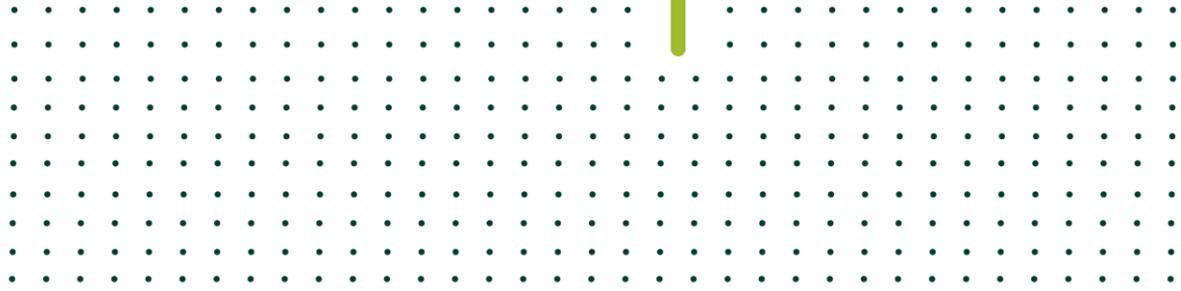


rePLANT



Modelos a ser implementados e respetivas fontes de informação

PPS 2. Atividade 2 | Deliverable 2.2.1

Versão n. 1 | 18/03/2021

Luís Mário Ribeiro, Carlos Xavier Viegas, Younggi Park, Domingos Xavier Viegas

Universidade de Coimbra



www.replant.pt

grounding collaborative strategies for integrated mnngt of forests & fire

Cofinanciado por:



Índice

1. Introdução	3
2. Previsão do comportamento do fogo	4
2.1. Modelo base de propagação	4
2.2. Forma	5
2.3. Modelos avançados de propagação do fogo	7
3. Previsão do campo de ventos	17
3.1. Modelo Nuatmos	17
3.2. Modelo Canyon	17
4. Topografia e combustíveis	19
4.1. Topografia	19
4.1.1. Declive	19
4.1.2. Orientação	19
4.1.3. Forma do terreno	20
4.1.4. Altitude	20
4.1.5. Inclusão da topografia na simulação do comportamento do fogo	20
4.2. Combustíveis	21
4.2.1. Descrição dos combustíveis	21
4.2.2. Modelos de combustível	21
4.2.3. Inclusão dos combustíveis na simulação do comportamento do fogo	22
5. Fontes de dados	24
6. Referências	25

1. Introdução

A previsão do comportamento do fogo é, aos dias de hoje, um recurso disponível para ser integrado nos sistemas de apoio à decisão das entidades gestoras de bens e recursos, em qualquer fase da gestão dos incêndios florestais. Existem modelos numéricos que podem simular algumas das características da propagação do fogo, como a sua velocidade de propagação, intensidade, comprimento de chama, ou outras. Estes modelos dependem da descrição quantitativa dos fatores que afetam a real propagação de um incêndio, como a topografia (sobretudo declive), a vegetação (combustível florestal) e a meteorologia (sobretudo velocidade e direção do vento). Qualquer simulação de um fenómeno natural aproxima-se tanto mais da realidade quanto mais homogêneas e simples forem as condições envolventes. A variedade de fenómenos físicos que afetam o comportamento de um incêndio torna muito difícil quantificar a contribuição individual de cada um deles. Ainda que os modelos físicos fossem totalmente corretos, o que em fenómenos naturais é praticamente impossível, a sua aplicação em situações de fogo real está largamente condicionada pela fiabilidade dos dados de entrada. A utilização de alguns destes parâmetros pressupõe o uso de modelos específicos de previsão para o seu cálculo, o que introduz mais uma fonte de incerteza. Além desta variação espacial, também a variabilidade temporal constitui mais um fator de instabilidade introduzido, nomeadamente a frequência de atualização dos dados de vento. O vento pode variar localmente a cada instante, mas para conseguir simular é necessário assumir períodos maiores, tipicamente de, pelo menos, uma hora. As simulações tendem a reproduzir com alguma fiabilidade a realidade num espaço temporal relativamente curto – 3 a 5 horas – devido principalmente ao número bastante elevado de fatores humanos, topográficos, climatéricos ou do próprio fogo que condicionam o regime de propagação de um incêndio. Ainda assim, e aceitando todos os condicionalismos expostos, a possibilidade de ter acesso a estimativas do desenvolvimento de um potencial incêndio podem ser um apoio extremamente útil na tomada de decisões.

Neste documento são descritos sucintamente os modelos numéricos que serão implementados no sistema RePLANT agora desenvolvido, sendo referenciados trabalhos onde uma descrição mais exaustiva pode ser analisada. Estes modelos são relativos duas componentes necessárias à simulação: o comportamento do fogo e a previsão do campo de ventos. São também referenciadas as potenciais fontes de dados onde podem ser coletados aqueles que são utilizados como input para os modelos.

2. Previsão do comportamento do fogo

Os modelos de comportamento do fogo podem ser agrupados de acordo com a forma como representam a natureza da sua propagação. Num recente estudo comparativo, Sullivan (2009a, 2009b) classifica-os em dois grupos: i) modelos físicos e semi-físicos e ii) modelos empíricos e semi-empíricos. Os modelos físicos tentam representar tanto a física como a química da propagação do fogo, os modelos quase físicos representam apenas a física. Os modelos empíricos são baseados em métodos estatísticos e modelos quase empíricos combinam modelação estatística com uma estrutura física.

O núcleo da maioria dos simuladores de comportamento de fogo existentes, como o Firestation (A. M. G. Lopes et al., 2002), o Farsite (Finney, 1998) ou o FlamMap (Finney, 2006) é baseado num modelo semi-empírico desenvolvido há 50 anos (Rothermel, 1972) para representar a propagação do fogo de superfície. Este modelo é considerado o mais representativo de todos, uma vez que se baseia numa multiplicidade de observações de incêndios florestais, complementadas com incêndios laboratoriais e a correspondente análise estatística. Embora alguns modos de comportamento extremo do fogo estejam incluídos em alguns simuladores, continuam a ser um desafio hoje em dia, devido à incerteza do seu comportamento ou aos grandes requisitos dos dados de entrada. São exemplos os fogos de copas, os vórtices de fogo, os focos secundários ou o comportamento eruptivo (Werth et al., 2016). Pelos motivos expostos, o modelo de previsão do comportamento do fogo de superfície mencionado antes será o utilizado. No entanto, este modelo não tem um carácter espacial, pois limita-se a prever o comportamento do fogo num determinado ponto com características conhecidas. Por esse motivo, a modelação da propagação do fogo implementa um conjunto de submodelos, necessários à sua espacialização, e que se descrevem de seguida.

2.1. Modelo base de propagação

O modelo de Rothermel tem como dados de entrada as características do chamado ambiente do fogo, i.e., características dos combustíveis, do terreno e do vento, e tem como dados de saída a velocidade de propagação do fogo de superfície ao longo da direção principal de progressão do mesmo.

A base deste modelo é a Equação 1 que expressa um equilíbrio energético dentro de um volume unitário do combustível à frente da chama. Genericamente, a velocidade de propagação R exprime a relação entre a taxa de aquecimento do combustível e a energia necessária para a ignição desse mesmo combustível:

.....

$$R = \frac{I_r \pi (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_i} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

R – velocidade de propagação [m/s].

I_r – intensidade de reação, ou seja, a libertação de calor por unidade de área da frente da chama [J/(m²s)].

π – rácio de fluxo de propagação, ou seja, fração de libertação de calor responsável pelo aquecimento do combustível e ignição subsequente.

Φ_w – fator de vento.

Φ_s – fator de declive.

ρ_b – massa volúmica, ou seja, massa de combustível por volume unitário [kg/m³]

ϵ – número de aquecimento efetivo, isto é, relação entre a massa volúmica e a massa de combustível envolvida no processo de ignição.

Q_i - calor de pré-ignição, ou seja, calor necessário para fazer uma unidade de peso de combustível entrar em ignição [J/kg].

2.2. Forma

O modelo de Rothermel dá como saída a velocidade ao longo da direção máxima de propagação, mas não fornece nenhuma informação sobre o tamanho e forma do fogo. No entanto, a simulação do crescimento de um incêndio necessita de uma descrição matemática da forma do fogo. Para espacializar estas previsões numéricas, são empregues dois modelos diferentes para descrever a forma do fogo, sendo que ambos consideram que as características dos combustíveis não a afetam: o modelo proposto por Anderson (1983) define a forma do fogo como uma elipse dupla, o modelo proposto por (Alexander, 1985) como uma elipse simples. Ambos os modelos tomam como entrada a velocidade do vento a meia altura da chama. O modelo de elipse simples é usado quando a velocidade do vento a meia altura da chama é menor que 0.2 m/s, uma vez que o modelo de dupla elipse não consegue lidar com situações de vento nulo.

