada.

Seguindo o protocolo operacional, o helicóptero teve de recolher a sua equipa antes de deixar o teatro de operações para reabastecer. A recolha da equipa foi feita perto da linha de água na base do desfiladeiro, onde a equipa terrestre estava, evitando que tivessem de subir a encosta. Testemunhos indicaram que a turbulência causada pelo helicóptero ao recolher a sua equipa reativou o fogo nesta área, arrastando a frente de chamas para a encosta oposta do desfiladeiro. Quando isto aconteceu, verificou-se um episódio de comportamento eruptivo do fogo (Figura 13), levando à perda de controle sobre a situação que estava quase contida.

Este incidente ensinou duas lições principais. A primeira relaciona-se com a determinação da autonomia dos meios aéreos, que deve considerar não apenas a distância entre os pontos de abastecimento de água e a zona de intervenção do fogo, mas também a diferença de altitude entre esses locais. A segunda lição enfatiza a cautela que os operadores de meios aéreos devem ter nas suas operações, de forma evitar a turbulência atmosférica naturalmente gerada pela aeronave, especialmente helicópteros, sobretudo perto da frente do fogo ou de pontos sensíveis/críticos.

*Reativação no Vale da Amoreira*

Entre 12 de agosto e 14 de agosto, com um perímetro de fogo muito extenso que rodeava uma área ardida de aproximadamente 9 mil hectares, o fogo progredia lentamente, estando quase sob controle. Pelas 18:16 de 14 de agosto a situação reportada era: “todas as frentes e setores em operações de consolidação e vigilância”. Havia, no entanto, um ponto quente a nordeste, onde o combate ao fogo progredia favoravelmente. A 15 de agosto, às 15:44, o fogo foi classificado como "em resolução."

A aldeia de Vale da Amoreira era considerada uma área crítica devido a várias reativações registados nesta área e ao potencial de abertura que uma eventual nova frente de fogo poderia suscitar. Na encosta noroeste desta aldeia, onde veio a ocorrer uma reativação que será descrita de seguida, tinha chegado alguns dias antes uma frente de chamas que foi travada a meio da encosta, deixando a sua parte inferior por arder. Para consolidar o perímetro do incêndio nesta zona, foi aberta uma faixa de contenção a meio da encosta usando máquinas de rastos. Destaca-se ainda que no Vale da Amoreira tinha sido criado uma área de concentração de meios, havendo, portanto, uma grande quantidade de meios nesta área.

Às 15:47 do dia 15 de agosto, apenas três minutos após o incêndio ter entrado em “fase de resolução”, deu-se uma forte reativação perto do Vale da Amoreira (Figura 14), a qual abriu rapidamente três novas frentes de chamas que progrediram em direções divergentes, principalmente devido aos ventos locais concorrentes causados pela topografia acidentada daquela área. Segundo o testemunho de um cidadão que observou o desenvolvimento deste episódio da encosta oposta, a reativação ocorreu numa área com uma acumulação significativa de vegetação seca. De acordo com o mesmo testemunho, em resposta a esta reativação, um helicóptero pairou perto desse local, resultando no alargamento repentino da frente de chamas e no surgimento de várias fagulhas que foram projetadas encosta abaixo, para lá da faixa de contenção anteriormente aberta pelas máquinas de rastos, sendo esta uma área que ainda não tinha ardido. Não se obtiveram detalhes para analisar a manobra do helicóptero, mas vários cidadãos do Vale da Amoreira corroboraram este testemunho. A partir deste momento, até 17 de agosto, a situação voltou a fugir ao controlo, fazendo o fogo propagar-se com grande

intensidade para leste, acrescentando mais cerca de 6 mil hectares à área previamente queimada.

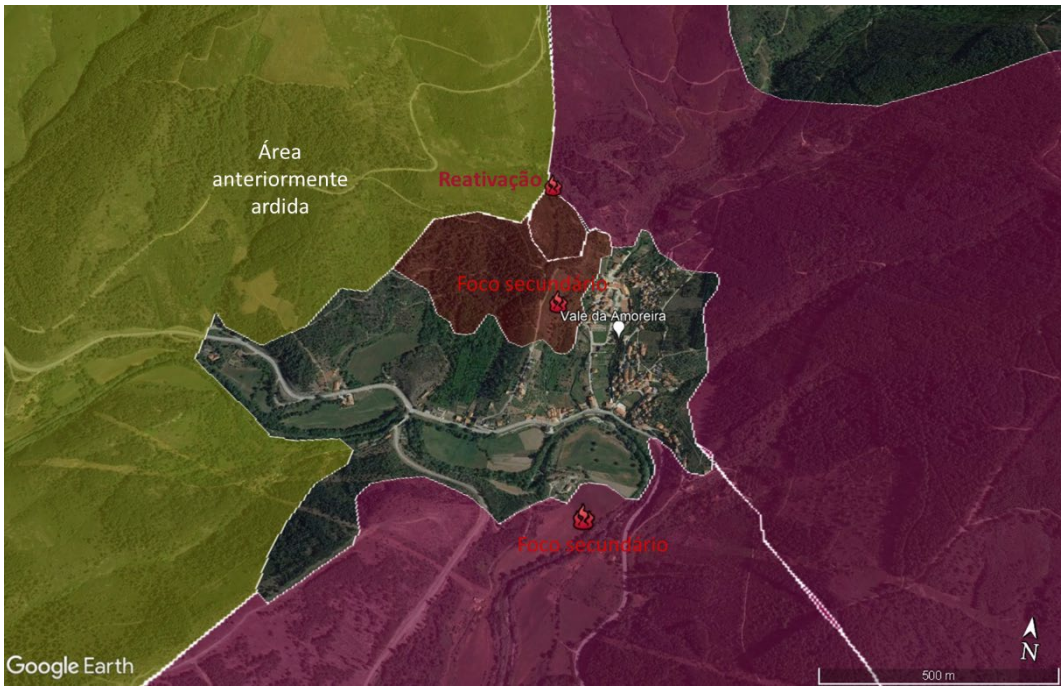



*Figura 14. Detalhe da situação operacional perto do Vale da Amoreira, a 15 de agosto de 2023. (ilustração dos autores)*

Várias lições podem ser extraídas deste episódio. A primeira reforça as lições do incidente anterior, servindo como um aviso sobre o perigo representado pela turbulência induzida pela atuação das aeronaves. A segunda lição diz respeito à atitude dos meios operacionais, que estavam muito próximos do local da reativação que, poderão ter relaxado devido à evolução favorável do combate ao fogo e à sua entrada na fase de resolução. Finalmente, as operações de consolidação a meio da encosta devem ser evitadas, uma vez que os materiais incandescentes, empurrados pelo vento, podem rolar encosta abaixo, causando novas ignições na área não queimada. Neste caso, teria sido recomendada uma ação de fogo tático para levar a área queimada até à base da encosta ou, em alternativa, uma vigilância contínua e eficaz dessa encosta para assegurar uma intervenção imediata em caso de necessidade, o que não aconteceu.

