



Interreg
España - Portugal

Fondo Europeo de Desarrollo Regional



**LUCHA CONTRA EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

INTERCOMPARAÇÃO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM MODELOS ATMOSFÉRICOS ACOPLADOS A MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE FOGO



AÇÃO "4.1."

PROGRAMA "4.1.2."

PROJETO "4.1.2.8"

ENTREGÁVEL "I.1.2.7"

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Autores: Flavio Tiago Couto

Rui Salgado

Jean-Baptiste Filippi

Roberta Baggio

Stergios Kartsios

Rita Cardoso

Pedro Soares

Cátia Campos

O presente relatório apresenta os principais resultados obtidos a partir da realização do Projeto 4.1.2.8. O trabalho desenvolvido pela equipa da *Universidade de Évora* (Flavio Tiago Couto, Cátia Campos, Rui Salgado) contou com a colaboração de investigadores da *Università di Corsica*, Corte, França (Jean-Baptiste Filippi & Roberta Baggio), *Aristotle University of Thessaloniki*, Tessalónica, Grécia (Stergios Kartsios), *Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, Lisboa (Rita Cardoso & Pedro Soares).

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	4
2. MODELAÇÃO DA ATIVIDADE PIRO-CONVECTIVA NO MEGA INCÊNDIO DE PEDRÓGÃO GRANDE	5
2.1 SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL COM RESOLUÇÃO DE 2.5 KM E 500 M (MESONH/FOREFIRE).....	6
2.2. SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO "ONE-WAY" (MESONH/FOREFIRE).....	9
2.3. SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO "TWO-WAY" (MESONH/FOREFIRE).....	15
2.4 SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO "TWO-WAY" (WRF/FIRE).....	20
3. MODELAÇÃO DA ATIVIDADE PIRO-CONVECTIVA NO MEGA INCÊNDIO DE QUIAIOS	31
3.1. SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO "ONE-WAY" (MESONH/FOREFIRE).....	32
3.2. SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO "TWO-WAY" (WRF/SFIRE)	38
4. NOTAS FINAIS	43
5. AGRADECIMENTOS	44
6. REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais extremos estão frequentemente associados a fortes processos convectivos devido ao calor e à humidade libertados pelos incêndios. Tal ambiente de acoplamento entre fogo e atmosfera pode levar à formação de nuvens convectivas, também conhecidas como nuvens PyroCumulus (PyroCu) ou PyroCumulonimbus (PyroCb). As primeiras são mais comuns e podem se formar como nuvens relativamente pequenas acima das plumas de fogo. As segundas podem ser observadas em incêndios florestais dominados por plumas transportadas em colunas de convecção muito intensa, acima das quais nuvens semelhantes a cumulonimbus (Cb) se formam. Os processos microfísicos, como a condensação de humidade na pluma de incêndio, podem aumentar a convecção libertando calor latente. Em determinadas situações, as correntes ascendentes conseguem mesmo penetrar as camadas mais baixas da estratosfera [Fromm & Servranckx, 2003; Fromm et al., 2010]. A atividade do PyroCb pode ter um impacto significativo no comportamento do fogo por meio de processos de feedback entre a atmosfera e o fogo, incluindo o rápido aumento da área ardida. Nestas situações, a rápida propagação das frentes do fogo é induzida pelas fortes variações na direção e velocidade do vento à superfície. As alterações no campo do vento à superfície podem ocorrer devido a movimentos convectivos criados no ambiente do fogo, a partir de correntes descendentes intensas [e.g., Tory et al., 2018; Dowdy et al., 2019]. As nuvens de trovoadas criadas a partir do incêndio podem também dar início a outros incêndios a partir de descargas elétricas [Lang et al., 2014]. Muitos desses incêndios extremos dão origem a mega incêndios, os quais estão associados a áreas ardidas superiores a 10.000 hectares. Apesar de serem uma minoria em relação ao total de incêndios, os mega incêndios são os que mais impactam negativamente a sociedade e o meio ambiente [Bento-Gonçalves, 2021; Duane et al., 2021; Tedim et al., 2020].

Em geral, os modelos atmosféricos não levam em conta os efeitos dos incêndios. No entanto, os avanços computacionais permitem um aumento na resolução das simulações numéricas, bem como o desenvolvimento de modelos

acoplados fogo-atmosfera, que ajudam a compreender e representar atempadamente o comportamento do fogo e contribuem assim para a proteção de civis e bombeiros. Especificamente, simular os efeitos acoplados entre fogo e atmosfera tem sido objeto de muitos esforços nos últimos anos [Mandel et al. 2014; Coen et al., 2020; Filippi et al., 2018].

Em 2017, uma temporada de incêndios extremos afetou dramaticamente Portugal continental. O primeiro evento mortal ocorreu em junho na região de Pedrógão Grande e causou mais de 60 vítimas mortais [e.g., Relatório CTI, 2017; Couto et al., 2020]. Em meados de outubro, um conjunto de incêndios florestais extremos devastaram a região Centro de Portugal continental, resultando em 48 vítimas mortais [Guerreiro et al., 2018]. A primeira parte deste relatório apresenta os resultados do trabalho realizado para o evento de “Pedrógão Grande e Góis”, enquanto a segunda apresenta os resultados obtidos para o mega incêndio de Quiaios de outubro de 2017. Em ambos estudos, o objetivo principal foi o de testar, afinar e validar o acoplamento de modelos atmosféricos a modelos de propagação de fogo, e utilizar os modelos acoplados para investigar as principais características de atividade piro-convectiva.

2. MODELAÇÃO DA ATIVIDADE PIRO-CONVECTIVA NO MEGA INCÊNDIO DE PEDRÓGÃO GRANDE

Esta secção apresenta resultados das experiências numéricas realizadas para os incêndios ocorridos em Pedrógão Grande e Góis em 17 de junho de 2017. As condições meteorológicas durante os eventos foram descritas anteriormente no Entregável G.1.2.7 [Couto & Salgado, 2019]. Para investigar a atividade piro-convectiva, foram realizadas simulações numéricas com o modelo atmosférico Meso-NH acoplados ao modelo de propagação de fogo ForeFire.

2.1 SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL COM RESOLUÇÃO DE 2.5 KM E 500 M (MESONH/FOREFIRE)

O Meso-NH é um modelo não-hidrostático capaz de representar os movimentos atmosféricos em diferentes escalas, implementado com um pacote de parametrização bastante completo dos processos físicos na atmosfera [Lac et al., 2018]. O ForeFire é um modelo de propagação de fogo [Filippi et al., 2009, 2011] que permite o cálculo da evolução temporal da frente do fogo e a emissão de fluxos de energia e massa para a atmosfera. O modelo tem em conta a inclinação do terreno, propriedades atmosféricas (velocidade do vento, densidade do ar e temperatura do ar), a distribuição espacial e as características dos combustíveis, e assume que o fogo se propaga na direção normal à linha da frente.

O Meso-NH é um modelo atmosférico desenvolvido em França pela Météo-France e o Laboratório de Aerologia da Universidade de Toulouse [Lac et al., 2018]. É o modelo de investigação utilizado na Météo-France para testar novas parametrizações e módulos numéricos que depois são transferidos para os modelos operacionais utilizados por este serviço meteorológico e muitos outros na Europa, incluindo o IPMA em Portugal: AROME, HARMONIE e ARPEGE. Os desenvolvimentos efetuados e testados no Meso-NH poderão assim, depois de validados, vir a ser introduzidos nos modelos operacionais. Este é um dos motivos pelos quais a Universidade de Évora trabalha há mais de 20 anos com o Meso-NH (e.g. Salgado, 2005), participando no seu comité de pilotagem e tendo utilizado este modelo para variados estudos, nomeadamente sobre o impacto dos lagos na atmosfera (Salgado, 2005; Iakunin et al., 2018, 2022), eventos de precipitação intensa (Couto et al., 2012, 2016 e 2017), a formação de nevoeiros (Policarpo et al., 2017); o transporte de aerossóis na atmosfera (Santos et al., 2013; Couto et al., 2021); a previsão do recurso solar (Pereira et al. 2019, 2022). Recentemente, no quadro do CILIFO tem sido utilizado em aplicações à meteorologia dos fogos. Espera-se que num futuro próximo, o desenvolvimento e teste do acoplamento do Meso-NH a modelos de propagação de fogo, processo em que se participa em colaboração com a Météo-France e a Universidade da

Córsega, permita obter um sistema operacional útil não só ao estudo, mas também ao apoio ao combate aos incêndios florestais.