O efeito da topografia é modelado através da adição de uma velocidade de vento fictícia (velocidade do vento equivalente) que produziria o mesmo efeito sobre a velocidade de propagação do fogo que o declive real. A velocidade efetiva do vento corresponde à soma vetorial da velocidade real e da “velocidade de vento equivalente”.

O modelo local para a velocidade de propagação do fogo, juntamente com os modelos para a forma (elipse simples e dupla) definem o comportamento "físico" do fogo. Em termos de implementação, a simulação do desenvolvimento espacial de um incêndio pode ser levada a cabo

como um processo vetorial, aplicando o princípio de Huygens (Richards, 1990), ou usando uma aproximação *raster*, estratégia que foi aqui adotada (Figura 1). A topografia é dividida em células, nas quais as características dos combustíveis florestais são consideradas constantes e uniformes. A simulação da propagação segue então um processo de contágio entre as células que “estão a arder” e as que “não estão a arder” (Figura 2). O algoritmo usado é baseado no algoritmo de programação dinâmico de Dijkstra (Kourtz and O’Regan, 1971).

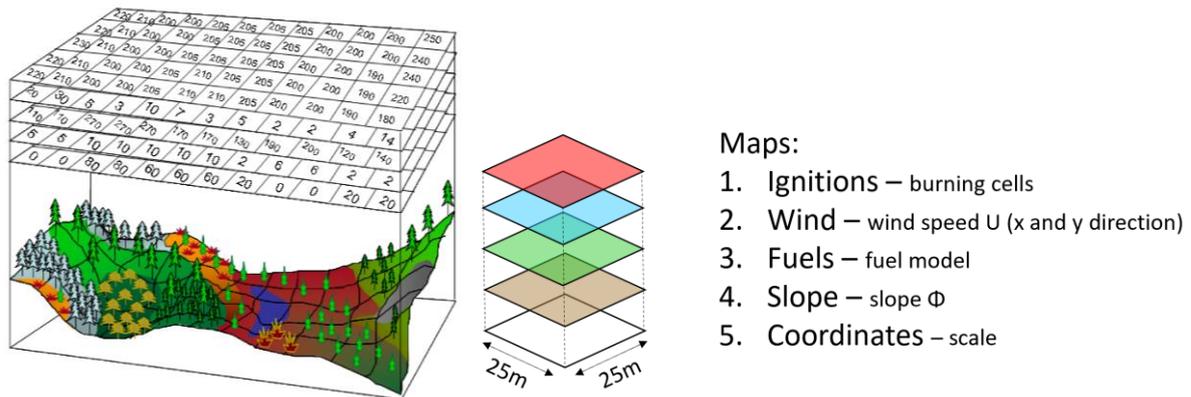
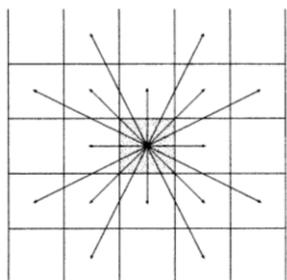


Figura 1 - Divisão do mapa em células, na metodologia *raster*, em que cada célula possui um conjunto de valores para os parâmetros do declive, combustíveis, vento e ignições (imagem adaptada de Finney, 1998).



- Fire propagation:
 - 1) It is calculated as the time it takes for a fire to spread from each combustion cell to its non-combustion neighboring cells.
 - 2) The neighboring cells are assigned a number representing the time that the ignition takes place.
 - 3) Non-combustion cell with the shortest time assigned becomes a burning cell.
 - 4) Repeat from 1)

Figura 2 – Direções para propagação do fogo numa célula para as 16 células vizinhas e metodologia de contágio (imagem adaptada de Lopes et al., 2002).

Uma vez que os parâmetros de entrada podem variar de célula para célula (incluindo propriedades do combustível, vento e declive), o cálculo da velocidade de propagação para o processo de contágio baseia-se na conjugação dos parâmetros de cada par de células. Isto consegue-se através da aplicação de uma média harmónica à velocidade característica de propagação associada a cada célula (equação 2). Desta forma minimiza-se o eventual erro associado a duas células contíguas quando uma delas não é combustível, assegurando que não entram em ignição, o que aconteceria no caso de uma média simples.

$$R = \frac{2R_1R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Equação 2}$$

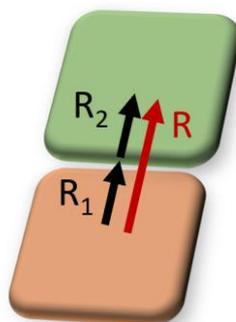


Figura 3 - Velocidade de propagação entre duas células.

2.3. Modelos avançados de propagação do fogo

O modelo base de cálculo de velocidade de propagação do fogo de Rothermel tem algumas limitações no que diz respeito aos mecanismos de transmissão de calor permitidos. Este modelo traduz a propagação do fogo ao nível da superfície. Assim, o modelo não consegue, por exemplo, prever a propagação devida a projeções de partículas incandescentes. Por outro lado, também os grandes incêndios que modificam por si só as características do ambiente envolvente, bem como os fogos de copas não podem ser previstos. Por este motivo, pretendemos agregar ao modelo de Rothermel outros modelos avançados de propagação do fogo, capazes de traduzir outros fenómenos e desta forma obter previsões de propagação mais rigorosas.

O modo de implementação dos modelos deverá passar por uma interligação entre o projeto rePLANT e outro projeto que a equipa da ADAI (integrante do parceiro UC) lidera, denominado IMFIRE¹. O IMFIRE é um projeto inteiramente dedicado ao desenvolvimento de um simulador do



IMFIRE

1

INTELLIGENT MANAGEMENT FOR WILDFIRES

Projeto IMFIRE – Gestão Inteligente do Fogo, ref. PCIF/SSI/0151/2018, financiado por fundos nacionais através do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior. Liderado pelo Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (CEIF/ADAI) e com a participação do Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra, da Associação para o Desenvolvimento do Departamento de Física da Universidade de Coimbra e da Thales Portugal. Website do projeto:

<https://adai.pt/imfire/pt/entrada/>

comportamento do fogo avançado e de características únicas com recurso a algoritmos inovadores e de inteligência artificial. Dadas as sinergias existentes entre ambos os projetos, está a ser detalhado o modo como deverão interagir, numa tentativa de evitar duplicação de esforços e de tirar partido das capacidades de desenvolvimento da equipa pluridisciplinar de excelência que compõe o consórcio do IMFIRE.

A Figura 4 ilustra os vários fenómenos de comportamento do fogo que se pretendem incluir no simulador. Atualmente e apesar de existirem vários simuladores de comportamento e propagação de fogo, nenhum simulador possui um leque tão vasto de modelos como o que se pretende desenvolver.

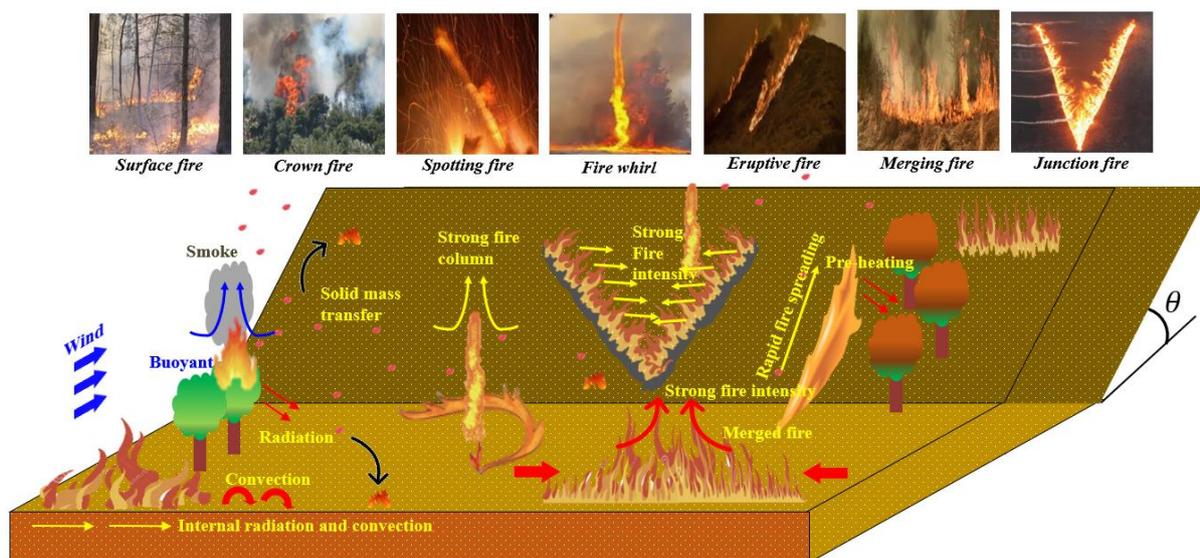


Figura 4 – Ilustração dos fenómenos de comportamento do fogo a integrar no simulador.