## 8.2. Acidentes

### 8.2.1 - Acidente de Freixo de Espada-à-Cinta

Durante o verão de 2003, entre os vários acidentes mortais ocorridos em Portugal, destaca-se o ocorrido em Freixo de Espada-à-Cinta, no dia 5 de agosto (cf. Viegas, 2004a), em que duas pessoas perderam a vida devido a um incêndio eruptivo na ampla encosta em que o fogo se desenvolveu, na margem do rio Douro, no nordeste de Portugal, junto à fronteira entre Portugal e Espanha (Figura 15). A área de interesse para o presente estudo estava coberta por vegetação de superfície que era uma mistura de vegetação do tipo herbáceo com arbustos e alguns campos agrícolas. A origem do incêndio que ocorreu às 14:30 h, está assinalada no mapa como ponto A. Os bombeiros tentaram manter o fogo na parte inferior da encosta e deixaram-no arder na direção da margem do rio. Ao chegar ao ponto B, o incêndio estava praticamente controlado,

faltando apenas extinguir uma pequena secção de menos de 50m de linha de fogo. Nesta altura, o chefe dos bombeiros, que se encontrava no ponto C com uma máquina que estava a criar um corta-fogo, informou os seus superiores que o incêndio estava controlado. De repente, o fogo começou a propagar-se muito rapidamente pela encosta de um desfiladeiro acima do ponto B (cf. Figura 15) e iniciou o comportamento eruptivo ao longo de toda a encosta, atingindo o seu topo em alguns minutos.

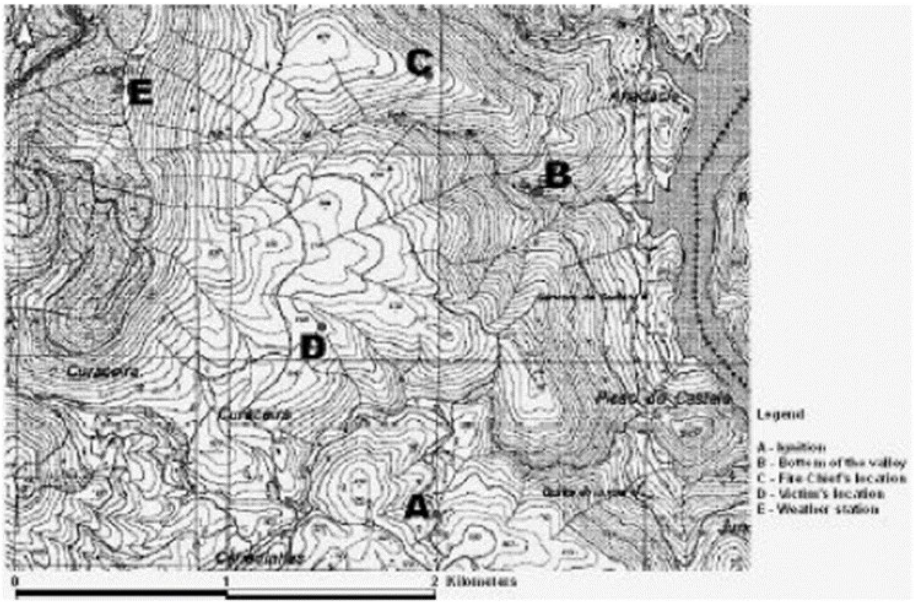



*Figura 15. Mapa topográfico da área do incêndio de Freixo. O Norte é indicado pela seta branca no canto superior esquerdo da figura.*

Um casal que estava a verificar a segurança da sua propriedade situada em D, bastante longe do incêndio e, em princípio, não ameaçada por este, foi apanhado pela erupção e ambos morreram. Mais detalhes sobre este acidente podem ser encontrados na literatura (Viegas, 2004a). No topo da encosta, no ponto E, uma estação meteorológica encontrava-se no caminho da frente de fogo. Devido a um corta-fogo que existia no cume, os seus sensores não foram destruídos - apesar de o calor ter danificado as suas proteções - e os dados registados de 10 em 10 minutos foram recuperados.

Gráficos da temperatura do ar, da humidade relativa, da pressão atmosférica, da direção e da velocidade do vento no dia 5 de agosto são apresentados da Figura 16 à Figura 18. Como se pode ver nessas figuras, por volta das 18:30 h, todos os registos mostram um comportamento muito anormal: a temperatura (médias de 10 minutos) subiu para 55,5ºC, a humidade relativa desceu para 8%, a velocidade média do vento subiu para 63,8km/h e a máxima (em períodos de 10 minutos) atingiu 96km/h.

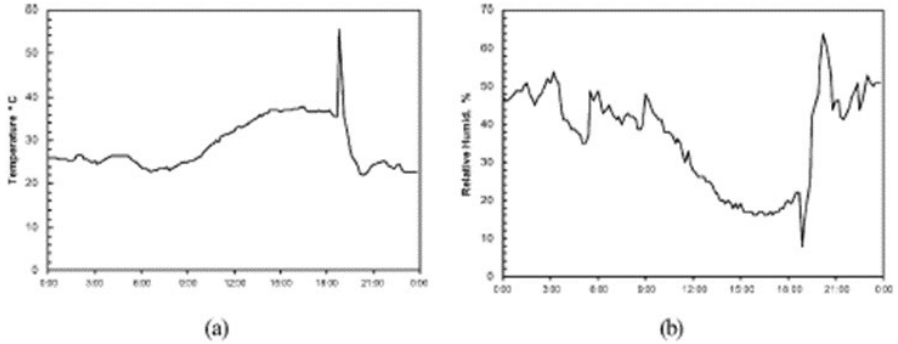


*Figura 16. (a) Temperatura do ar e (b) humidade relativa em Freixo em 5 de agosto de 2003.*