A primeira experiência utilizando o código acoplado MesoNH/ForeFire foi realizada com dois domínios aninhados (Figura 2.1). O domínio maior (Figura 2.1a) com 2.5 km de resolução (200×300 pontos da grelha) e um domínio menor (Figura 2.1b) de 500 m de resolução (450×300 pontos da grelha). Nesta experiência, o ForeFire foi acoplado ao domínio de 500 m de resolução e utilizado para injetar uma quantidade de energia igual a 10 MJ na atmosfera. A emissão dos fluxos de calor e humidade seguiram o mapa de propagação do fogo construído com base no mapa apresentado no Relatório CTI (2017). A experiência numérica considerou somente o incêndio de Pedrógão Grande.

A Figura 2.2 mostra um exemplo dos resultados em diferentes perspetivas. O domínio de 500 m de resolução proporcionou verificar o transporte da pluma de fumo para Sul a partir do ponto de ignição (Figura 2.2a), enquanto Figuras 2.2b e 2.2c mostram que a pluma de fumo atingiu os níveis superiores da atmosfera. Essa experiência ajudou a levantar questões que foram importantes para o desenvolvimento do trabalho apresentado na próxima secção, em particular sobre os impactos de atividade piro-convectiva extrema na atmosfera.

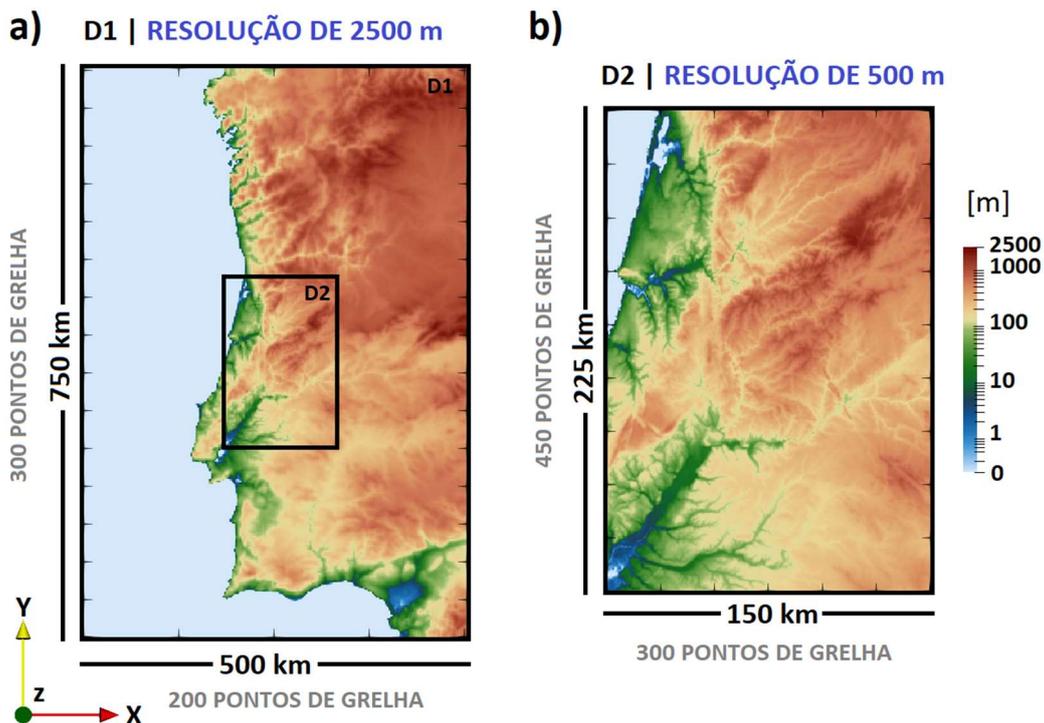


Figura 2.1. Configuração do modelo MesoNH, **a)** domínio com resolução de 2.5 km, e **b)** domínio com resolução de 500 m.

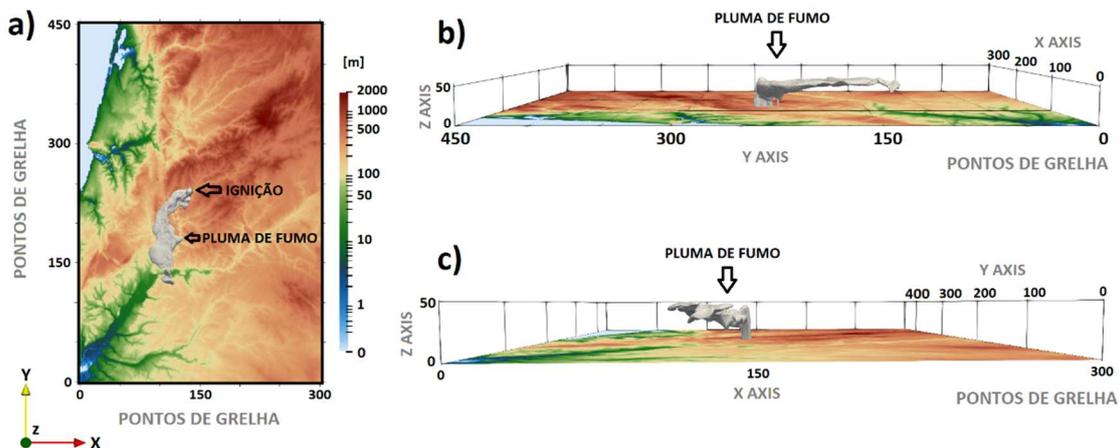


Figura 2.2. Simulação da pluma de fumo a partir do acoplamento dos modelos MesoNH e ForeFire às 1630 UTC do dia 17 de junho de 2017: **a)** vista 2D da pluma de fumo estendendo-se para Sul do ponto de ignição, **b)** e **c)** vista 3D da pluma de fumo.

2.2. SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO "ONE-WAY" (MESONH/FOREFIRE)

Para resolver o desenvolvimento do sistema fogo-atmosfera, a capacidade de aninhamento de grelhas do modelo Meso-NH foi utilizada com três domínios aninhados (Figura 2.3a). Várias simulações foram efetuadas visando obter o cenário mais realista do evento. A resolução da grelha horizontal é de 2000 m para o domínio externo cobrindo 600 km × 600 km. As grelhas internas têm resoluções de 400 m e 80 m, cobrindo uma área total de respetivamente 120 km × 120 km e 24 km × 24 km. O passo de tempo utilizado foi de 10 s para o domínio mais externo e diminuiu para 2 s e 0.5 s para os domínios mais finos. As condições iniciais e de fronteira para o domínio externo foram fornecidas pelas análises do Centro Europeu "European Centre for Medium-Range Weather Forecasts" (ECMWF), com atualizações a cada 6 h. A simulação com a resolução mais grosseira começou a 17 de junho de 2017 às 0600 UTC, com um *downscaling* progressivo até a resolução mais alta a partir de 1300 UTC. A resolução vertical é idêntica para todos os domínios aninhados, com 50 níveis até 20 km e um primeiro nível a 30 m de altura acima do solo.

EXPERIÊNCIA DE "PEDRÓGÃO GRANDE" E "GÓIS"

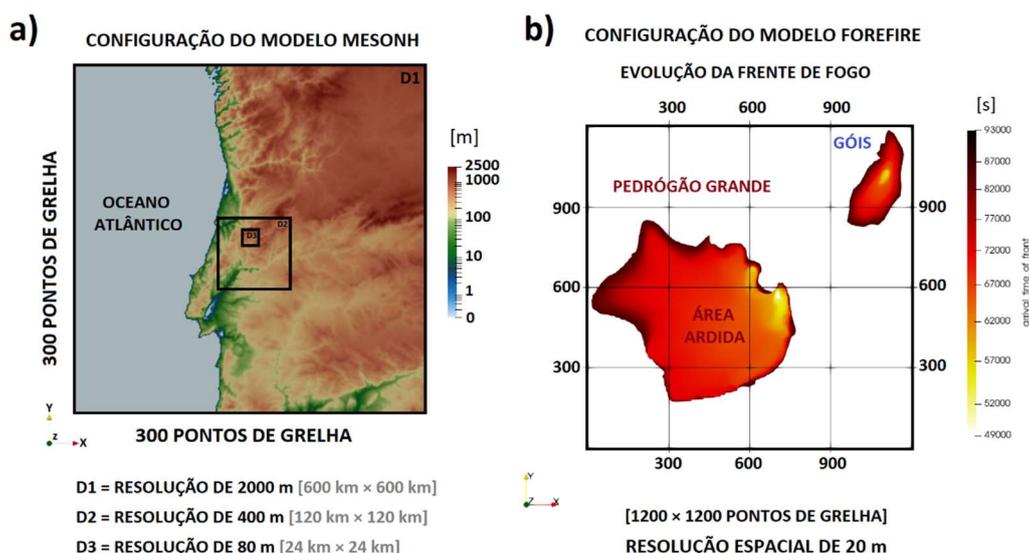


Figura 2.3. Configuração da experiência numérica de Pedrógão Grande e Góis **a)** grelha horizontal do MesoNH e **b)** grelha do modelo de propagação de fogo ForeFire com respetiva área ardida usada.