Como já foi referido anteriormente, o fogo de superfície engloba os fenómenos de propagação que ocorrem ao nível do solo, e é traduzido pelo modelo de Rothermel. O fogo de copas está intimamente ligado à propagação de superfície e ocorre quando o fogo de superfície atinge uma intensidade muito elevada, aliada aos ventos fortes e à existência de material altamente combustível entre o solo e as copas das árvores, permitindo a passagem do fogo às copas (Figura 5).





Figura 5 - Ilustração de propagação de fogo de superfície. As duas últimas imagens ilustram a transição de um fogo de superfície para fogo de copas.

A modelação da propagação de fogo de copas é complexa, pelo que existem poucos trabalhos desenvolvidos neste âmbito. Os modelos desenvolvidos podem ser classificados de 2 formas, modelos de iniciação de fogo de copas ou modelos de propagação de fogo de copas (Pastor et al., 2003). As variáveis mais importantes, que a maioria dos modelos mais completos procura estimar são a velocidade de propagação, a intensidade da frente de chamas e o consumo de combustível.

Dos modelos desenvolvidos, o modelo semi-empírico de propagação de fogo de Van Wagner (1993) é o mais utilizado. Três categorias de fogo de copas podem ser diferenciados: o passivo, o ativo e o independente (Figura 6). De acordo com Van Wagner (1993) e Cruz (1999), foram estabelecidos critérios quantitativos para a previsão de formação de tochas por fogo de superfície, transição para combustão contínua através das copas, e o surgimento de fogo de copas independentes.

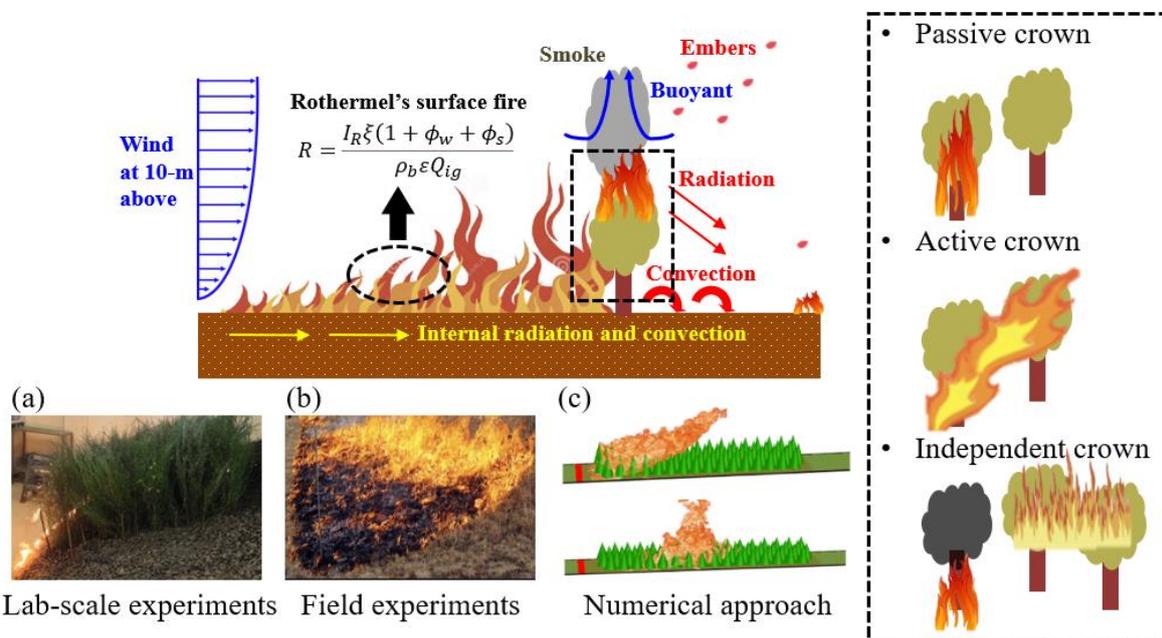


Figura 6- Ilustração de propagação de fogo de superfície e de copas para as três maneiras convencionais e para os três tipos de fogo de copas: a) experiência laboratorial para a taxa de propagação de fogo em superfície (Rossa

et al., 2017), b) experiência em campo para a taxa de propagação de fogo em superfície (Wragg et al., 2018), e c) análise numérica para a propagação de fogo em copas (Moinuddin and Sutherland, 2020).

Vários modelos de combustível representativos dos tipos de vegetação arbustiva e florestal em Portugal Continental, foram desenvolvidos por Cruz et al. (2005). As três características quantitativas fundamentais das copas dos combustíveis são a densidade aparente da copa, altura da base da copa e o teor de humidade foliar.

O fogo de copas é uma grande fonte de partículas incandescentes, que são elevadas pela coluna de convecção gerada e transportados horizontalmente pelo vento, provocando potenciais novos focos de incêndio (Figura 7). Estes novos focos podem interagir com a frente principal de incêndio, contribuindo para a propagação descontínua do incêndio.



Figura 7 - Ilustração de projeção de partículas.

Este tipo de fenómeno de propagação, a projeção de partículas, conhecida internacionalmente como *Spotting*, resulta de um processo complexo e pode ser descrito sucintamente nas seguintes fases ou mecanismos (Manzello et al., 2020; J. Martin and Hillen, 2016; Porterie et al., 2007; Viegas et al., 2014):

- a) *formação e libertação de partículas incandescentes*: corresponde à libertação de partículas sólidas incandescentes produzidas pela combustão da vegetação. É caracterizado pelo número, tamanho, formato, massa e velocidade inicial das partículas que são projetadas por unidade de tempo e área, para um determinado tipo de combustível. Esta fase é altamente dependente da intensidade do fogo e do tipo de combustível que sustenta o incêndio.
- b) *elevação das partículas incandescentes na pluma térmica*: corresponde essencialmente ao transporte ascendente vertical de partículas pela coluna de convecção de fogo, produzida acima da zona de combustão. Essa elevação depende do fluxo de vento, da velocidade da pluma, da temperatura (que varia com a altura) e da velocidade terminal de cada partícula para as condições ambientais prevaletentes acima do fogo.
- c) *transporte, pelo vento, das partículas incandescentes*: consiste no transporte de uma ou mais partículas em combustão pelas correntes de convecção e pelo vento. Estas partículas viajam normalmente a uma velocidade, relativa ao escoamento, próxima da velocidade terminal. No

entanto, devido a complexidade do campo de ventos meteorológicos e convectivo, a partícula experimenta pontualmente diversos tipos de escoamento, tanto em termos de velocidade, como em termos de direção. Pelo que pode atingir distâncias que variam entre 0 a vários quilômetros do fogo principal.

- d) *Combustão das partículas durante o transporte:* durante a fase de transporte, a partícula pode experimentar vários estados de combustão, nomeadamente combustão com chama, combustão sem chama e/ou extinção de combustão. A combustão com chama provoca um consumo mais rápido da partícula pelo que as fases de transporte que são dominadas por este tipo de combustão, apresentam um perigo de novas ignições a curtas distâncias. A combustão sem chama caracteriza-se por apresentar velocidades de consumo da partícula muito baixas durante períodos de tempo relativamente longos, sendo normalmente associadas a focos secundários a longa distância. Por vezes a combustão pode extinguir-se durante o transporte da partícula, devido ao seu consumo total ou apenas porque as condições deixaram de ser favoráveis à combustão. Neste caso, a partícula perde a capacidade de provocar um novo foco secundário de incêndio.
- e) *Contacto da partícula com o solo:* depois de atingir o solo, a partícula pode iniciar um novo incêndio se cair sobre a vegetação ou outro material inflamável. A maior ou menor possibilidade de ignição é altamente influenciada pelas características físicas do novo local (declive, altura e porosidade), termodinâmicas (temperatura e humidade) assim como, a sua exposição a vento.
- f) *Evolução dos focos de incêndio:* uma partícula incandescente depositada no solo, pode iniciar um novo foco que poderá evoluir para um fogo potencial. Dependendo do número de pontos, da sua distância mútua, da distância até a frente de incêndio principal e da existência de vento predominante ou declive, esses novos focos de incêndios poderão evoluir e afetar a propagação geral do fogo de diferentes formas.

Após o processo de formação de focos secundários deverá ainda ter-se em consideração a interação entre os diversos pontos ou frentes de chama. Para ignições a curtas distâncias, é natural que a frente de chama original atinja os novos focos de incêndio, havendo um natural acréscimo na sua velocidade de propagação. Para projeções a médias distâncias, a nova ignição poderá provocar uma nova frente de chama que interage com o incêndio na sua globalidade. Para projeções a longas distâncias, a frente de chama original dificilmente terá qualquer tipo de interação com o foco secundário pelo que podem ser tratados como duas ocorrências distintas. A possível interação entre os focos original e secundários dependem sobretudo da intensidade do fogo, das condições topográficas e do tempo que levam a ser extintos (Almeida, 2011; Viegas et al., 2014).