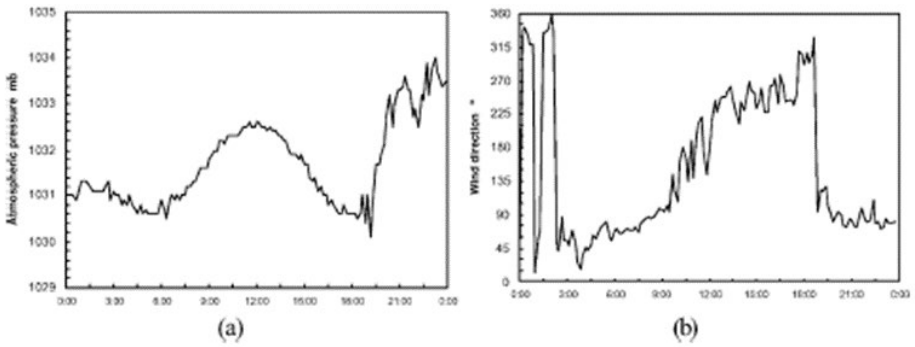



*Figura 17. (a) Pressão atmosférica e (b) direção do vento em 5 de agosto de 2003.*

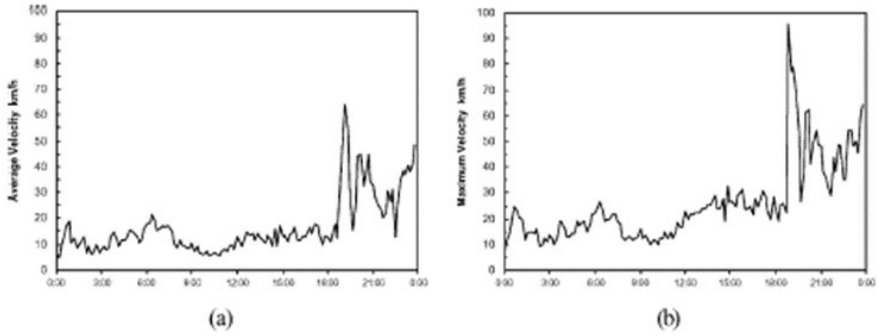



*Figura 18. (a) Média a cada 10 min da velocidade do vento e (b) máxima velocidade do vento em 5 de agosto de 2003.*

Um aspeto particularmente digno de nota nestes registos é a mudança brusca de direção do vento que ocorreu às 18:40 h, como se pode ver na Figura 17b. O vento que soprava de noroeste (327º) em direção descendente com uma velocidade média dos 12,2km/h, virou subitamente para su-sudoeste (95 a 120º), que é aproximadamente a direção ascendente a partir do fundo do vale do rio, e aumentou para cerca de 64 km/h 30 min depois, com rajadas de 96km/h.

Este registo é a prova inequívoca de que a erupção que ocorreu naquele incêndio produziu velocidades de vento da ordem dos 100km/h que não podem ser explicadas por qualquer outro fenómeno atmosférico que não seja a interação entre o incêndio e o fluxo global induzido pelo declive. Embora não haja registo de imagens do acidente, as descrições dadas por todas as pessoas entrevistadas são consistentes com uma aceleração súbita do fogo desde o fundo do desfiladeiro até ao topo e para além dele. A já mencionada perda de duas vidas é também um triste testemunho deste surpreendente comportamento do fogo.

O modelo matemático proposto por Viegas (2005) foi utilizado para prever a evolução temporal do incêndio e a velocidade do vento induzida durante a erupção, tendo-se obtido valores da ordem dos 113km/h muito concordantes com as observações.

É de salientar que este é um dos poucos exemplos de casos reais de acidentes associados a um desfiladeiro em que existem registos meteorológicos detalhados muito próximos do incêndio e que documentam e confirmam as hipóteses que são feitas no desenvolvimento do modelo para prever o comportamento de um incêndio em desfiladeiros.

## 8.2.2 - Acidente de Famalicão da Serra (Portugal) 2006

[relato baseado em Viegas *et al.* (2009)]

*Introdução*

Neste acidente, seis bombeiros perderam a vida quando tentavam apagar um incêndio de grandes dimensões nos arredores da pequena aldeia de Famalicão da Serra, no distrito da Guarda, no Centro de Portugal, ao início da tarde de 9 de julho de 2006. Cinco das vítimas eram cidadãos chilenos que trabalhavam em Portugal como bombeiros profissionais para a Afocelca, uma empresa privada especialmente dedicada à proteção de plantações de árvores pertencentes a um grupo de empresas portuguesas de produção de celulose. A sexta vítima era um bombeiro voluntário português da corporação local de bombeiros de Gonçalo que trabalhava com esta equipa.

Este acidente teve um enorme impacto, não só devido ao número de vítimas e às circunstâncias do acidente, mas também porque toda uma equipa de bombeiros profissionais estrangeiros pereceu devido ao incêndio.

*Condições ambientais*

O incêndio desenvolveu-se numa encosta da Serra da Estrela, sobre um vale onde se situa a pequena aldeia de Famalicão. A parte inicial da encosta estava coberta por terrenos agrícolas com alguma vegetação herbácea e outros combustíveis finos; a parte superior estava coberta por um pinhal maduro, limpo e protegido por um amplo corta-fogo.

As condições meteorológicas do incêndio eram extremas nesse dia, com temperaturas de 35ºC e humidade relativa de 15% com vento fraco de Este-Sudeste, como se pode verificar nos dados da estação meteorológica da Meimoa.



*Figura 19. Vista geral da área do incêndio de Famalicão. A origem do incêndio foi próximo à parte inferior no centro da figura. O acidente ocorreu no desfiladeiro centro da figura. O triângulo da figura assinala a área inicialmente afetada pelo incêndio.*

*Origem do incêndio e o ataque inicial*

O incêndio teve início acidentalmente às 12:30 numa exploração agrícola devido às faíscas libertadas pelas lâminas de uma máquina de cortar ervas quando estas tocaram em algumas pedras. Apesar de duas pessoas que se encontravam na zona terem tentado extinguir o fogo

inicial com um extintor de carro, os seus esforços foram infrutíferos, tendo o fogo alastrado rapidamente pela quinta e entrado na encosta.

Uma viatura ligeira da secção local dos Bombeiros Voluntários de Gonçalo foi imediatamente enviada e chegou a um caminho rural acima do local de origem do incêndio. A extensão do fogo ultrapassou a sua capacidade e atravessou essa estrada. Ajudado pelo declive e pelo vento o fogo propagou-se em direção ao topo da serra. Este grupo deixou o local e dirigiu-se para o topo onde outro grupo de bombeiros e vários outros proprietários florestais e civis já estavam a trabalhar para tentar proteger o pinhal. O alarme foi dado e, entre outros meios, foram enviadas duas brigadas de helitransportadas para o incêndio. Uma delas era da Proteção Civil Nacional e aterrou junto à base do incêndio, no seu flanco direito. Devido ao relevo acidentado do terreno nessa zona e à grande quantidade de combustível, a supressão desse flanco não foi conseguida na totalidade. Com a chegada de mais carros de bombeiros, esta equipa abandonou a zona praticamente na altura do acidente.