Todos os modelos aninhados recorreram a um o esquema de fecho da turbulência de ordem um e meio. Os dois domínios de resolução mais alta (D2 e D3) utilizaram a versão 3D do esquema, enquanto o primeiro domínio (D1) considerou apenas a versão 1D, negligenciando os fluxos turbulentos horizontais. O modelo de propagação de fogo foi configurado em uma grelha de resolução de 20 metros e 1200×1200 pontos de grelha (Figura 2.3b). A Figura 2.3b mostra a evolução da frente de fogo e consequente área ardida utilizada neste trabalho, a qual foi definida a partir dos mapas de propagação do fogo apresentados no Relatório CTI (2017) e em Pinto et al. (2022).

Considerando que a região de estudo está coberta por grandes áreas de floresta, o combustível foi considerado homogéneo, seguindo o modelo de combustível 11 de Anderson (1982) com uma carga média de queima de combustível de $2,5 \text{ Kg/m}^2$ a 30% de humidade ($0,75 \text{ Kg}$ de água, $1,75 \text{ kg}$ de combustível). Admite-se que entalpia de combustão é dada por $D_h = 1,5 \times 10^7 \text{ J/kg}$ e a evaporação $D_{hw} = 2,3 \times 10^6 \text{ J/kg}$, o que resulta numa energia total libertada, após a secagem, de $2,4525 \times 10^7 \text{ J/m}^2$. Assume-se que apenas 40% dessa energia vai ser transferida diretamente para a atmosfera, pois a combustão pode ser incompleta e grande parte da energia é transferida por radiação para o solo e para o espaço e para aquecer o combustível até à pirólise. Os $0,75 \text{ kg/m}^2$ e vapor de água e os $10 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ de energia são enviados para a atmosfera (introduzidos no primeiro nível do modelo atmosférico) sobre o local da frente de fogo assumindo uma duração de queima de 1000s, o que resulta em fluxos instantâneos de $0,75 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}$ de vapor de água e 10 kW.m^{-2} . Uma descrição mais detalhada sobre o cálculo dos fluxos de calor no modelo ForeFire pode ser encontrado em Filippi et al. (2009, 2018). A pluma de fumo é ilustrada utilizando a variável de concentração relativa do traçador de fumo (S), uma variável escalar unitária, emitida onde e quando o fogo está presente. Atualmente a variável S é simplesmente um traçador não interagindo com outros módulos do modelo, não sendo tido em conta nos processos da microfísica das nuvens nem na

transferência radiativa. A descrição da variável S pode ser encontrada em Baggio et al. (2022).

A Figura 2.4a mostra a variável S representando a frente de fogo à superfície, bem como a forte interação fogo-atmosfera, com o fogo induzindo intensas correntes convectivas ascendentes, as quais estiveram associadas a movimentos turbulentos por toda a troposfera (Figura 2.4a). Essas correntes ascendentes contribuíram para o transporte vertical de vapor de água para níveis superiores, como pode ser visto na Figura 2.4b. A simulação revela o grande impacto do incêndio de Pedrógão Grande na atmosfera através do desenvolvimento de uma nuvem convectiva verticalmente extensa.

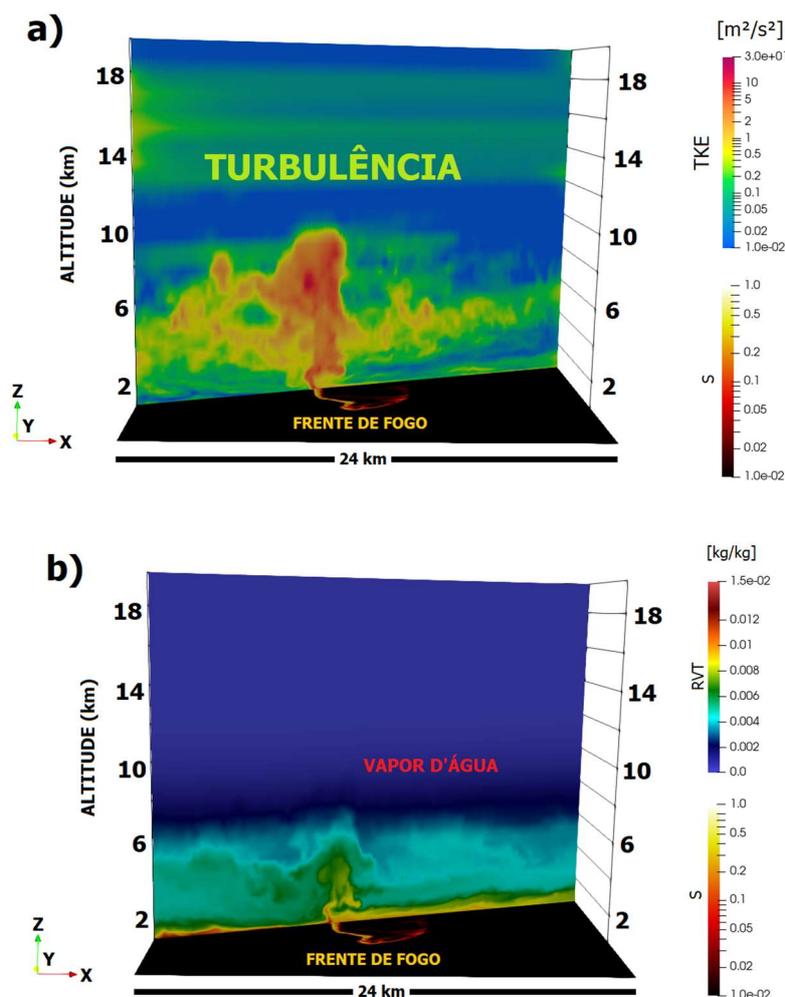


Figura 2.4. Secção vertical intersectando o incêndio de Pedrógão Grande, **a)** energia cinética turbulenta e **b)** razão de mistura do vapor de água. Resultados da simulação no domínio com 80 m de resolução espacial.

A Figura 2.5 mostra que a pluma está associada a uma nuvem de PyroCb, que resulta da condensação no interior da pluma de fumo. Tal nuvem é representada por cinco espécies de hidrometeoros (gotículas de nuvem, gotas de chuva, graupel, neve ou agregados, cristais de gelo). A convecção associada ao incêndio penetrou a troposfera superior acima de 10 km de altitude. A atividade piro-convectiva extrema também foi verificada na simulação pelo desenvolvimento de correntes descendentes intensas originadas abaixo dos níveis médios a partir da nuvem PyroCb (Figura 2.6).

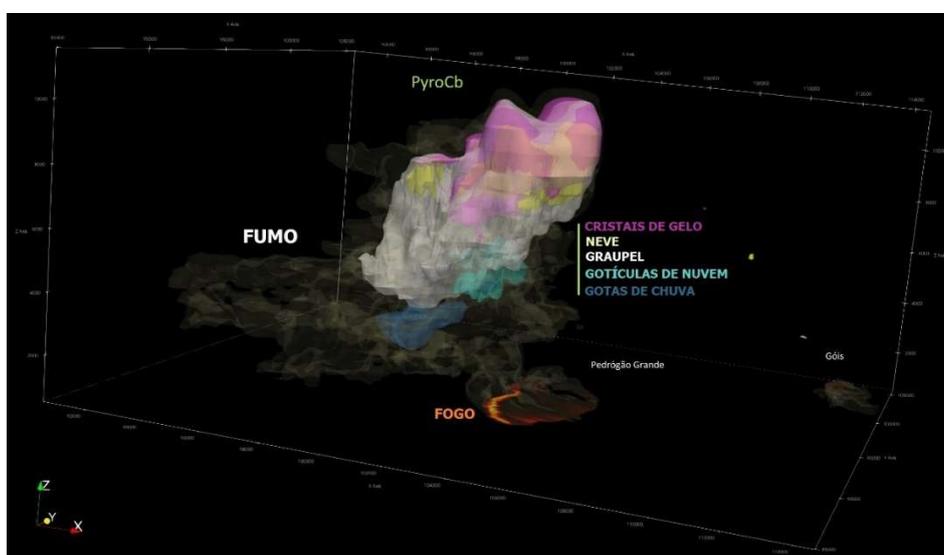


Figura 2.5. Vista 3D da anatomia do PyroCb simulado com 80 m de resolução no episódio de Pedrógão de Grande. A figura representa o fumo e as diferentes espécies de hidrometeoros.