Tarifa et al. (1967) desenvolveu um modelo bidimensional de previsão da trajetória de partículas. Este modelo foi baseado nos estudos de Byram (1954) e de Tarifa et al. (1965), onde estes autores analisaram as trajetórias e os tempos de combustão de partículas de madeira com forma regular (cilindros, placas e esferas). Baseando-se nos dados dos ensaios de Tarifa et al. (1967) com esferas de madeira, Lee and Hellman (1969, 1970) desenvolveram um modelo tridimensional que prevê a alteração do diâmetro deste tipo de partículas, assumindo que a sua densidade permanece constante assim como o coeficiente de decaimento de massa resultante da combustão.

Mais recentemente houve diversos investigadores que se dedicaram igualmente ao aperfeiçoamento dos modelos de previsão no âmbito dos focos secundários. Fonda and Varner (2004) estudaram a combustibilidade de pinhas de diversas espécies concluindo que, apesar da sua massa, estas partículas apresentam potencial para provocar focos secundários. Porterie et al. (2005) desenvolveram um estudo de simulação numérica que conclui que o número de partículas projetadas decresce exponencialmente em função da distância à frente de chama.

Anthenien et al. (2006) construiu um modelo que tem em consideração a combustão de partículas durante o seu transporte pelo vento. Sardoy et al. (2007) efetuaram estudos numéricos relativos ao transporte e combustão de partículas provenientes de árvores a arder. Estes autores relacionaram a intensidade do fogo, a velocidade do vento e, as dimensões e densidade das partículas, estimando o tempo que as partículas permanecem em combustão durante o seu transporte. Posteriormente, efetuaram cálculos numéricos de análise das características e distribuição das partículas quando aterram no solo (Sardoy et al., 2008). Em suma, todos os modelos anteriormente referidos determinam a distância máxima de projeção das partículas através do produto do tempo máximo de combustão pela velocidade horizontal do vento.

Dois outros tipos de comportamento de fogo que podem estar relacionados com a formação de focos secundários de incêndio é o fenómeno de frentes convergentes (Figura 8), definido por duas frentes de fogo lineares e, que podem intersectar-se num determinado ponto, formando um ângulo entre si, designado por fenómeno de junção de fogos (Figura 9) (Raposo et al., 2014).



Figura 8 - Ilustração do fenómeno de frentes convergentes.



Figura 9 - Ilustração da junção de duas frentes de fogo.

Quando ocorre o cruzamento entre as duas frentes de fogo no ponto de convergência, decorre duas fases distintas. Em primeiro lugar ocorrerá um rápido aumento da velocidade de propagação até atingir um máximo, que segundo Raposo (2016), se pode modelar através de outro tipo de comportamento de fogo, como é o fogo eruptivo (mencionado de seguida nesta subsecção). Em segundo lugar irá ocorrer uma desaceleração do fogo, principalmente devido ao aumento da área da frente, até ocorrer a sua extinção.

Vários estudos têm sido desenvolvidos a fim de se compreender estes dois tipos de comportamento, o de frentes convergentes e o de junção de fogos. O estudo realizado por (Finney and McAllister, 2011) refere que o comportamento de um incêndio florestal pode mudar drasticamente na presença de outro fogo que se encontre próximo, reconhecendo a importância de compreender e prever essas mudanças. Grumer e Strasser (1965) e Huffman et al. (1969) concluem que a aproximação de frentes de fogo geram um aumento da taxa de propagação das mesmas.

Kamikawa et al. (2005) referem no seu trabalho que a convergência de chamas torna o fogo mais destrutivo e fora de controlo, dificultando o combate às chamas e levando à possibilidade de formação de tornados de fogo.

Morvan et al. (2011) realizaram um estudo de simulação numérica da interação entre duas frentes de fogo em condições semelhantes às que ocorrem em operações de supressão do fogo (por exemplo, a utilização de um contrafogo para auxiliar a extinção de um incêndio). Uma das conclusões tiradas pelos autores é a de que a convergência de duas frentes causa um aumento rápido da intensidade da linha de fogo, sendo máximo o valor da taxa de calor libertado durante o processo de convergência; os autores também observam uma grande variação na velocidade de propagação do fogo a partir do momento em que se inicia a interação entre as frentes. Os mesmos autores, Morvan et al. (2013), num estudo semelhante ao anterior, analisam a interação entre duas frentes de fogo (sendo uma delas um contrafogo) usando simulações numéricas em 3D, concluindo que a interação entre as mesmas começa para distâncias entre os 10 e os 20 metros. Wang et al. (2015) analisam a taxa de queima e a altura das chamas na junção, concluindo que essa junção provoca um aumento de 50 a 100% em ambos os parâmetros.

Experiências laboratoriais realizadas por Viegas et al. (2012) permitiram verificar que o fogo pode atingir velocidades de propagação muito elevadas num curto espaço de tempo, provocando uma destruição fora do comum. No local de convergência, verificou-se que o ponto de interseção das

frentes de fogo sofre um aumento repentino da velocidade de propagação, diminuindo depois gradualmente até à extinção do fogo. Os autores apontam a combinação da transferência de calor por convecção e por radiação como explicação para este súbito aumento de velocidade, desenvolvendo um modelo analítico que traduz esse efeito de concentração de energia que ocorre na zona de convergência.

Sharples et al. (2013) aplicou a modelação numérica da junção de linhas de fogo e definiu uma abordagem diferente para este fenómeno, com o objetivo de explicar o rápido avanço do ponto de interseção das frentes de fogo convergentes. Os autores consideram a curvatura da linha de fogo como sendo uma medida da acumulação de energia, numa abordagem puramente geométrica, e que a frente de fogos se propaga com uma velocidade, na direção normal, que é função dessa mesma curvatura. Com esta abordagem, os autores obtêm resultados concordantes com os apresentados por Viegas et al. (2012).

Um outro estudo realizado por Raposo et al. (2014), onde foram comparados dados obtidos em ensaios de laboratório, em ensaios de campo e de incêndios reais de larga escala, permitiram concluir que o fogo apresenta um comportamento idêntico em todas as situações. Segundo os autores, tal facto mostra que os mecanismos que explicam o fenómeno são independentes da escala de análise.

Mais recentemente, Thomas et al. (2015) efetuaram ensaios numéricos para analisar a relação entre a velocidade de propagação do fogo e a curvatura da frente de fogo, proposta por Sharples et al. (2013) e, utilizando configurações geométricas semelhantes às utilizadas por Viegas et al. (2012). Para tal, utilizam um modelo chamado WRF-Fire, que é uma combinação do modelo atmosférico WRF proposto por Shamarock et al. (2005) com o modelo semi-empírico de Rothermel.

Um outro fenómeno por vezes observado nos incêndios florestais consiste no rápido desenvolvimento de uma frente de chamas, à qual corresponde uma velocidade de propagação que aumenta subitamente. Este efeito é designado por eruptivo (Figura 10). Esta situação verifica-se em particular em encostas com elevada inclinação (superiores a 30°) ou em desfiladeiros. A concavidade do terreno, no caso de desfiladeiros, condiciona o escoamento de massas de ar quente, concentrando-as, situação semelhante à que ocorre numa chaminé. Os combustíveis ligeiros e mais porosos aumentam a velocidade deste processo (Viegas, 2006). Em encostas com elevado declive, o movimento ascendente de ar quente empurra e induz mais calor na cabeça do fogo, aumentando a sua velocidade e intensidade. A convecção fica cada vez mais intensa e gera movimentos de ar fortes na vizinhança que alimentam ainda mais o incêndio e tornam o seu comportamento extremamente violento, sendo por isso denominado como uma erupção (Viegas and Simeoni, 2011).



Figura 10 - Ilustração do comportamento eruptivo do fogo.

Quanto a modelação deste tipo de propagação de fogo, não existem muitos trabalhos desenvolvidos neste âmbito. Viegas (2005) desenvolve um modelo matemático que estima o valor instantâneo da velocidade de propagação. Essa velocidade depende de vários parâmetros, entre eles velocidade básica de propagação, tempo de residência e outros coeficientes que dependem do leito de combustível considerado. A velocidade básica de propagação é a velocidade de uma frente linear, num dado combustível, em condições de vento e declive nulos; depende da estrutura e da composição do leito de combustível, mas depende ainda mais do teor de humidade (Viegas, 2006).

Para além, dos tipos de comportamento mencionados anteriormente pode ainda observar-se o comportamento de tornado, turbilhões ou redemoinho de fogo (Figura 11). Este comportamento está associado a uma grande instabilidade atmosférica e a cargas elevadas de combustível. Devido às altas temperaturas geradas pelo fogo, resultam correntes de ar ascendentes, que em determinadas condições, vão criar gradualmente um vórtice vertical. Assim que a coluna começa a elevar-se, agrega a chama e cinzas, girando e acelerando sobre si mesmo. Pode-se atingir temperaturas na ordem dos 1000°C, comprimentos de chamas de 10 a 50 metros, ventos de 200km/h capazes de arrancar árvores de 15 metros de altura e de projetar material de grandes dimensões a arder para fora do perímetro do foco principal (AGIF, 2020).