A outra brigada helitransportada era a da Afocelca, e era composta por cinco bombeiros chilenos. Aterraram numa estrada perto do topo da encosta, na fronteira do pinhal que tinham de proteger. O fogo já tinha entrado no pinhal como um fogo de flanco contra o vento e tinha queimado o triângulo assinalado na Figura 19.

A equipa começou a trabalhar com ferramentas manuais numa linha que descia da estrada ao longo da fileira de pinheiros queimados e à sua esquerda. O seu Comandante ordenou a um bombeiro da Brigada local de Gonçalo que ajudasse a equipa de bombeiros chilenos a suprimir o fogo. A sua posição parecia ser segura e o grupo avançava rapidamente encosta abaixo, extinguindo as chamas relativamente curtas produzidas pela folhada de pinheiros que se espalhavam contra o vento.

*Cercados pelo fogo*

Passados alguns minutos, por volta das 13:30, houve uma sequência súbita de erupções de fogo abaixo da posição do grupo e o fogo começou a queimar as copas, formando três faixas que podem ser vistas na Figura 19. Houve um alarme geral. Os que estavam colocados em cima, perto da estrada, fugiram pelo topo da crista para o lado direito. Houve focos secundários e algumas pessoas sofreram queimaduras ligeiras durante a fuga.

O grupo de seis bombeiros que se encontrava a meio da encosta decidiu fugir do fogo de copa para o lado esquerdo do fogo principal. Seguiram pela estrada em direção ao centro do grande desfiladeiro onde se encontravam.

Sem que eles soubessem, a parte inferior do incêndio não estava a ser suprimida no terreno devido à dificuldade de acesso. Apenas um helicóptero estava a lançar água no flanco esquerdo do incêndio, perto do fundo, sem apoio do solo.

Enquanto o grupo estava a fugir do fogo principal, o flanco esquerdo entrou na linha de água e na encosta do lado direito do desfiladeiro. Em poucos minutos, a erupção do fogo ocorreu ao longo dessa encosta, cortando a rota de fuga do grupo. Quando a estrada chega à linha de água, há uma área aberta sem vegetação. Aí o grupo dividiu-se em dois. O bombeiro português decidiu ficar na mesma zona e abrigou-se numa trincheira à beira do corta-fogo.

Os cinco chilenos largaram o material que ainda traziam consigo e, seguindo a ordem do chefe, partiram encosta acima tentando fugir às duas paredes de fogo que se aproximavam. O terreno nessa direção é bastante acidentado, com socalcos e barreiras com quatro a cinco metros de altura. Um dos bombeiros conseguiu escalar e alcançar uma distância de 60 metros do ponto de partida.

A forte convecção induzida pelo fogo em erupção na vertente esquerda obrigou o fogo no pinhal a convergir sobre o grupo completamente dominado pelo fumo e pelo fogo. O corpo do

bombeiro português não foi encontrado queimado devido ao efeito de proteção da vala de pedra onde se refugiou. Os cinco bombeiros chilenos também morreram no meio do pinhal. Alguns deles tinham tentado utilizar um aparelho de respiração, mas sem sucesso.

*Simulação do episódio de incêndio*

Havia uma convicção generalizada de que a causa do aprisionamento tinha sido uma mudança súbita da direção do vento. Não havia evidência disso nos registos de vento.

Foi efetuada uma simulação de incêndio do desfiladeiro de Famalicão na mesa de testes de desfiladeiros DE4 do Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF) da Universidade de Coimbra na Lousã. A geometria básica do desfiladeiro foi reproduzida, e a palha foi usada como leito de combustível. Uma linha de fogo foi acesa para simular a posição do flanco esquerdo do fogo principal quando a brigada chilena avançou. O fogo propagou-se lentamente alargando os seus flancos até atingir a linha de água. Quando isso aconteceu, entrou em erupção e queimou o lado esquerdo do desfiladeiro em poucos segundos.

Esta simulação mostrou que a convecção induzida pelo fogo tinha produzido a mudança súbita de comportamento que foi interpretada como sendo causada por uma mudança de vento. A sequência de imagens dos testes mostra a aceleração dramática do fogo quando entra na encosta esquerda do desfiladeiro e não se registaram efeitos de vento no interior do Laboratório durante a experiência.

*Conclusões*

O presente estudo de caso envolveu a perda de seis bombeiros que foram apanhados por um incêndio eruptivo num desfiladeiro. O que era aparentemente uma situação segura e quase uma rotina de supressão de incêndios tornou-se numa armadilha mortal. É possível que a utilização de abrigos contra incêndios tenha salvo a vida destes homens, mas isso não é garantido.

A simulação do acidente no Laboratório de Incêndio produziu resultados convincentes do comportamento do fogo durante a erupção no desfiladeiro. Mostrou que não era necessário qualquer desvio do vento para explicar a aceleração súbita do fogo no lado esquerdo do desfiladeiro que apanhou o grupo de seis bombeiros de surpresa.

## Referências bibliográficas


Abouali, A., Viegas, D. X., Raposo, J. R. (2021). Analysis of the wind flow and fire spread dynamics over a sloped–ridgeline hill. *Combustion and Flame*, *234*, 111724. https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2021.111724

Albini, F. A. (1976). *Estimating wildfire behavior and effects*. USDA Forest Service. General Technical Report GTR INT-30.

Alexander, M. E., Cruz, M. G. (2020). Fireline Intensity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 453–460). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_52

Alves, C., Vicente, A., Nunes, T., Gonçalves, C., Fernandes, A. P., Mirante, F., Tarelho, L., Sánchez de la Campa, A. M., Querol, X., Caseiro, A., Monteiro, C., Evtyugina, M., Pio, C. (2011). Summer 2009 wildfires in Portugal: Emission of trace gases and aerosol composition. Atmospheric Environment 45, 641–649. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.10.031.