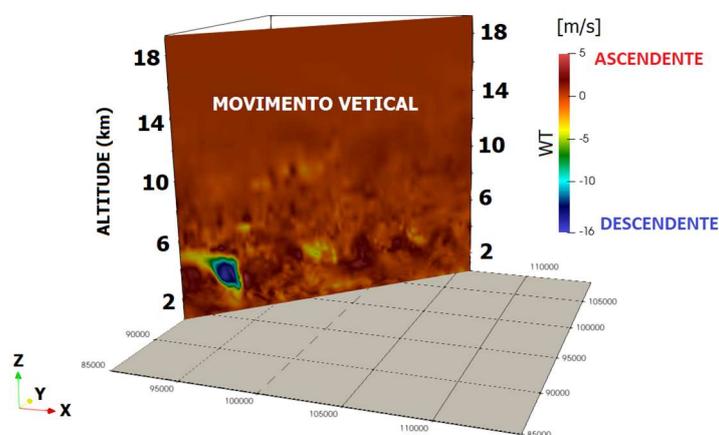
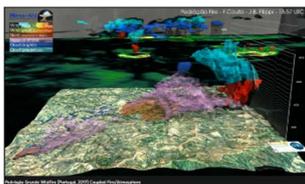


Figura 2.6. Secção vertical do campo de movimento vertical simulados com 80 m de resolução espacial.

Os resultados indicam que o modelo, quando configurado em alta resolução temporal e espacial, é capaz de representar a altura da pluma piro-convectiva de um incêndio florestal e os principais processos associados à interação do fogo com a atmosfera. No mega incêndio de Pedrógão Grande, a violenta convecção provocada pelo fogo manifestou-se na formação de uma nuvem PyroCumulonimbus. É importante notar que um dos objetivos foi o de produzir uma análise meteorológica de referência de alta resolução (10s, 80m) que ajude a compreender o comportamento da linha de fogo de referência, construído a partir do relatório oficial. Dessa forma o fogo foi forçado garantindo-se uma representação realista da sua evolução podendo analisar-se os seus efeitos na atmosfera. No entanto, com esta metodologia o impacto da atmosfera na evolução da frente de fogo não foi simulado. O estudo ajudou a compreender melhor o evento piro-convectivo, nomeadamente os processos atmosféricos em contexto de microescala. No geral, uma melhor compreensão desses eventos é importante para melhorar a compreensão da piro-convecção e do comportamento da atmosfera em eventos extremos de incêndio.

A simulação apresentada nesta secção encontra-se disponível em formato de vídeo em <https://www.youtube.com/watch?v=PqmioPbASWM>.



Flavio Couto, Jean-Baptiste Filippi, Roberta Baggio & Rui Salgado (April, 2022) Pedrógão Grande Wildfire (Portugal, 2017) Coupled Fire/Atmosphere. The coupled simulation performed with the MesoNH and ForeFire models (forced behavior, reconstructed firelines from observations) is available in video form at youtube in <https://www.youtube.com/watch?v=PqmioPbASWM>.

A análise completa desta simulação é apresentada em um manuscrito o qual se encontra atualmente em revisão por pares (peer review) na revista científica de circulação internacional *Atmospheric Research* (<https://www.sciencedirect.com/journal/atmospheric-research>).

Título: Modelling a PyroCb cloud during Pedrógão Grande mega fire using the MesoNH/ForeFire coupled code

Autores: Flavio Tiago Couto^{1,2,3,4}, Jean-Baptiste Filippi⁵, Roberta Baggio⁵, Cátia Campos^{1,2,3}, Rui Salgado^{1,2,3,4}

¹ Instituto de Ciências da Terra – ICT (Polo de Évora), Universidade de Évora, Évora, Portugal.

² Instituto de Investigação e Formação Avançada – IIFA, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

³ Earth Remote Sensing Laboratory (EaRS Lab), Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁴ Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁵ Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Sciences Pour l'Environnement – Unité Mixte de Recherche 6134, Università di Corsica, Campus Grossetti, Corte, France.

Resumo/Abstract

Understanding the development of fire-generated thunderstorms in mega fire events is important given their high impact on the evolution of the fire fronts, where the fire spread becomes highly unpredictable and difficult to suppress. This study aims to investigate numerically the influence of strong pyro-convective activity on the local atmospheric conditions by means of a numerical simulation based on the coupled Meso-NH/ForeFire code. It is the first time that such coupled code, combining a numerical weather prediction model (NWP) with a fire propagation model, is applied to the study of extreme pyro-convective activity. More specifically, we study numerically the Portuguese Pedrógão Grande mega fire, which was one of the most destructing and deadliest wildfire hazards affecting the Mediterranean region in the recent years. In order to combine numerical efficiency with the high spatio-temporal resolution needed in the proximity of the fire, The Meso-NH NWP simulation was set up on three nested domains with horizontal resolutions of 2000 m, 400 m, and 80 m respectively. The spatio-temporal propagation of the wildfire was assigned a priori on the basis of the official investigations reports. The impact of the fire evolution and of the ensuing heat and water vapour emissions on the local atmospheric conditions is accounted explicitly by using the ForeFire model. The simulation, configured with very-high spatial and temporal resolutions, was capable to resolve the intense convective column reaching the upper troposphere and the fast development of the associated cloud system. The numerical fire produced intense updraughts with vertical velocities above 15 m/s, whereas the associated PyroCb cloud was composed by five different hydrometeor species along the main convective column and reached an altitude of 10 km. It is remarkable that the numerical experiment reproduced phenomena occurring at a fine scale related to cloud microphysics, such as very-localised outflows. This study, based on a coupled numerical simulation, was capable to illustrate in detail the development of a PyroCb cloud from strong pyro-convective activity, thus supporting the hypothesis that such a cloud system may be predicted numerically to contribute to firefighting strategies.

Keywords: PyroCb; Mega fires; Meso-NH model; ForeFire model; Pedrógão Grande fire.

2.3. SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO “TWO-WAY” (MESONH/FOREFIRE)

Na sequência dos resultados apresentados na secção anterior, uma nova série de experiências foi realizada com o modelo MesoNH acoplado ao ForeFire. A simulação foi configurada tal como a simulação apresentada na secção anterior (ver Figura 2.3a). No entanto, após a ignição, a propagação do fogo foi forçada pelas condições atmosféricas geradas pelo modelo atmosférico e tendo em conta a orografia e as características da cobertura do solo. Neste modo totalmente acoplado é possível explorar os efeitos do fogo na atmosfera, bem como os efeitos da atmosfera na propagação do incêndio.

Foram realizadas um total de 3 simulações, a primeira e a segunda consideraram um fluxo de energia equivalente a 8 MJ sendo emitido durante 250 s para cada metro quadrado quando e onde o fogo estava presente, diferindo exclusivamente no início da ignição, com uma diferença de 10 minutos entre as duas. Pretendeu-se com o lançamento destas duas simulações efetuar um pequeno teste de sensibilidade do modelo à hora do início, pois em experiências preliminares tinha-se encontrado uma sensibilidade relativamente elevada. Os resultados dessas simulações são apresentados no lado esquerdo das Figuras 2.7 a 2.11. Nas figuras, as isolinhas a vermelho e a preto à superfície correspondem as respetivas frentes de fogo, enquanto as áreas a azul-claro representam a concentração de graupel, azul-escuro a concentração de gotículas de nuvem e a rosa o vapor de água.

Realizou-se uma terceira simulação em que não se considerou a interação fogo-atmosfera, não tendo sido calculados os fluxos de energia e massa, ou seja foi na verdade um acoplamento só num sentido (one-way) em que o modelo de fogo só enviou para o modelo atmosférico o traçador de fumo que, como se notou anteriormente, é passivo relativamente a toda a física do modelo. O objetivo desta simulação é o de estudar qual seria a evolução do fogo e da pluma na atmosfera, se o fogo não perturbasse a atmosfera. Por comparação com as

outras duas pode estudar-se o impacto das interações fogo-atmosfera na propagação do fogo e na evolução dos campos atmosféricos.