Figura 11 - Ilustração do comportamento de tornado, turbilhões ou redemoinho de fogo.

Nas últimas décadas, vários estudos têm sido desenvolvidos no âmbito de compreender, quer as condições necessárias, quer o papel dos respetivos parâmetros essenciais na formação dos tornados de fogo. Parâmetros tais como, a topografia, combustíveis e o clima são importantes para compreender este fenómeno. Alexander and Thomas (2003) estudaram as condições que levaram à formação de tornados de fogo durante um incêndio perto de Santa Barbara, Califórnia, em março de 1964. Esses autores concluíram que atmosfera instável, elevadas temperaturas ao nível do solo,



humidade relativa muito baixa, ventos moderados e uma elevada carga de combustível, foram as condições que conduziram para a ocorrência deste fenómeno.

A análise das características termodinâmicas e cinemáticas deste comportamento do fogo têm sido abordadas em vários estudos analíticos (Muraszew et al., 1979; Battaglia et al., 2000; Chuah and Kushida, 2007), numéricos (Battaglia, Mcgrattan, et al., 2000; Meroney, 2003) e laboratoriais (Chuah et al., 2011; Lei et al., 2011, 2012, 2013; Shinohara and Matsushima, 2012; Kuwana et al., 2013; Pinto et al., 2017) .

Um dos primeiros estudos experimentais, foram realizados por Emmons and Ying (1967), usando uma tela rotativa para gerar vorticidade em uma fonte líquida (acetona) com apenas 10 cm de diâmetro. O tornado de fogo criado consistia em um cilindro giratório rico em combustível no seu interior e pobre em chamas no seu exterior. Os autores concluíram que a taxa de perda de massa aumentava com o aumento da circulação do ar ambiente. Outros estudos experimentais foram realizados, no entanto, a maioria deles utilizando combustíveis líquidos e gasosos.

No que se refere, à utilização de combustíveis sólidos, um dos pioneiros foi o estudo experimental realizado por Martin et al. (1976). Estes autores, utilizaram madeira empilhada com diferentes dimensões e conteúdo de humidade, a fim de medir as taxas de queima, num dispositivo cilíndrico com uma entrada de ar tangencial controlada. Este estudo permitiu concluir que parâmetros, tais como a densidade de partículas do combustível, densidade aparente, rácio área de superfície volume, taxa de empilhamento da madeira e humidade podem influenciar os resultados. No entanto, não foi possível aferir sobre outros parâmetros, nomeadamente a altura da chama, que são importantes para compreender este fenómeno.

Mais recentemente, experiências laboratoriais realizadas por Pinto et al. (2017) utilizando um *Fire Whirl Generator* e combustíveis florestais, representativos do tipo de vegetação arbustiva e florestal em Portugal, permitiram analisar diversos parâmetros tais como: a taxa de combustível, taxa de queima, a taxa de energia libertada, a altura da chama, diâmetro da chama, dimensão do leito de combustível, densidade e velocidades de entrada de ar forçado no equipamento.

Embora importantes pesquisas tenham sido realizadas para melhor compreender os mecanismos e o comportamento da formação de tornados de fogo, quer através de estudos teóricos e /ou experimentais, é difícil ainda obter resultados que estejam em concordância com os vários estudos realizados para condições semelhantes. Deste modo, os modelos teóricos ainda são limitados, o que torna necessário mais pesquisa, a fim de validar e desenvolver modelos que possam prever eficazmente e, à escala real, este tipo de comportamento fogo.

3. Previsão do campo de ventos

O vento é provavelmente o parâmetro de entrada mais importante para o cálculo da propagação do fogo. No caso dos incêndios florestais, interessa principalmente o conhecimento da velocidade e direção do vento a uma distância até ao solo equivalente a aproximadamente metade da altura da chama expectável. Neste nível vertical, o vento é muito influenciado tanto pela topografia como pela vegetação. Efeitos de grande escala (por exemplo as forças de *Coriolis*) podem ser negligenciadas, uma vez que a sua importância a tão pequena escala é muito pequena. O comportamento do campo de ventos, como um problema de dinâmica de fluidos, é governado tanto pela equação de continuidade (conservação de massa) como pelas equações de Navier-Stokes, que descrevem a conservação do momento.

Prevê-se a implementação de dois modelos diferentes para modelação do campo de ventos. Para aplicações práticas, como uma ferramenta operacional de previsão do comportamento do fogo em tempo real, é importante ter tempos computacionais que permitam uma previsão em tempo real. Isso significa que um procedimento de cálculo potencialmente demorado, como a solução do conjunto completo de equações de Navier-Stokes, não é possível nessas condições. Por outro lado, se se pretender testar diferentes cenários de incêndio para fins de planeamento, o tempo não é uma questão tão importante e cálculos mais longos não representam um problema. Tendo isso em mente, serão implementados dois modelos para o cálculo do campo de ventos.

3.1. Modelo Nuatmos

Este é um modelo cinemático linear (Ross et al., 1988) e representa um tipo de abordagem em que a equação de continuidade é resolvida numericamente em uma grelha 3D. Ele não atende aos requisitos de conservação do momento e, conseqüentemente, possui algumas limitações: os fenómenos de flutuabilidade e separação não podem ser simulados e o seu alcance de aplicabilidade é limitado a uma topografia relativamente suave. Apesar dessas limitações, as soluções fornecidas por este modelo são, na maioria dos casos, bastante realistas, com a vantagem inerente de que o código consome muito pouco tempo e é muito estável do ponto de vista numérico.

3.2. Modelo Canyon

O CANYON é um modelo que implementa as equações 3D Navier-Stokes, incluindo a equação de energia para efeitos de estabilidade e turbulência atmosférica com o modelo de turbulência *k-epsilon* (A. M. G. Lopes, 2003).

As simulações de campos de vento são realizadas numa grelha quadricular uniforme 3D, geralmente mais grossa que a grelha adotada para o cálculo da propagação do fogo. O cálculo do fluxo

.....

de vento assume um espaçamento uniforme na superfície do terreno e variação gradual do espaçamento ao longo da direção vertical. As informações da velocidade do vento local necessárias na grelha fina para o cálculo da propagação do fogo são obtidas por interpolação da grelha de vento mais grossa.



4. Topografia e combustíveis

A simulação do comportamento de um incêndio florestal assenta em dados descritivos das componentes que governam a real propagação do fogo, naquilo que na bibliografia se chama de “ambiente do fogo” (Countryman, 1972). Como se referiu atrás, estes dados dizem respeito a meteorologia, topografia e vegetação, ou combustível florestal. Já se abordou a componente meteorológica, sobretudo a velocidade e direção do vento e a sua modelação que permite a espacialização dos resultados a toda a área de cálculo. As outras duas componentes assumem papéis diferentes, mas também essenciais no processo.

4.1. Topografia

A forma como o relevo se desenvolve na superfície terrestre exerce uma influência direta e indireta na propagação e comportamento do fogo. A topografia pode ser considerada estática, apesar de existirem algumas exceções, por exemplo, as alterações provocadas pelo homem ou as decorrentes de catástrofes naturais. Os parâmetros mais importantes são o declive, a orientação, a forma e a altitude.

4.1.1. Declive

O principal efeito direto que a topografia exerce sobre o comportamento do fogo relaciona-se com o declive, ou seja, a inclinação da superfície em relação à horizontal. Genericamente podemos afirmar que o fogo se propaga mais rapidamente a subir uma encosta e mais lentamente a descer. Vários fatores contribuem para tal, podendo destacar-se o efeito conjugado dos movimentos de ar e do pré-aquecimento dos combustíveis. Numa encosta ascendente, a radiação e convecção originadas na combustão da vegetação chegam mais rapidamente e em maior quantidade aos combustíveis imediatamente acima, fazendo com que inflamem e ardam mais depressa, ao mesmo tempo que são criadas correntes ascendentes cada vez mais fortes. O contrário acontece numa encosta descendente, ou seja, a quantidade de calor que chega à vegetação contígua é tanto menor quanto menor for a inclinação.

O declive condiciona também o regime de vento local. Durante o dia existe um aquecimento da superfície terrestre, provocando correntes ascendentes. À medida que o sol desaparece, o ar arrefece, provocando correntes descendentes. Na ausência de declive estes efeitos não se fazem notar, dando lugar a outras influências, como por exemplo a entrada de correntes marítimas.

4.1.2. Orientação

A orientação diz respeito à exposição de uma dada encosta relativamente ao norte. O efeito deste parâmetro faz-se notar na quantidade de radiação incidente. No hemisfério Norte, as encostas viradas a Sul ou Sudoeste são as que recebem mais radiação, logo têm tendência a ter temperaturas

.....

mais elevadas e menor humidade relativa. Este efeito faz-se sentir nos combustíveis, que tendem a perder humidade mais rapidamente e em maior quantidade que nas encostas viradas a Norte e Este.