Alves, D., et. al. (2018). Calibration of the Canadian FWI system for the territory of Europe. *Advances in Forest Fire Research 2018*, 33–43. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_3

Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. In *USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122*. lntermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, Utah 84401

Andrews, P. L. (2014). Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, *23*(1), 21. https://doi.org/10.1071/WF12167

Anseeuw, K., Delvau, N., Burillo-Putze, G., De Iaco, F., Geldner, G., Holmström, P., Lambert, Y., Sabbe, M. (2013). Cyanide poisoning by fire smoke inhalation: a European expert consensus. Eur J Emerg Med. 2013 Feb;20(1):2-9

Aragoneses, E., García, M., Salis, M., Ribeiro, L. M., Chuvieco, E. (2023). Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification system. *Earth System Science Data*, *15*(3), 1287–1315. https://doi.org/10.5194/ESSD-15-1287-2023

Barros, B., Oliveira, M., & Morais, S. (2021). Firefighters' occupational exposure: Contribution from biomarkers of effect to assess health risks. In *Environment International* (Vol. 156). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106704

Bradshaw, L. S., Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1984). The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. In *General Technical Report INT-169. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 44 p.* (Vol. 169). https://doi.org/10.2737/INT-GTR-169

Butler, B. W. (2014). A study of the impact of slope and wind on firefighter safety zone effectiveness. *Final Report for JFSP Project 07-2-1-10*, 21

Butler, B. W. (2018). A review of current status of efforts to reduce firefighter entrapments in the US. *In V Short Course on Fire Safety: Fire Safety at the WUI, Held at the VIII International Conference on Forest Fire Research*

Butler, B. W., Cohen, J. D. (1998a). Firefighter safety zones: A theoretical model based on radiative heating. *International Journal of Wildland Fire*, *8*(2), 73. https://doi.org/10.1071/WF9980073

Butler, B. W., Cohen, J. D. (1998b). Firefighter safety zones: how big is big enough? *Fire Management Notes*, *58*(1), 13–16. https://doi.org/10.2307/j.ctvx078wk.11

Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. In K. P. Davis (Ed.), *Forest Fire: Control and Use* (pp. 61–89). McGrawHill

Byram, G. M., Nelson, R. M. (2015). An analysis of the drying process in forest fuel material. In *e-Gen. Tech. Rep. SRS-200. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station. 45 p.* (Vol. 200). https://doi.org/10.2737/SRS-GTR-200

Carmo, M., Ferreira, J., Mendes, M., Silva, Á., Silva, P., Alves, D., Reis, L., Novo, I., Xavier Viegas, D. (2022). The climatology of extreme wildfires in Portugal, 1980–2018: Contributions to

forecasting and preparedness. *International Journal of Climatology*, *42*(5), 3123–3146. https://doi.org/10.1002/joc.7411

Carvalho, A., Monteiro, A., Flannigan, M., Solman, S., Miranda, A. I., Borrego, C. (2011). Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality. Atmospheric Environment 45, 5545–5553. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.010

Chandler, C. C., Williams, D., Trabaud, L., Thomas, P. H., Cheney, P. (1983). *Fire in forestry, Volume II. Forest fire management and organization*. John Wiley and Sons.

Chizewski, A., Box, A., Kesler, R., & Petruzzello, S. J. (2021). Fitness fights fires: Exploring the relationship between physical fitness and firefighter ability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(22). https://doi.org/10.3390/ijerph182211733

Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M. V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E., Martínez-Vega, F. J. (2014). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire*, *23*(5), 606. https://doi.org/10.1071/WF12052

Chuvieco, E., Yue, C., Heil, A., Mouillot, F., Alonso-Canas, I., Padilla, M., Pereira, J. M., Oom, D., Tansey, K. (2016). A new global burned area product for climate assessment of fire impacts. Global Ecology and Biogeography 25, 619–629. doi:10.1111/geb.12440

Countryman, C. M. (1982). *Physical Characteristics of Some Northern California Brush Fuels*. 8.

Cruz, M. G. (2005). Guia Fotográfico para Identificação de Combustíveis Florestais - Região Centro de Portugal. *Centro de Estudos Sobre Incêndios Florestais. Associação Para o Desenvolvimento Da Aerodinâmica Industrial. Universidade de Coimbra*.

Cruz, M. G., Viegas, D. X. (1995). *Forest fuels characterization and modelling. State of the art and methodology*. Deliverable 4.1. PROMETHEUS Project

De Groot, W. J., Wardati, Wang, Y. (2005). Calibrating the Fine Fuel Moisture Code for grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire*, *14*(2), 161–168. https://doi.org/10.1071/WF04054

Darmenov, A., da Silva, A. M. (2015). The Quick Fire Emissions Dataset (QFED) - Documentation of versions 2.1, 2.2 and 2.4

Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1978). *The National Fire Danger Rating System*.

Dennekamp, M., Straney, L. D., Erbas, B., Abramson, M. J., Keywood, M., Smith, K., Sim, M. R., Glass, D. C., Del Monaco, A., Haikerwal, A., Tonkin, A. M. (2015) Forest fire smoke exposures and out-of-hospital cardiac arrests in Melbourne, Australia: A case-crossover study. Environmental Health Perspectives 123, 959–964. doi:10.1289/ehp.1408436

Dinis, P., Dores, H., Teixeira, R., Moreno, L., Mónico, J., Bergman, M., Lekedal, H., Cachulo, M. C., Cardoso, J., & Gonçalves, L. (2018). Additional Cardiac Remodeling Induced by Intense Military Training in Competitive Athletes. *International Journal of Cardiovascular Sciences*. https://doi.org/10.5935/2359-4802.20180012

Dowdy, A. J., Mills, G. A., Finkele, K., Groot, W. De, De Groot, W. (2009). Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. In *Citeseer* (Issue 10). The Centre for Australian Weather and Climate Research. Technical Report No. 10

Drury, S. (2020). Fuel Continuity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Issue 2009, pp. 513–516). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_239

EFFIS/JRC. (2023). *EFFIS Fire Danger Forecast*

EFFIS (2017). *European Fuel Map, 2017, based on JRC Contract Number 384347 on the Development of a European Fuel Map.* European Commission

Fernandes, A. P., Lopes, D., Sorte, S., Monteiro, A., Gama, C., Reis, J., Menezes, I., Osswald, T., Borrego, C., Almeida, M., Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Miranda, A. I. (2022). Smoke emissions from the extreme wildfire events in central Portugal in October 2017.