Os resultados desta simulação são mostrados no canto superior direito das figuras, com a propagação da frente do fogo representada pela isolinha a verde. Os resultados da evolução da frente de fogo nas três experiências podem ser vistos na simulação do canto inferior direito das Figuras 2.7 a 2.11, e com a isolinha a amarelo a identificar a evolução da frente de fogo deduzida a partir dos relatórios oficiais.

A Figura 2.7a apresenta os resultados utilizando o código MesoNH/ForeFire totalmente acoplado. Os pontos A e B na Figura 2.7a indicam as localizações das duas ignições ocorridas no incêndio de Pedrogão Grande: "Escalos Fundeiros" e "Regadas", respetivamente. A Figura 2.7a mostra ainda a presença da bigorna do sistema convectivo de mesoscala que estava a atuar na região durante o período, sendo esta representada pela concentração de graupel nos níveis mais elevados (região a azul-claro).

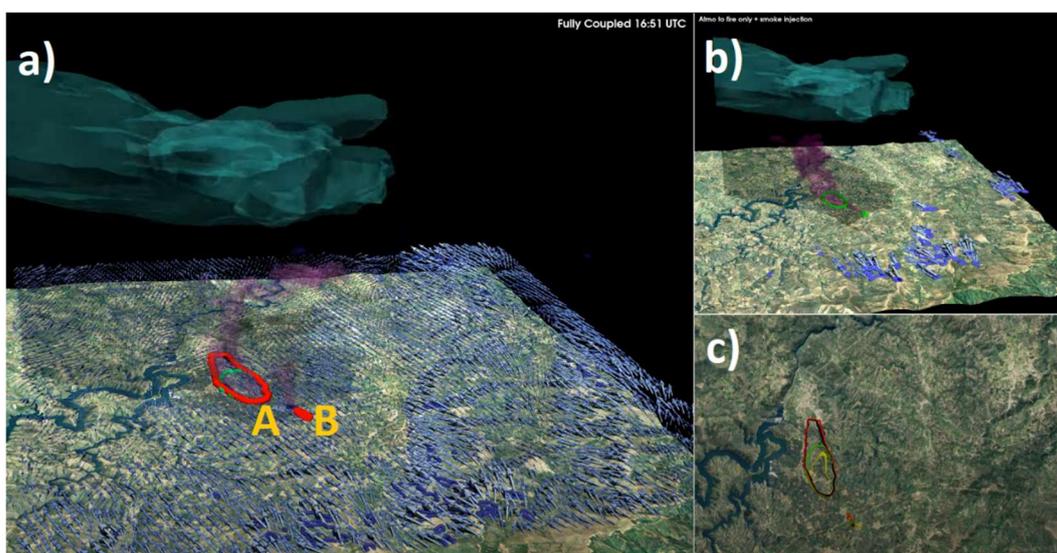


Figura 2.7. Simulações do modelo MesoNH acoplado ao modelo ForeFire obtidas com 80 m de resolução às 1651 UTC de 17 de junho de 2017: **a)** acoplamento total entre fogo-atmosfera, **b)** acoplamento sem emissão de energia, e **c)** evolução da frente de fogo à superfície. Os pontos A e B representam as ignições em "Escalos Fundeiros" e "Regadas", respetivamente.

A Figura 2.8a mostra o desenvolvimento de uma nuvem acima da coluna de convecção criada a partir do incêndio, com concentração de água líquida (azul-escuro) e gelo (azul-claro). A terceira simulação não mostra a formação das nuvens convectivas (Figura 2.8b), o que apoia a tese de que as nuvens formadas na simulação verdadeiramente acoplada são devidas à piro-convecção. Por outro lado, a Figura 2.8c mostra que, neste instante, as frentes de fogo associadas às simulações totalmente acopladas evoluem mais rapidamente do que as da terceira experiência. É de ressaltar que na terceira simulação as frentes de fogo associadas as ignições de “Escalos Fundeiros” e “Regadas” ainda não se haviam se unido nesse momento.

A Figura 2.9a mostra um possível *downburst* a atingir a região da frente de fogo às 1901 UTC. A mesma característica pode ser identificada na Figura 2.9b, indicando que este *outflow* convectivo se desenvolveu a partir do sistema meteorológico. Neste instante, as três simulações apresentam as frentes de fogo qualitativamente bem representadas quando comparadas com a frente de fogo de referência (isolinha a amarelo), como verificado na Figura 2.9c.

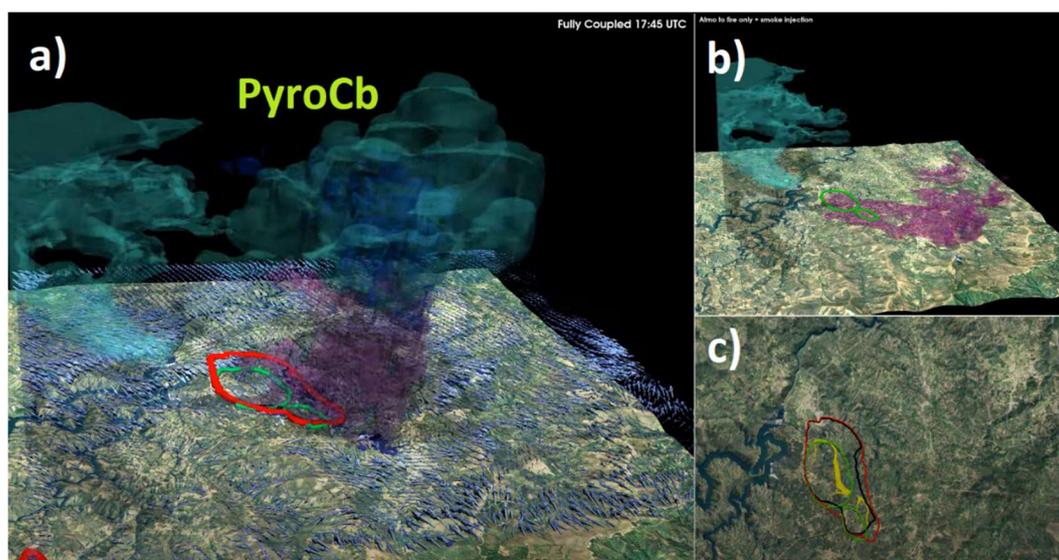


Figura 2.8. Igual a Figura 2.7, mas para às 1745 UTC.

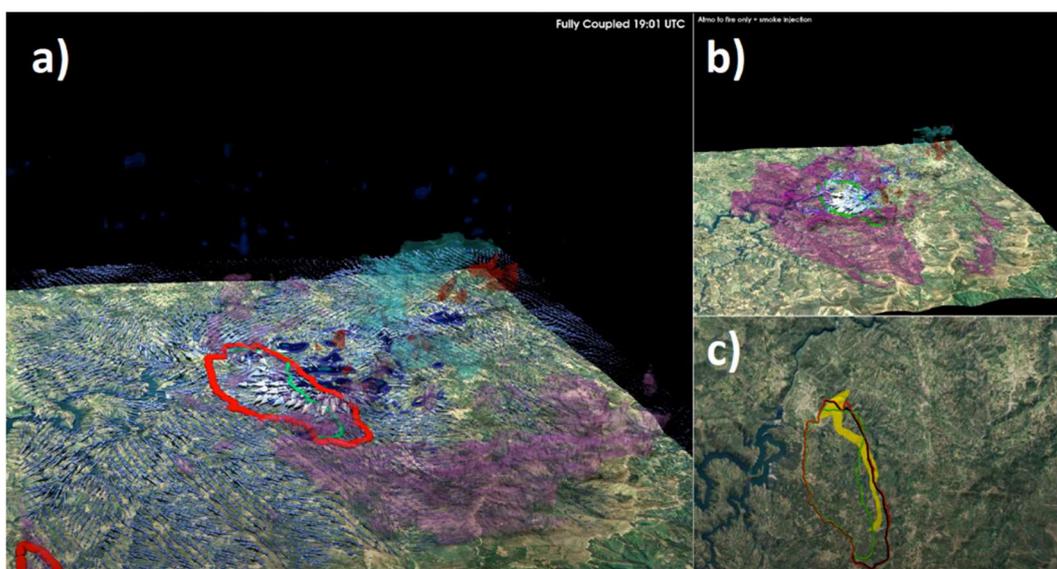


Figura 2.9. Igual a Figura 2.7, mas para às 1901 UTC.