4.1.3. Forma do terreno

A forma ou configuração do terreno condiciona quer o fogo quer o vento. Nas planícies não há obstáculos nem a um nem a outro. Vales encaixados podem canalizar ambos. Desfiladeiros (*canyons* na terminologia inglesa) podem induzir a um comportamento extremo do fogo, o comportamento eruptivo descrito por Viegas e Simeoni (2011). Neste caso, o pré-aquecimento dá-se não só acima da zona de combustão, mas também na encosta adjacente. As montanhas podem ser barreiras ao movimento horizontal do vento atmosférico, mas condicionam o vento local. Ravinas podem por si só limitar a propagação do fogo, à semelhança de outras barreiras naturais como afloramentos rochosos ou corpos de água.

4.1.4. Altitude

O efeito da altitude faz-se notar indiretamente, pois influencia o clima e meteorologia local. De um modo geral, a temperatura diminui em altitude e a precipitação e vento aumentam, condicionando as características da vegetação (Mermoz et al., 2005).

4.1.5. Inclusão da topografia na simulação do comportamento do fogo

Para efeitos de utilização num sistema de simulação do comportamento do fogo, a topografia é usualmente descrita em mapas de formato matricial, ou *raster*, onde as respetivas células representam as características descritas atrás. O Modelo Digital de Elevação (MDE ou DEM na literatura inglesa) ou Modelo Digital de Terreno (MDT ou DTM na literatura inglesa) descreve espacialmente as características da topografia, sendo que cada célula representa o valor da altitude média (usualmente em relação ao nível médio da superfície das águas do mar) da área que representa.

As necessidades dos atuais sistemas de simulação não são iguais. Alguns requerem como dados de entrada a discretização de todas as variáveis, como a elevação, o declive e a orientação, por exemplo o FlamMap (Finney, 2006), mas outros apenas exigem a elevação, sendo as restantes características calculadas pelo próprio sistema, por exemplo o FireStation (Lopes et al., 2017). O sistema IMFIRE, assim como o sistema agora concetualizado para o rePlant encaixam nesta última categoria.

Alguns dos efeitos indiretos da topografia são incluídos noutros parâmetros da simulação. Por exemplo, a influência da exposição reflete-se no tipo de vegetação (modelos de combustível) e na humidade dos combustíveis.

4.2. Combustíveis

Todo o material vegetal, morto ou vivo, de diferentes formas e dimensões, com diferentes propriedades físicas, químicas e térmicas, pode ser considerado como combustível potencial com capacidade para dar início e propagar um fogo (Ribeiro, 2011). O combustível florestal, outro dos componentes do ambiente do fogo, é o principal fator que determina se um fogo se inicia, a dificuldade de controlá-lo e a probabilidade de este exibir um comportamento extremo ou irregular.

Se a topografia tem metodologias e ferramentas específicas para ser descrita e mapeada, já a descrição dos combustíveis reveste-se de uma grande complexidade.

4.2.1. Descrição dos combustíveis

A vegetação é composta por partículas de diferentes formas e dimensões, com diferentes características, algumas delas com grande impacto na maneira como a combustão se desenvolve, quer em termos de velocidade, quer de intensidade. Estas características mais importantes das partículas ou elementos combustíveis são:

- Forma (caracterizada pela relação superfície/volume)
- Tamanho
- Composição química
- Inflamabilidade
- Densidade
- Teor de humidade

Por outro lado, as partículas ou elementos combustíveis formam no seu conjunto leitos de combustível, que têm também características próprias que condicionam a propagação do fogo. As principais características são:

- Carga de combustível
- Altura do leito
- Compactação e porosidade
- Continuidade
- Combustibilidade

Os modelos de propagação do fogo necessitam da quantificação de todas estas características para poderem ser calculados.

4.2.2. Modelos de combustível

É fácil perceber que é praticamente impossível descrever o espaço natural com o detalhe que os modelos (e conseqüentemente os simuladores) necessitam. Assim, torna-se necessário recorrer a generalizações, ou seja, é preciso assumir valores médios para uma determinada área. A forma



encontrada para o fazer foi a criação dos chamados modelos de combustível (Albini, 1976), que podem ser definidos como “uma simplificação da heterogeneidade de características que define uma determinada formação combustível transformando-as num conjunto reduzido de parâmetros quantificáveis que podem ser utilizados como dados de entrada nos sistemas de previsão do comportamento do fogo” (Ribeiro, 2011). Estes modelos quantificam os parâmetros que são necessários no modelo de Rothermel (1972). Os mais comumente utilizados, num conjunto de 14, são os desenvolvidos no *National Forest Fire Laboratory*, conhecidos por modelos NFFL (Albini, 1976) ou modelos de Anderson (Anderson, 1982).

Tabela I - Modelos de combustíveis NFFL.

	Model	Fuel load (kg/m ²)				S/V ratio (cm ² /cm ³)		Depth (m)	Heat content (kJ/kg)	Extinction moisture (%)
		Dead fuels			Live woody (Ø<6 mm)	1-hr	Live woody			
		1-hr	10-hr	100-hr						
Urban/water	URBANO	0	0	0	0	0	0	0	0	
Herbaceous	HER-01	0.3	0	0	0	80	-	0.35	18000	30
	MAT-01	0.2	0	0	0.7	60	60	0.4	22500	40
Shrubs	MAT-02	0.4	0	0	1.0	60	60	1.0	22700	40
	MAT-03	0.7	0	0	1.4	60	60	1.4	22700	40
	PPIN-02	0.6	0.5	0.2	0	60	-	0.35	21000	50
Pine stands	PPIN-03	0.6	0.3	0.1	0	60	60	0.3	21000	50
	PPIN-04	0.7	0.3	0.2	0.6	60	60	0.7	22000	50
	PPIN-05	0.4	0.2	0.1	0.1	60	60	0.1	21000	40
	EUC-01	0.4	0	0	0	55	-	0.04	20000	25
Eucalyptus stands	EUC-02	0.6	0.3	0.1	0	55	-	0.2	20000	25
	EUC-03	0.7	0.4	0.4	0.6	55	60	0.6	22000	40
	EUC-04	0.8	0.3	0.6	0	55	-	0.25	20000	40
	FOLC-01	0.3	0.3	0.2	0	79	-	0.06	18500	21
Logging slash	RESE-01	0.7	0.7	0.5	0	55	-	0.3	22000	30

Estes modelos têm sido aplicados um pouco por todo mundo, quer diretamente, quer com diferentes adaptações locais. A sua identificação baseia-se na análise dos combustíveis de superfície que são responsáveis pela propagação do fogo de superfície, muitas vezes com recurso a catálogos fotográficos (Anderson, 1982; Cruz, 2005). Também em Portugal eles são usados, estando a sua descrição adaptada à realidade nacional dos Guias Técnicos de apoio à elaboração dos Planos Municipais de Defesa da Floresta Contra Incêndios (AFN, 2012).

4.2.3. Inclusão dos combustíveis na simulação do comportamento do fogo

A forma de descrever espacialmente a vegetação, ou combustível florestal, é também sob a forma matricial ou *raster*, mas desta vez cada célula representa o modelo de combustível que predomina na área por ela representada. A utilização dos modelos de combustível para prever o comportamento do fogo assenta em dois pressupostos: 1) assume-se que a formação combustível que se modeliza é homogénea, o que na natureza é quase impossível e 2) assume-se que o comportamento do fogo nessa formação combustível se mantém em equilíbrio durante um tempo considerável e pode ser predito.

O modelo de propagação de Rothermel restringe-se à propagação dos fogos de superfície, sendo que também os modelos de combustível apenas descrevem este estrato. Modelos de propagação mais complexos com módulos para cálculo de fogos de copas ou projeções de partículas exigem a quantificação de outros parâmetros dos combustíveis, como o volume ou a altura da base da copa. Este tipo de modelos são ainda hoje muito incertos e com requisitos que raramente se conseguem atingir. O IMFIRE, e a plataforma rePLANT assentam no modelo de Rothermel, assumindo o desafio de continuar o seu desenvolvimento baseado na ciência, por forma a vir a incluir modelos específicos para outros tipos de comportamento do fogo, que não o de superfície, e que foram já abordados atrás.

5. Fontes de dados

Os dados a usar nas simulações serão de acesso geral livre, com exceção dos obtidos nas estações meteorológicas a implementar nas próprias infraestruturas durante o projeto. Esses não são de acesso livre ao público, mas são-no ao sistema de simulação.

Conforme se mencionou anteriormente, prevê-se a interligação deste sistema com o sistema IMFIRE, o que se traduz numa significativa diminuição das necessidades de dados de entrada fornecidos pelo sistema rePLANT. O sistema IMFIRE possui já integrados mecanismos para procurar e importar de forma automática dados relativos a terreno, vegetação e meteorologia, de acesso livre. O sistema rePLANT terá que assegurar dados relativos à localização de eventuais ignições e de meteorologia da sua rede de estações. Está também prevista a possibilidade de serem utilizados, de forma complementar, os alarmes de ignição que são gerados no site da ANEPC.

Tabela II - Dados de entrada utilizados para as simulações do comportamento do fogo e a respetiva origem.