*International Journal of Wildland Fire*, *31*(11), 989–1001. https://doi.org/10.1071/WF21097

Fernandes, P., Loureiro, C., Fernandes, M. (2009). Modelos de Combustível Florestal para Portugal. *6º Congresso Florestal Nacional*, *January*, 348–354

Fernandes, P. M., Botelho, H., Rego, F., & Loureiro, C. (2008). Using fuel and weather variables to predict the sustainability of surface fire spread in maritime pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, *38*(2), 190–201. https://doi.org/10.1139/X07-159

Finney, M. A. (2006). An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. *Fuels Management - How to Measure Success: Conference Proceedings*, 213–220

FUELMAP Project. (2011). *Final Classification and Mapping of EU Fuel Complexes. Deliverable 2*. FUELMAP Project: Development of a European Fuel Map Based on a Novel Classification Suited to EU Environments -The Fuelmap Project

Gleason, P. (1991). LCES - a key to safety in the wildland fire environment. *Fire Management Notes*, *52*(4)

Green, L. R., & Schimke, H. E. (1971). *Guides for fuel-breaks in the Sierra Nevada mixed-conifer type*

Guzman, J. A. (2012). Carbon monoxide poisoning. Crit Care Clin. 2012 Oct;28(4):537-48

Haikerwal, A., Akram, M., Sim, M. R., Meyer, M., Abramson, M. J., Dennekamp, M. (2016). Fine particulate matter (PM2.5) exposure during a prolonged wildfire period and emergency department visits for asthma. Respirology 21, 88–94. https://doi.org/10.1111/resp.12613

Hornby, L. G. (1936). *Fire control planning in the Northern Rocky Mountain Region*.

IAFC (2016). *Rules of Engagement for Firefighter Survival (training poster)*. International Association of Fire Chiefs (United States Safety, Health and Survival Section).

Ichoku, C., Ellison, L. (2014). Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. Atmospheric Chemistry and Physics 14, 6643–6667. doi:10.5194/acp-14-6643-2014

Johnston, F. H., Henderson, S. B., Chen, Y., Randerson, J. T., Marlier, M., DeFries, R. S., Kinney, P., Bowman, D. M. J. S., Brauer, M. (2012). Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. Environmental Health Perspectives 120, 695–701. doi:10.1289/ehp.1104422

Kaiser, J. W., Heil, A., Andreae, M. O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., Morcrette, J. J., Razinger, M., Schultz, M. G., Suttie, M., Van Der Werf, G. R. (2012). Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. Biogeosciences 9, 527–554. doi:10.5194/bg-9-527-2012

Keywood, M., Cope, M., Meyer, C. P. M,, Iinuma, Y., Emmerson, K. (2015). When smoke comes to town: The impact of biomass burning smoke on air quality. Atmospheric Environment 121, 13–21. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.050

Lahaye, S., Curt, T., Fréjaville, T., Sharples, J., Paradis, L., Hély, C. (2018). What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *International Journal of Wildland Fire*, *27*(3), 155. https://doi.org/10.1071/WF17087

Lahaye, S., Sharples, J., Hély, C., Curt, T. (2018). Toward safer firefighting strategies and tactics. In D. X. Viegas (Ed.), *Advances in forest fire research 2018* (pp. 1311–1316). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_166

Lahaye, S., Sharples, J., Matthews, S., Heemstra, S., Price, O., Badlan, R. (2018). How do weather and terrain contribute to firefighter entrapments in Australia? *International Journal of Wildland Fire*, *27*(2), 85–98. https://doi.org/10.1071/WF17114

Lindberg, A.-S. (2015). *Firefighters' physical work capacity*. http://umu.diva-portal.org/

Lobert, J., Warnatz, J. (1993). Emissions from the combustion process in vegetation. In P. Crutzen e J. Goldammer - Fire in the environment. The ecological atmospheric, and climatic importance of vegetation fires. Chichester, England: John Wiley and Sons, pp. 15–38.

Lundström, S., Berg, P., Halvors, O., Carter, N., Sören Lundström, Swedish Civil Contingencies

Agency. Peter Berg, Swedish Association of Firefighters. Ove Halvors, S. M. W. U. N. C., Svensson, S., Wahlberg, A., Svensson, S., & Wahlberg, A. (2015). *Healthy Firefighters : the Skellefteå Model improves the work environment*.

Lopes, S., Viegas, X. D., Teixeira, L. L., Viegas, M. T. (2014). Equilibrium moisture content and timelag of dead *Pinus pinaster* needles. *International Journal of Wildland Fire*, *23*, 721–732. https://doi.org/https://doi.org/10.1071/WF13084

Martins, V., Miranda, A. I., Carvalho, A., Schaap, M., Borrego, C., Sá, E. (2012). Impact of forest fires on particulate matter and ozone levels during the 2003, 2004 and 2005 fire seasons in Portugal. Science of the Total Environment 414, 53–62. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.007

McArdle, R. E. (1957). Standard fire fighting orders. *Fire Control Notes*, *18*(4), 151

McArthur, A. G. (1967). *Fire behaviour in eucalyptus forests*. Forest Research Institute, Forestry and Timber Bureau

MCFIRE/ADAI (2022). *Consulta de medições da humidade de combustíveis*.

Miranda, A. I., Borrego, C., Viegas, D. (1994). Forest fire effects on the air quality. In J. Baldasano, C. Brebbia, H. Power, P. Zannetti - Computer Simulation, Vol. 1 Barcelona: Computational Mechanics Publications, pp. 191-199

Miranda, A. I. (2004). An integrated numerical system to estimate air quality effects of forest fires. *International Journal of Wildland Fire*, *13*(2), 217. https://doi.org/10.1071/WF02047

Miranda, A. I., Ferreira, J., Valente, J., Santos, P., Amorim, J. H., Borrego, C. (2005). Smoke measurements during Gestosa-2002 experimental field fires. International Journal of Wildland Fire 14, 107–116. doi:10.1071/WF04069

Miranda, A. I., Borrego, C., Martins, H., Martins, V., Amorim, J. H., Valente, J., Carvalho, A. (2009) Forest Fire Emissions and Air Pollution in Southern Europe. 'Earth Obs. Wildl. Fires Mediterr. Ecosyst.' (Ed E Chuvieco) pp. 171–187. (Springer: Berlin, Heidelberg) doi:10.1007/978-3-642-01754-4_12

Miranda, A. I., Martins, V., Cascão, P., Amorim, J. H., Valente, J., Tavares, R., Borrego, C., Tchepel, O., Ferreira, A. J., Cordeiro, C. R., Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., Pita, L. P. (2010). Monitoring of firefighters exposure to smoke during fire experiments in Portugal. Environment International 36, 736–745. doi:10.1016/j.envint.2010.05.009

Miranda, A. I., Martins, V., Casco, P., Amorim, J. H., Valente, J., Borrego, C., Ferreira, A. J., Cordeiro, C. R., Viegas, D. X., Ottmar, R. (2012). Wildland smoke exposure values and exhaled breath indicators in firefighters. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues*, *75*(13–15), 831–843. https://doi.org/10.1080/15287394.2012.690686