A Figura 2.10a mostra um segundo momento com a atividade piro-convectiva a originar o desenvolvimento de nuvens. Novamente, a simulação sem a emissão de energia não apresenta a formação nuvens (Figura 2.10b), confirmando a atividade piro-convectiva. Por outro lado, a Figura 2.10c mostra que a frente de fogo começa a apresentar um atraso em relação às simulações totalmente acopladas e em relação à frente de fogo de referência. Esta situação mantém-se com o passar do tempo e a Figura 2.11 deixa claro a importância da representação correta dos efeitos do fogo em simulações acopladas, de modo a proporcionar resultados mais realistas. Tal conclusão é reforçada pelo facto de que a Figura 2.11c apresenta a frente de fogo das simulações totalmente acopladas (isolinhas a vermelho/preto) mais consistentes com a realidade (isolinha a amarelo).

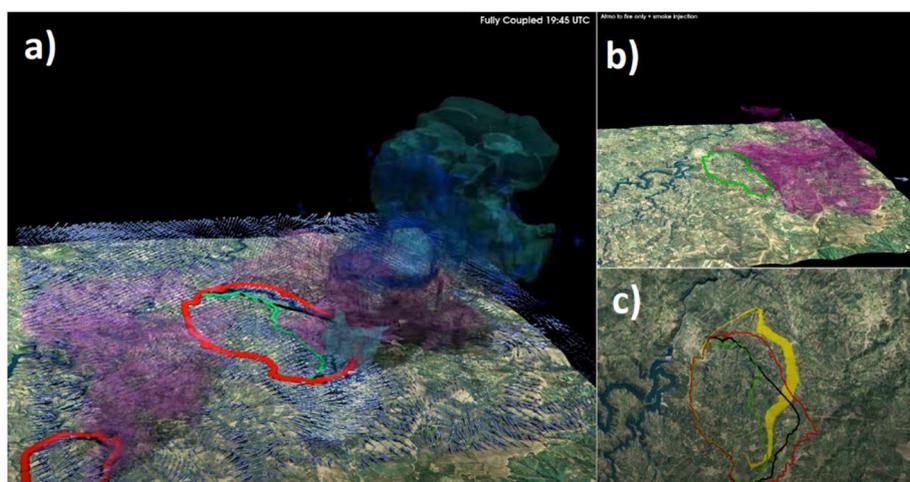


Figura 2.10. Igual a Figura 2.7, mas para às 19:45 UTC.

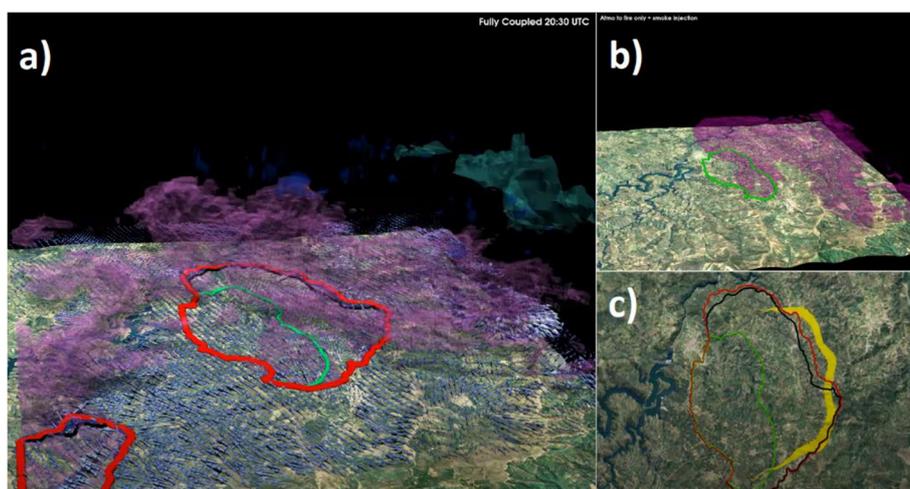


Figura 2.11. Igual a Figura 2.7, mas para às 20:30 UTC.

Uma análise aprofundada dessas experiências está a ser realizada, levando também em consideração o estudo apresentado na secção 2.2. O resultado deste trabalho deverá ser apresentado em forma de um artigo científico nos próximos meses após a entrega deste relatório.

Neste momento, o resultado das simulações apresentadas nesta secção está disponível em formato de vídeo em <https://www.youtube.com/watch?v=UKIq4MZZ7j4>.

2.4 SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO "TWO-WAY" (WRF/FIRE)

O modelo WRF, versão 4.4.2, (Skamarok et al., 2021) foi escolhido para realizar as simulações. O WRF é um modelo atmosférico amplamente utilizado com vários componentes, que incluem um módulo de incêndio. Uma alta resolução local é obtida usando três malhas aninhadas (Figura 2.12), com resolução de 2 km, 0,4 km e 0,08 km, respetivamente, e aninhamento unidirecional, i.e. as malhas de alta resolução horizontal não fornecem informação para as malhas de resolução inferior onde estão implementadas. O domínio de integração exterior (301 x 301 pontos da grelha) abrange toda a área de Portugal continental, cobrindo toda a costa oeste portuguesa e uma parte do vizinho Oceano Atlântico, o suficiente para captar as circulações da brisa marítima e outros processos costeiros que controlam o clima ibérico, especialmente no verão.

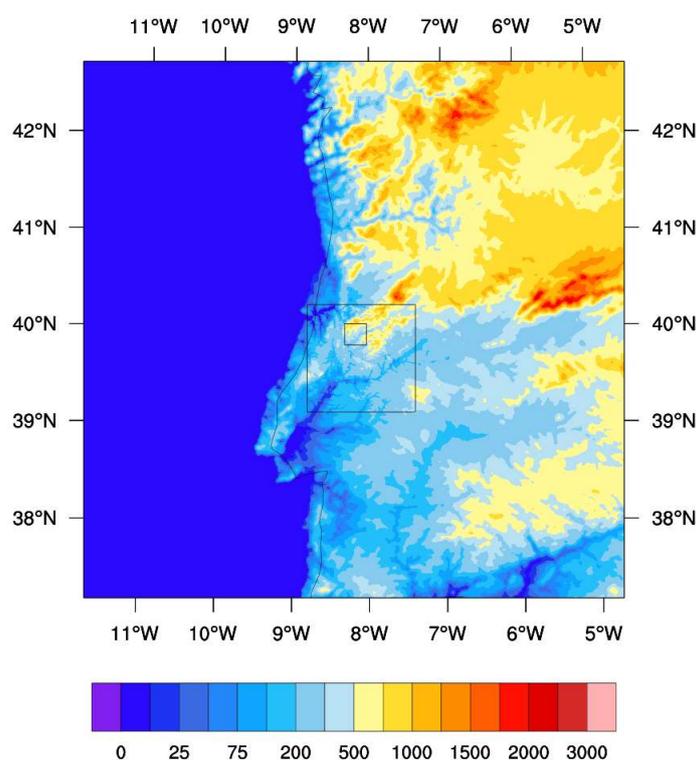


Figura 2.12. Domínio das simulações com o modelo WRF. Domínio externo com resolução horizontal de 2 km. Caixas a preto representam a localização dos domínios aninhados de 0,4 km e 0,08 km.

A primeira grelha aninhada (321 x 321 pontos da grelha) cobre a região do incêndio (Pedrogão Grande, Castanheira de Pêra, Ansião, Alvaiázere, Figueiró dos Vinhos, Arganil, Góis, Penela, Pampilhosa da Serra, Oleiros e Sertã), a bacia do rio Zêzere, parte da bacia do rio Tejo e as serras da Lousã, Açor, Alvelos e Gardunha. A segunda grelha aninhada (321 x 321 pontos da grelha) cobre a região do incêndio. Nas simulações foram utilizados 68 níveis verticais híbridos, o topo do modelo é fixado em 20hPa, o primeiro nível é definido a aproximadamente 15m do solo e a espessura das camadas aumenta por um fator de 1,04 até o meio da troposfera e depois por um fator de 1,2. A camada limite planetária abrange cerca de 20 níveis verticais, numa tentativa de capturar a camada limite convectiva. Foi utilizado o esquema RRTMG (Iacono et al., 2008), para a radiação de ondas curtas e ondas longas, com a opção de efeitos de inclinação ativa para modificar o fluxo de radiação solar de superfície de acordo com a inclinação do terreno. Não foi utilizada qualquer parametrização de cúmulos. O modelo de superfície utilizado foi o Modelo Unificado de Superfície da Terra, Noah (NOAH-MP; Niu et al. 2011). Foram utilizadas 3 parametrizações da camada limite e de microfísica (ver detalhes na Tabela 2.1).