Tipo de dados	Fontes	Link
Modelo Digital de Terreno	<i>Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Digital Elevation Model V3</i> , obtido a partir dos arquivos da NASA.	https://search.earthdata.nasa.gov
Mapa e parâmetros dos modelos de combustível	Mapa descritivo de Portugal Continental obtido no site do ICNF ² .	http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/cartografia-dfci
Humidade dos combustíveis	Dados disponibilizados online na plataforma MCFire ³ . Cenários horários de THC modelados para dias de risco extremo, muito elevado e elevado.	www.adai.pt/mcfire
Meteorologia observada	Dados obtidos a partir das estações meteorológicas instaladas no sistema rePLANT. Dados da rede de Estações Meteorológicas Automáticas do IPMA.	http://multisites.ipma.pt/anpc/observacao-superficie/
Meteorologia prevista ⁴	Dados de previsão do IPMA.	http://mf2.ipma.pt/continente
Ignições	Obtidas a partir do site da ANEPC em tempo real, ou introduzidas manualmente no sistema. Dados obtidos a partir dos sistemas de deteção e localização de ignições rePLANT.	

² Os modelos de combustível utilizados são os modelos padronizados NFFL, desenvolvidos nos Estados Unidos, e cujos parâmetros se podem obter na literatura especializada (Anderson, 1982).

³ Dados referentes a uma base de dados com cerca de 30 anos, cruzada com a tipificação dos dias de risco de incêndio florestal do IPMA. Estes dados são disponibilizados online na plataforma do projeto MCFire, liderado pela ADAI (integrante do parceiro UC).

⁴ Na eventualidade de não existirem estações meteorológicas na zona de cálculo, ou na necessidade de fazer simulações para situações futuras.

6. Referências

- AFN. (2012). *Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PMDFCI). Guia Técnico*. Direção de Unidade de Defesa da Floresta. Autoridade Florestal Nacional. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas.
- AGIF. (2020). *INCÊNDIOS E TURISMO EM TERRITÓRIOS RURAIS: AUTOPROTEÇÃO E SEGURANÇA*. Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais.
- Albini, F. A. (1976). *Estimating wildfire behavior and effects*. Ogden, Utah, USA: USDA Forest Service. General Technical Report GTR INT-30. Retrieved from https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr030.pdf
- Alexander, M. . and Thomas, D. . (2003). Wildland fire behavior case studies and analyses: Value, approaches, and practical uses. *Fire Management Today*, 63(3), 4–8.
- Alexander, M. E. (1985). Estimating the length-to-breadth ratio of elliptical forest fire patterns. In L. R. Donoghue & R. E. Martin (Eds.), *Proceedings of the Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology (April 29-May 2, 1985, Detroit, Michigan)* (pp. 287–384). Society of American Foresters, Bethesda, Maryland. SAF Publication 85-04.
- Almeida, M. A. F. . (2011). *PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS POR FOCOS SECUNDÁRIOS*. Universidade de Coimbra.
- Anderson, H. E. (1982). *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122. Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, Utah 84401.
- Anderson, H. E. (1983). *Predicting wind-driven wild land fire size and shape*. Res. Pap. INT-305. Ogden, UT. USA. Department of Agriculture, Forest Service, Inter-mountain Forest and Range Experiment Station.
- Anthenien, R. a.; Tse, S. D. and Carlos Fernandez-Pello, a. (2006). On the trajectories of embers initially elevated or lofted by small scale ground fire plumes in high winds. *Fire Safety Journal*, 41(5), 349–363. <http://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.01.005>
- Battaglia, F.; Mcgrattan, K.; Rehm, R. and Baum, H. (2000). Simulating fire whirls. *Combustion Theory and Modelling*, 4(2), 123–138. <http://doi.org/10.1088/1364-7830/4/2/303>
- Battaglia, F.; Rehm, R. G. and Baum, H. R. (2000). The fluid mechanics of fire whirls: An inviscid model. *Physics of Fluids*, 12(11), 2859–2867. <http://doi.org/10.1063/1.1308510>
- Byram, G. . (1954). *Atmospheric conditions related to blowup firestle*. Station Paper SE-SP-35. Asheville, NC: USDA-Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station.
- Chuah, K. H. and Kushida, G. (2007). The prediction of flame heights and flame shapes of small fire whirls. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 II(2), 2599–2606. <http://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.109>
- Chuah, K. H.; Kuwana, K.; Saito, K. and Williams, F. A. (2011). Inclined fire whirls. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), 2417–2424. <http://doi.org/10.1016/j.proci.2010.05.102>
- Countryman, C. M. (1972). *The fire environment concept*. Berkeley, CA (USA): USDA Forest Service,

Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.

- Cruz, M.G. (1999). *Modeling the initiation and spread of crown fires*. University of Montana, Missoula.
- Cruz, Miguel 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, Miguel G.; Alexander, M. and Wakimoto, R. (2005). Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. *Canadian Journal of Forest Research- Revue Canadienne De Recherche Forestiere - CAN J FOREST RES*, 35, 1626–1639. <http://doi.org/10.1139/x05-085>
- Emmons, H. W. and Ying, S. J. (1967). The fire whirl. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 11, pp. 475–488). Elsevier. [http://doi.org/10.1016/S0082-0784\(67\)80172-3](http://doi.org/10.1016/S0082-0784(67)80172-3)
- Finney, M. (1998). *FARSITE: Fire Area Simulator – model development and evaluation. Evaluation*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Research Paper RMRS-RP-4: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Finney, M. A. and McAllister, S. S. (2011). A review of fire interactions and mass fires. *Journal of Combustion*, 2011. <http://doi.org/10.1155/2011/548328>
- Finney, Mark A. (2006). An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. In *Fuels Management - How to Measure Success: Conference Proceedings* (pp. 213–220). March 2006; Portland, OR.
- Fonda, R. . and Varner, J. . (2004). Burning Characteristics of cones from Eight Pine Species. *Northwest Science*, 78(4), 322–333. <http://doi.org/10.1093/forestscience/47.3.390>
- Grumer, J. and Strasser, A. (1965). Uncontrolled fires— Specific burning rates and induced air velocities. *Fire Technology*, 1(4), 256–268. <http://doi.org/10.1007/BF02588468>
- Huffman, K. G.; Welker, J. R. and Slipevich, C. M. (1969). Interaction effects of multiple pool fires. *Fire Technology*, 5(3), 225–232. <http://doi.org/10.1007/BF02591520>
- Kamikawa, D.; Weng, W. G.; Kagiya, K.; Fukuda, Y.; Mase, R. and Hasemi, Y. (2005). Experimental study of merged flames from multifire sources in propane and wood crib burners. *Combustion and Flame*, 142(1–2), 17–23. <http://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.02.004>
- Kourtz, P. H. and O’Regan, W. (1971). A model for a small forest fire...to simulate burned and burning areas for use in a detection model. *Forest Science*, (17), 193–169.
- Kuwana, K.; Sekimoto, K.; Minami, T.; Tashiro, T. and Saito, K. (2013). Scale-model experiments of moving fire whirl over a line fire. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2), 2625–2631. <http://doi.org/10.1016/j.proci.2012.06.092>
- Lee, S. L. and Hellman, J. M. (1969). Study of firebrand trajectories in a turbulent swirling natural convection plume. *Combustion and Flame*, 13(6), 645–655. [http://doi.org/10.1016/0010-2180\(69\)90072-8](http://doi.org/10.1016/0010-2180(69)90072-8)
- Lee, S. L. and Hellman, J. M. (1970). Firebrand trajectory study using an empirical velocity-dependent burning law. *Combustion and Flame*, 15(3), 265–274. [26](http://doi.org/10.1016/0010-</p></div><div data-bbox=)