Monteiro, A., Corti, P., San Miguel-Ayanz, J., Miranda, A. I., Borrego, C. (2013). The EFFIS forest fire atmospheric emission model: Application to a major fire event in Portugal. Atmospheric Environment 84, 355–362. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.059

Nguyen, H. M., He J., Wooster, M. (2023). Biomass burning CO, PM and fuel consumption per unit burned area estimates derived across Africa using geostationary SEVIRI fire radiative power and Sentinel-5P CO data. Atmos. Chem. Phys., 23, 2089–2118. https://doi.org/10.5194/acp-23-2089-2023

NWCG (2021a). *Fire Behavior Field Reference Guide*. *PMS 437*

NWCG (2021b). *Fuel Moisture Sampling*. National Wildfire Coordinating Group (NWCG)

NWCG (2022). *NWCG Incident Response Pocket Guide (IRPG), PMS 461* (Issue January). National Wildfire Coordinating Group

Osswald, T., Gama, C., Fernandes, A. P., Lopes, D., Varela, V., Miranda, A. I. (2023). Effects of the wildfires in August 2021 on the air quality of Athens through a numerical simulation. International Journal of Wildland Fire. 32. 10.1071/WF22148

Ottmar, R., Miranda, A. I., Sandberg, D. (2009). Characterizing Sources of Emissions from Wildland Fires. In A. Bytnerowicz, M. Arbaugh, A. Riebau, C. Andersen - Wildland fires and air pollution. Developments in Environmental Science, Vol 8, Chapter 3. Amsterdam:

Elsevier, pp. 61-78
Page, W. G., Butler, B. W. (2017). An empirically based approach to defining wildland firefighter safety and survival zone separation distances. *International Journal of Wildland Fire*, *26*(8), 655–667. https://doi.org/10.1071/WF16213
Patrick, B. (2009). Photo Guide for Estimating Fuel Loading and Fire Behavior in Mixed-Oak Forests of the Mid-Atlantic Region. *General Technical Report*, *NRS-45*. https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-45
Peterson, J. 1987. Analysis and reduction of the errors of predicting prescribed burn emissions. Thesis. Seattle: University of Washington. 70 p
PROMETHEUS Project (2000). *Management techniques for optimization of suppression and minimization of wildfire effects. System Validation. European Commission - Contract number ENV4-CT98-0716*
Pyne, S. J., Andrews, P. L., Laven, R. D. (1996). *Introduction to Wildland Fire*. Wiley, New York (USA)
Raposo, J. R., Cabiddu, S., Viegas, D. X., Salis, M., Sharples, J. (2015). Experimental analysis of fire spread across a two-dimensional ridge under wind conditions. *International Journal of Wildland Fire*, *24*(7), 1008. https://doi.org/10.1071/WF14150
Rea, G., Paton-Walsh, C., Turquety, S., Cope, M., Griffith, D. (2016). Impact of the New South Wales Fires during October 2013 on regional air quality in eastern Australia. Atmospheric Environment, 131, 150-163. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.034
Rego, F. C., Morgan, P., Fernandes, P., & Hoffman, C. (2021). Fire Science. In *Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7
Reid, C. E., Brauer, M., Johnston, F. H., Jerrett, M., Balmes, J. R., Elliott, C. T. (2016). Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. Environmental Health Perspectives 124, 1334–1343. doi:10.1289/ehp.1409277.
Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A., & Bastarrika, A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, *32*(8), 1301–1315. https://doi.org/10.1139/x02-052
Ribeiro, C., Xavier Viegas, D., Raposo, J., Reis, L., Sharples, J. (2023). Slope effect on junction fire with two non-symmetric fire fronts. *International Journal of Wildland Fire*, *32*(3), 328–335. https://doi.org/10.1071/WF22152
Ribeiro, L. . (2011). Interface Urbano-Florestal. In D. X. Viegas (Ed.), *Incêndios Florestais*. Verlag Dasshöfer
Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., Alves, D., Barbosa, T., & Modarres, M. (2021). *Planeamento da gestão de combustíveis: Efeito da distância e da frequência das limpezas na proteção das estruturas e rede viária*. ForestWISE (Coord.) - Projetos AGIF 2021 (P32100231). Vila Real, 160p
Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-115*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station
Rothermel, R. C. (1991). Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains. Res. Pap. INT-438. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 46 p. https://doi.org/10.2737/INT-RP-438
Schroeder, M. J., & Buck, C. C. (1970). Fire Weather : A Guide for Application of Meteorological Information to Forest Fire Control Operations. In *USDA Forest Service, Agriculture Handbook 360*.
Scott, J. H., Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. In *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR: Vol. RMRS-GTR-1* (Issues 153 RMRS-GTR). https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153
Sebastião, R., Sorte, S., Valente, J., Miranda, A. I., Fernandes, J. M. (2019). Detecting changes in

the heart rate of firefighters to prevent smoke inhalation and health effects. Evol. Syst. 10, 295–304. https://doi.org/10.1007/s12530-018-9241-0

Sharples, J. J., McRae, R. H. D., Wilkes, S. R. (2012). Wind-terrain effects on the propagation of wildfires in rugged terrain: Fire channelling. *International Journal of Wildland Fire*, *21*(3), 282–296. https://doi.org/10.1071/WF10055

Sharples, J., Towers, I., Wheeler, G., Wheeler, V., McCoy, J. (2013). Modelling fire line merging using plane curvature flow. *20th International Congress on Modelling and Simulation*, 256–262.

Silva, A. J., Vaz, B., Barreiros, C., Mata, F., Arriaga, M. T. de, Ângelo, R., Ferreira, B., Sousa, B., Nunes, E., Aparício, I., Carriço, J., Monteiro, L., Silva, N., Lopes, N., Graça, P., Silva, P., Horgan, R., Ângelo, R., & Sousa, S. (2018). *Promoção de um estilo de Vida Saudável nos Bombeiros Portugueses* (Direção-Geral da Saúde (ed.)). www.dgs.pt

Silva, B. M., Bos, S. C., Queirós, A. J. V., & Macedo, A. F. (2022). Psychological factors and healthy sleep in a Portuguese sample of employees with regular working hours. *Biological Rhythm Research*, *53*(12), 1863–1879. https://doi.org/10.1080/09291016.2022.2045058

Soteriades, E. S., Smith, D. L., Tsismenakis, A. J., Baur, D. M., Kales, S. N. (2011). Cardiovascular disease in US firefighters: A systematic review. In *Cardiology in Review* (Vol. 19, Issue 4, pp. 202–215). https://doi.org/10.1097/CRD.0b013e318215c105