As condições iniciais e de fronteira foram extraídas das análises operacionais do ECMWF, em intervalos de 6 horas.

2.4.1 Módulo de Incêndio

O módulo de incêndio é um modelo 2D simples de um incêndio de superfície, onde o fogo se espalha por meio de combustíveis no solo. Ele contém um algoritmo de dispersão de brasas, porém ainda não contém os algoritmos necessários para representar os incêndios de copa, que consomem e se espalham pelas copas das árvores. Em cada intervalo de tempo, o modelo de incêndio insere o vento de superfície, que impulsiona o incêndio, e envia o fluxo de calor do incêndio para a atmosfera, influenciando-a.

Tabela 2.1 Configurações do conjunto de simulações realizadas com o modelo WRF 4.4.2

	Domínio 1	Domínio 2	Domínio 3
Resolução Horizontal	2 km	400 m	80 m
Dimensão Horizontal	301 x 301	321 x 321	321x321
Dimensão Vertical	68		
Início	12 UTC 16 Junho 2017		
Tempo de corrida	48 h		
C.F	Análise		
Microfísica	WSM6 (WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme) Hong e Lim (2006)		
	Eta (Ferrier) Rogers, Black, Ferrier, Lin, Parrish e DiMego (2001, web doc)		
	Thompson Thompson, Field, Rasmussen and Hall (2008)		
Radiação	RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for GCMs) Iacono et al. (2008)		
Modelo de solo	Noah-mp LSM Niu et al. (2011) Yang et al. (2011)		
Camada limite planetária	YSU Hong, Noh and Dudhia (2006)		Desligada
	Mellor-Miller-Janjic (Janjic, 1994, 2002 e Monin e Obukhov, 1954)		Desligada
	Mellor-Yamada Nakanishi e Niino Nível 2.5 (MYNN; Mellor & Yamada, 1982; Nakanishi & Niino, 2006; 2009)		Desligada

O utilizador especifica a hora, local e forma de uma ignição de fogo. A evolução da linha de fogo, a interface que envolve a região em chamas, é implementada pelo método "level set". A função level set é avançada pelo método Runge-Kutta de ordem 2, com discretização espacial pelo método Godunov. A taxa na qual essa interface se expande é calculada em todos os pontos usando uma fórmula semi-empírica que calcula a taxa de propagação do fogo como uma função das condições locais de combustível, vento e inclinação do terreno (Rothermel, 1972).

O campo de vento do modelo atmosférico é inserido na fórmula da taxa de propagação primeiro interpolando verticalmente para a altura comum (6,096 m), usando os valores de comprimento de rugosidade da superfície e depois multiplicando por fatores de redução de vento prescritos (Baughman e Albini, 1980; Mandel e outros, 2011). Assume-se que os fluxos de calor do fogo diminuem exponencialmente com a altura através da formulação de profundidade de extinção de calor. O modelo de humidade do combustível (Mandel et al., 2014) é ativado, para permitir respostas adequadas entre a humidade do combustível e as condições atmosféricas.

A precisão das simulações de alta resolução depende da resolução dos mapas estáticos subjacentes. Como os mapas estáticos WRF padrão não têm resolução suficiente, informações adicionais foram obtidas de diferentes fontes.

2.4.2 Topografia

A elevação de alta resolução foi obtida do Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) Versão 3 (ASTGTM), que fornece um modelo digital global de elevação (DEM) de áreas terrestres na Terra com uma resolução espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros). LP DAAC - <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/ASTGTM> (usgs.gov).

2.4.3 Textura do solo

Os mapas da FAO que acompanham o WRF são muito grosseiros e levam a solos muito argilosos em algumas áreas da Europa e, portanto, com pouca drenagem. Portanto, um novo mapa de textura do solo para a Europa a 1 km com base no HWSD (Harmonized World Soil Database) v1.2 foi inserido no modelo como informação adicional (Milovac et al., 2014). Os conjuntos de dados de textura do solo contêm mapas de textura do solo para a camada superior do solo com

resolução horizontal de 1 km com base no Harmonized World Soil Database versão 1.2 (HWSD). Mais detalhes em: http://cerawww.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=WRF_NOAH_HWSD_world_TOP_SOILTYP. O conjunto de dados foi recategorizado de acordo com as classes STAS usadas no WRF.

2.4.4 Uso/cobertura do solo

A representação do uso do solo é fundamental para a representação precisa da vegetação, portanto, uma nova base de dados de uso do solo baseada nos dados CORINE Land Cover (CLC) 2006 (100 m × 100 m) interpolados para a resolução de 1 km do Programa Internacional de Geosfera-Biosfera (Classificação de vegetação IGBP)-MODIS. O mapa de cobertura do solo CORINE original de 2006 cobre a maior parte da Europa e originalmente contém 44 classes de uso do solo com uma resolução horizontal de 100 m (<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=6866b2f3a44c4ee3bde8edd1b0782fb2>). Os dados foram reclassificados de acordo com as categorias de uso do solo MODIS+lagos (21 classes) e preparados de forma a poderem ser utilizados no WRF.

2.4.5 Mapas de combustível

A descrição dos combustíveis disponíveis para a região de Pedrogão (d03) foi conseguida através da reclassificação dos dados raster CORINE 2012 (v18, 100 m × 100 m) em modelos de combustível de acordo com a classificação do Northern Forest Fire Laboratory (NFFL) (Anderson, 1982) e reamostragem (vizinho mais próximo) para uma resolução espacial de 40 m × 40 m. Dado que não existem dados de combustível de resolução mais fina, disponível publicamente para Portugal, a matriz de conversão (Tabela 2.2) foi baseada na literatura sobre ecossistemas mediterrânicos (Benali et al. 2016; Duguay et al. 2007; Jordanov et al. 2012; Sá et al. 2017; Sebastián López et al. 2002). Cada

categoria de combustível NFFL (13 no total) está associada a propriedades específicas do combustível, como densidade, profundidade e massa do combustível, proporção entre superfície e volume, conteúdo mineral e humidade de extinção, fornecidas externamente ao módulo de incêndio. Embora essas propriedades de combustível tenham sido baseadas em trabalho de campo nos Estados Unidos, nenhum ajuste adicional foi considerado.

Tabela 2.2: Conversion matrix of CLC 2012 land uses to NFFL fuel models (Anderson, 1982).

Código CORINE	NFFL modelo	Descrição
111, 112, 121, 122, 123, 124, 131, 132, 133, 213, 331, 332, 335, 421, 422, 423, 511, 512, 521, 522, 523	14	Sem combustível
142, 211, 212, 231, 242, 321, 411	1	Short grasses (30 cm)
141, 222, 244, 333	2	Timber (grass and understory)
241	3	Tall grass (76 cm)
323	4	Chaparral (183 cm)
221, 412	5	Brush (61 cm)
322	6	Dormant brush, hardwood slash
243, 324	7	Southern rough
223, 313, 334	8	Closed timber litter
311	9	Hardwood litter
312	10	Timber (litter and understory)

2.4.5 Simulações

A inicialização do modelo foi efectuada às 1200 UTC a 16 de junho de 2017 nos domínios 1 e 2 e às 1200 UTC de 17 de julho de 2017, no domínio 3. O modulo de fogo só foi activado no domínio 3; tendo-se considerado 2 pontos com as coordenadas 39.956 N, 8.156 W (Escalos Fundeiros) e 39.950 N, 8.276 W (Regadas). No primeiro ponto o incêndio é iniciado às 1338 UTC, e no segundo à 1445 UTC.

A comparação entre a radiosondagem de Lisboa e os resultados da simulação com a microfísica com a parametrização Eta (Ferrier) e camada limite planetária de Mellor-Miller-Janjic (Figura 2.13a) mostram que às 1200 UTC, o modelo não reproduz a instabilidade atmosférica na zona de Lisboa, sendo subestimada a quantidade de vapor de água até aos 8000 m. Os perfis observados e simulados da temperatura do ar, potencial e potencial virtual são coincidentes (Figura 2.13b).