2180(70)90006-4

- Lei, J.; Liu, N.; Lozano, J. S.; Zhang, L.; Deng, Z. and Satoh, K. (2013). Experimental research on flame revolution and precession of fire whirls. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2), 2607–2615. <http://doi.org/10.1016/j.proci.2012.06.126>
- Lei, J.; Liu, N.; Zhang, L.; Chen, H.; Shu, L.; Chen, P.; Deng, Z.; Zhu, J.; Satoh, K. and De Ris, J. L. (2011). Experimental research on combustion dynamics of medium-scale fire whirl. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), 2407–2415. <http://doi.org/10.1016/j.proci.2010.06.009>
- Lei, J.; Liu, N.; Zhang, L.; Deng, Z.; Akafuah, N. K.; Li, T.; Saito, K. and Satoh, K. (2012). Burning rates of liquid fuels in fire whirls. *Combustion and Flame*, 159(6), 2104–2114. <http://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.01.019>
- Lopes, A. M. G. (2003). WindStation—a software for the simulation of atmospheric flows over complex topography. *Environmental Modelling & Software*, 18(1), 81–96. [http://doi.org/10.1016/S1364-8152\(02\)00024-5](http://doi.org/10.1016/S1364-8152(02)00024-5)
- Lopes, A. M. G.; Cruz, M. G. and Viegas, D. X. (2002). FireStation — an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography. *Environmental Modelling & Software*, 17(3), 269–285. [http://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00072-X](http://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00072-X)
- Lopes, A. M. G. G.; Ribeiro, L. M.; Viegas, D. X. and Raposo, J. R. (2017). Effect of two-way coupling on the calculation of forest fire spread: Model development. *International Journal of Wildland Fire*, 26(9), 829–843. <http://doi.org/10.1071/WF16045>
- Manzello, S. L.; Suzuki, S.; Gollner, M. J. and Fernandez-Pello, A. C. (2020). Role of firebrand combustion in large outdoor fire spread. *Progress in Energy and Combustion Science*, 76, 100801. <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100801>
- Martin, J. and Hillen, T. (2016). The spotting distribution of wild fires. *Applied Sciences (Switzerland)*, 6(6). <http://doi.org/10.3390/app6060177>
- Martin, R. ; Pendleton, D. . and Burgess, W. (1976). Effect of fire whirlwind formation on solid fuel burning rates. *Fire Technology*, 12, 33–40.
- Mermoz, M.; Kitzberger, T. and Veblen, T. T. (2005). Landscape influences on occurrence and spread of wildfires in patagonian forests and shrublands. *Ecology*, 86(10), 2705–2715. <http://doi.org/10.1890/04-1850>
- Meroney, R. (2003). *Fire whirls, fire tornadoes, and fire storms: Physical and numerical modeling*.
- Moinuddin, K. A. M. and Sutherland, D. (2020). Modelling of tree fires and fires transitioning from the forest floor to the canopy with a physics-based model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 175(xxxx), 81–95. <http://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.05.018>
- Morvan, D.; Meradji, S. and Mell, W. (2011). Numerical Study of the Interaction between a Head Fire and a Backfire Propagating in Grassland.
- Morvan, D.; Meradji, S. and Mell, W. (2013). Interaction between head fire and backfire in grasslands. *Fire Safety Journal*, 58, 195–203. <http://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.01.027>

- Muraszew, A.; Fedele, J. B. and Kuby, W. C. (1979). The fire whirl phenomenon. *Combustion and Flame*, 34(C), 29–45. [http://doi.org/10.1016/0010-2180\(79\)90077-4](http://doi.org/10.1016/0010-2180(79)90077-4)
- Pastor, E.; Zárata, L.; Planas, E. and Arnaldos, J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2), 139–153. [http://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00017-0](http://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00017-0)
- Pinto, C.; Viegas, D.; Almeida, M. and Raposo, J. (2017). Fire whirls in forest fires: An experimental analysis. *Fire Safety Journal*, 87(August 2016), 37–48. <http://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.11.004>
- Porterie, B.; Zekri, N.; Clerc, J. P. and Loraud, J. C. (2005). Influence des brandons sur la propagation d'un feu de forêt. *Comptes Rendus Physique*, 6(10), 1153–1160. <http://doi.org/10.1016/j.crhy.2005.11.013>
- Porterie, B.; Zekri, N.; Clerc, J. P. and Loraud, J. C. (2007). Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. *Combustion and Flame*, 149(1–2), 63–78. <http://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.12.008>
- Raposo, J. (2016). *Extreme Fire Behaviour Associated with the Merging of Two Linear Fire Fronts*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Raposo, J.; Viegas, D. X.; Xie, X.; Almeida, M. and Naian, L. (2014). Analysis of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts: Comparison between laboratory and field cases. In *Analysis of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts: Comparison between laboratory and field cases* (pp. 88–94). Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra. http://doi.org/http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_8
- Ribeiro, L. M. (2011). Combustíveis Florestais. In Domingos Xavier Viegas (Ed.), *Incêndios Florestais* (pp. 29–60). Verlag Dashöfer.
- Richards, G. D. (1990). An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30(6), 1163–1179. <http://doi.org/10.1002/nme.1620300606>
- Ross, D. G.; Smith, I. N.; Manins, P. C. and Fox, D. G. (1988). Diagnostic Wind Field Modeling for Complex Terrain: Model Development and Testing. *Journal of Applied Meteorology*, 27(7), 785–796. [http://doi.org/10.1175/1520-0450\(1988\)027<0785:DWFMFC>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0450(1988)027<0785:DWFMFC>2.0.CO;2)
- Rossa, C. G.; Riardo, V. and Fernandes, P. M. (2017). On the effect of live fuel moisture content on fire rate of spread. *Forest Systems*, 26(3). <http://doi.org/10.5424/fs/2017263-12019>
- Rothermel, R. R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USDA Forest Service Research Paper INT USA. Ogden, Utah, USA: Research Paper INT-115. USDA Forest Service.
- Sardoy, N.; Consalvi, J. L.; Kaiss, A.; Fernandez-Pello, A. C. and Porterie, B. (2008). Numerical study of ground-level distribution of firebrands generated by line fires. *Combustion and Flame*, 154(3), 478–488. <http://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.05.006>
- Sardoy, N.; Consalvi, J. L.; Porterie, B. and Fernandez-Pello, A. C. (2007). Modeling transport and

- combustion of firebrands from burning trees. *Combustion and Flame*, 150(3), 151–169. <http://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.04.008>
- Shamarock, W. .; Klemp, J. .; Dudhia, J.; Gill, D. .; Barker, D. .; Wang, W. and Powers, J. . (2005). *A Description of the Advanced Research WRF Version 2*.
- Sharples, J.; Towers, I.; Wheeler, G.; Wheeler, V. and McCoy, J. (2013). Modelling fire line merging using plane curvature flow. In *20th International Congress on Modelling and Simulation* (pp. 256–262).
- Shinohara, M. and Matsushima, S. (2012). Formation of fire whirls: Experimental verification that a counter-rotating vortex pair is a possible origin of fire whirls. In *Fire Safety Journal* (Vol. 54, pp. 144–153). Elsevier. <http://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.03.009>
- Sullivan, A. L. (2009a). Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4), 349. <http://doi.org/10.1071/WF06143>
- Sullivan, A. L. (2009b). Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4), 369. <http://doi.org/10.1071/WF06142>
- Tarifa, C. .; Notario, P. .; Moreno, F. . and Villa, A. . (1967). *Transport and Combustion of Firebrands. Final Report of Grants FG-SP-114 and FG-SP-146*.
- Tarifa, C. S.; Notario, P. P. and Moreno, F. . (1965). On the flight paths and lifetimes of burning particles of wood. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 10, pp. 1021–1037). Elsevier. [http://doi.org/10.1016/S0082-0784\(65\)80244-2](http://doi.org/10.1016/S0082-0784(65)80244-2)
- Thomas, C. .; Sharples, J. . and Evans, J. (2015). Pyroconvective interaction of two merged fire lines: curvature effects and dynamic fire spread. In *MODSIM2015, 21st international congress on modelling and simulation* (pp. 312–318).
- Thomas, C. .; Sharples, J. . and Evans, J. . (2017). Modelling the dynamic behaviour of junction fires with a coupled atmosphere–fire model. *International Journal of Wildland Fire*, 26, 331. <http://doi.org/10.1071/WF16079>
- Van Wagner, C. E. (1993). Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 442–449.
- Viegas, D. X.; Almeida, M.; Raposo, J.; Oliveira, R. and Viegas, C. X. (2014). Ignition of Mediterranean Fuel Beds by Several Types of Firebrands. *Fire Technology*, 50(1), 61–77. <http://doi.org/10.1007/s10694-012-0267-8>
- Viegas, D. X. and Simeoni, A. (2011). Eruptive Behaviour of Forest Fires. *Fire Technology*, 47(2), 303–320. <http://doi.org/10.1007/s10694-010-0193-6>
- Viegas, D. X. (2005). A Mathematical Model For Forest Fires Blowup. *Combustion Science and Technology*, 177(1), 27–51. <http://doi.org/10.1080/00102200590883624>
- Viegas, D. X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 169–177.

- Viegas, D.X.; Almeida, M.; Raposo, J. and Davim, D. (2012). Experimental forest fire research. In *15th International Conference on Experimental Mechanics* (p. Vol. 3128, pp 1–11).
- Wang, C.; Guo, J.; Ding, Y.; Wen, J. and Lu, S. (2015). Burning rate of merged pool fire on the hollow square tray. *Journal of Hazardous Materials*, 290, 78–86. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.069>
- Werth, P. A.; Potter, B. E.; Alexander, M. E.; Cruz, M. G.; Clements, C. B.; Finney, M. A.; Forthofer, J. M.; Goodrick, S. L.; Hoffman, C.; Jolly, W. M.; Mcallister, S. S.; Ottmar, R. D. and Parsons, R. A. (2016). *Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior: Volume 2 for Fire Behavior Specialists, Researchers, and Meteorologists* (Vol. 2). Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-891. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Wragg, P. D.; Mielke, T. and Tilman, D. (2018). Forbs, grasses, and grassland fire behaviour. *Journal of Ecology*, 106(5), 1983–2001. <http://doi.org/10.1111/1365-2745.12980>