Sofiev, M., Vankevich, R., Lotjonen, M., Prank, M., Petukhov, V., Ermakova, T., Koskinen, J., Kukkonen, J. (2009). An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting. Atmospheric Chemistry and Physics 9, 6833–6847. doi:10.5194/acp-9-6833-2009

Spinou, A., Koulouris, N. G. (2018). Current clinical management of smoke inhalation injuries: a reality check. Eur Respir J. 2018 Dec 6;52(6):1802163

Thomas, C. ., Sharples, J. ., Evans, J. (2017). Modelling the dynamic behaviour of junction fires with a coupled atmosphere–fire model. *International Journal of Wildland Fire*, *26*, 331. https://doi.org/10.1071/WF16079

Thorburn, R. W., Alexander, M. E. (2001). LACES versus LCES: adopting an "A" for "anchor points" to improve wildland firefighter safety. In Association of Wildland Fire (Ed.), *Proceedings of the 2001 International Wildland Fire Safety Summit* (p. 10). Association of Wildland Fire.

Turco, M., Jerez, S., Augusto, S., Tarín-Carrasco, P., Ratola, N., Jiménez-Guerrero, P., & Trigo, R. M. (2019). Climate drivers of the 2017 devastating fires in Portugal. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–8. https://doi.org/10.1038/s41598-019-50281-2

Turquety, S., Menut, L., Siour, G., Mailler, S., Hadji-lazaro, J., George, M., Clerbaux, C., Hurtmans, D., Coheur, P. F. (2020). APIFLAME v2.0 biomass burning emissions model: impact of refined input parameters on atmospheric concentration in Portugal in summer 2016. Geoscientific Model Development, 13(7), 2981-3009. doi.org/10.5194/gmd-13-2981-2020

UNISDR (2009). UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. In *United Nations International Strategy for Disaster Reduction*. https://doi.org/10.1021/cen-v064n005.p003

Urbanski, S. P. (2013). Combustion efficiency and emission factors for wildfire-season fires in mixed conifer forests of the northern Rocky Mountains, US. Atmospheric Chemistry and Physics 13, 7241–7262. doi:10.5194/acp-13-7241-2013

USDA/Forest Service (2023). *National Fire Danger Rating System*

USDA Forest Service (1957). *Report of Task Force to Recommend Action to Reduce the Chances of Firefighters Being Killed by Burning While Fighting Fire*

Valente, J., Miranda, A. I., Lopes, A. G., Borrego, C., Viegas, D. X., Lopes, M. (2007) Local-scale modelling system to simulate smoke dispersion. International Journal of Wildland Fire 16, 196–203. doi:10.1071/WF06085

van der Kamp, D. W., Moore, R. D., & McKendry, I. G. (2017). A model for simulating the moisture content of standardized fuel sticks of various sizes. *Agricultural and Forest Meteorology*, *236*, 123–134. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.013

Van Der Werf, G. R., Randerson J. T., Giglio. L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton,

D. C., Defries, R. S., Jin, Y., Van Leeuwen, T. T. (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). Atmospheric Chemistry and Physics 10, 11707–11735. doi:10.5194/acp-10-11707-2010

Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. In *Forestry*. https://doi.org/19927

Vicente, A., Alves, C., Monteiro, C., Nunes, T., Mirante, F., Cerqueira, M., Calvo, A., Pio, C. (2012). Organic speciation of aerosols from wildfires in central Portugal during summer 2009. Atmospheric Environment 57, 186–196. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.04.030

Vicente, A., Calvo, A., Fernandes, A. P., Nunes, T., Monteiro, C., Pio, C., Alves, C. (2017). Hydrocarbons in particulate samples from wildfire events in central Portugal in summer 2010. Journal of Environmental Sciences (China) 53, 122–131. doi:10.1016/j.jes.2016.02.022

Viegas, D., Viegas, M. (1994). 1994 - Viegas_Relationship between rainfall burne.pdf. *International Journal of Wildland Fire*, *4*(1), 11–16

Viegas, D. X., Almeida, M. F., Ribeiro, M., Domingos, E. D. I., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., Silva, F. (2017). *O COMPLEXO DE INCÊNDIOS DE PEDRÓGÃO GRANDE E CONCELHOS LIMÍTROFES, INICIADO A 17 DE JUNHO DE 2017*

Viegas, D. X., Almeida, M., Raposo, J., Oliveira, R., & Viegas, C. X. (2014). Ignition of Mediterranean Fuel Beds by Several Types of Firebrands. *Fire Technology*, *50*(1), 61–77. https://doi.org/10.1007/s10694-012-0267-8

Viegas, D. X. D., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A., Sol, B. (1999). Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, *9*(4), 235–246. https://doi.org/10.1071/WF00015

Viegas, D. X., Figueiredo Almeida, M., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., Silva, L. F. (2017). O complexo de incêndios de Pedrógão Grande e concelhos limítrofes. In *Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais ADAI/LAETA* (Vol. 2017)

Viegas, D. X., Pita, L. P. (2004). Fire spread in canyons. *International Journal of Wildland Fire*, *13*(3), 253–274. https://doi.org/10.1071/WF03050

Viegas, D. X., Raposo, J. R., Davim, D. A., Rossa, C. G. (2012). Study of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts. Part 1. Analytical model and validation with no-slope laboratory experiments. *International Journal of Wildland Fire*, *21*(7), 843–856. https://doi.org/10.1071/WF10155

Viegas, D. X., Reis, R. M., Cruz, M. G., Viegas, M. T., Doutoramento, B. De, Silvicultora, E., Coimbra, U. De, Engenharia, D. De, & De, P. (2004). Calibração do Sistema Canadiano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal. *Silva Lusitana*, *12*(1), 77–93

Viegas, D. X., Soares, J., Almeida, M. (2013). Combustibility of a mixture of live and dead fuel components. *International Journal of Wildland Fire*, *22*(7), 992–1002. https://doi.org/10.1071/WF12031

Viney, N. R. (1991). A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire*, *1*(4), 215–234. https://doi.org/10.1071/WF9910215

Youssouf H, Liousse C, Roblou L, Assamoi EM, Salonen RO, Maesano C, Banerjee S, Annesi-Maesano I. Non-accidental health impacts of wildfire smoke. Int J Environ Res Public Health. 2014 Nov 14;11(11):11772-804

Zimmerman, T. (2020). Watch Out Situations. In S. L. Manzello (Ed.), *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 1051–1054). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_262

Zimmerman, T., Parkinson, T. (2020). Standard Firefighting Orders. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Vol. 21, Issue 5, pp. 958–962). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_221