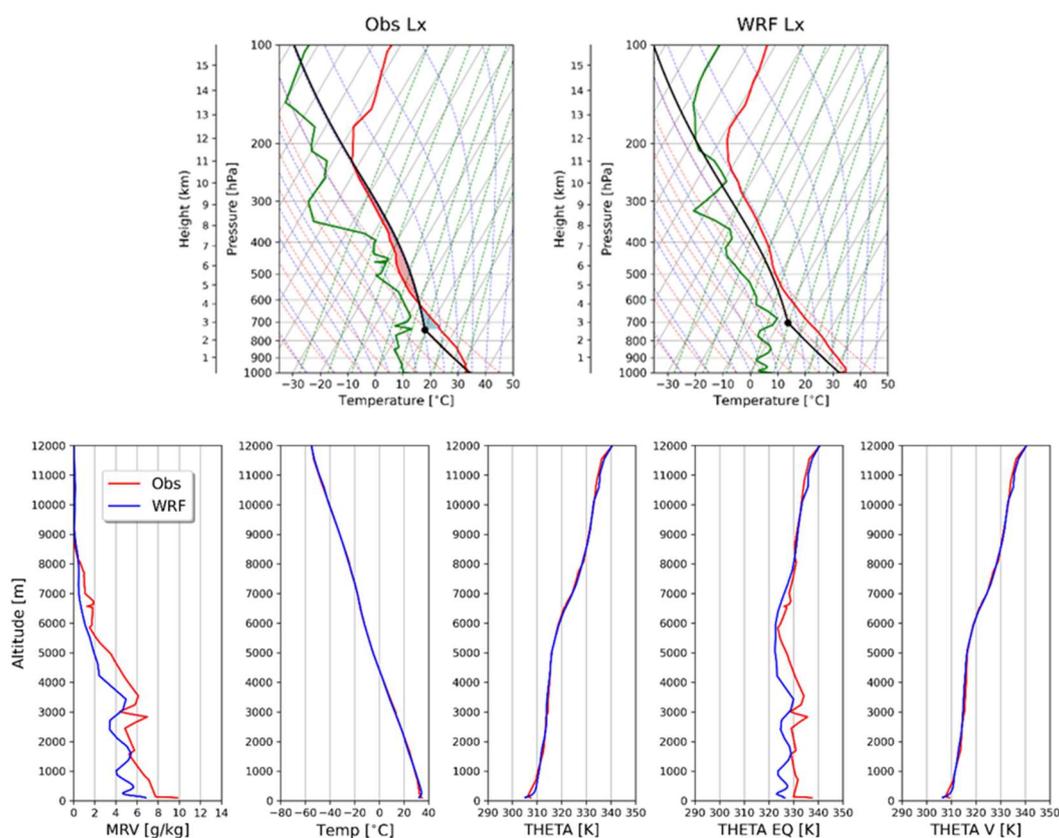


Figura 2.13. a) Radiosondagem de Lisboa (observada e no domínio 1); b) perfis verticais de razão de mistura (MRV), temperatura do ar (Temp), temperatura potencial (Theta), temperatura potencial equivalente (Theta EQ) e virtual (Theta V).

A instabilidade atmosférica estende-se numa faixa que abrange todo o vale do Tejo, sendo visíveis regiões onde ocorreram “downburst” a partir das 1400 UTC. A Figura 2.14a e 2.14b ilustra o campo da temperatura potencial à superfície onde são visíveis áreas de forma aproximadamente circular e de temperatura inferior ao ambiente que as rodeia. Correspondendo a áreas onde ar proveniente de altas camadas de atmosfera é empurrado na direção de superfície. Nestas

regiões assiste-se a uma intensificação do vento horizontal em todas as direções. Nenhuma destas regiões ocorre sobre a área do incêndio e começam a dissipar-se a partir das 1800 UTC (19 horas locais).

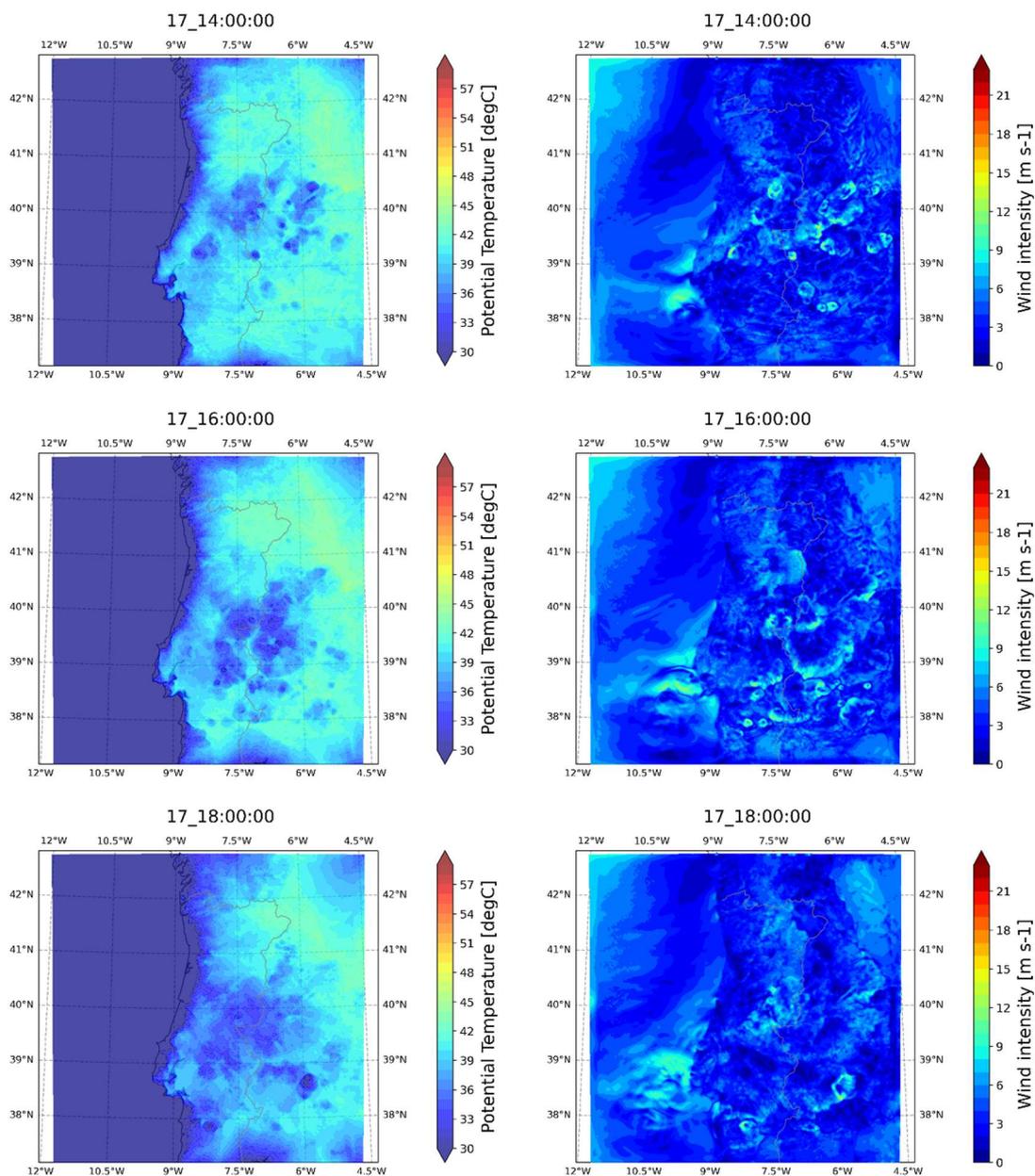


Figura 2.14. Temperatura potencial (coluna da esquerda); intensidade do vento (coluna da direita) para às 1400 UTC, 1600 UTC e 1800 UTC.

A Figura 2.15 ilustra os campos do vento horizontal (barbelas) e a área ardida (linha vermelha simulada e linha azul observada). À hora do início do incêndio, o vento, à superfície soprava de norte com uma intensidade inferior as 10 knt e quando se inicia o incendio em Regadas o vento intensificou-se, soprando de nordeste. A área ardida simulada é muito superior à observada estendendo-se para sul. Às 1600 UTC, o vento rodou, passando a ser de noroeste e as duas áreas ardidas estendem-se para sul e leste. À 1700 UTC, as duas áreas ardidas simuladas juntam-se e continuam o seu progresso para sul. Às 1745 UTC o vento junto à frente de fogo intensifica-se, atingido velocidades superiores a 15 knt e rodando para oeste. A variabilidade da direcção do vento associada à sua intensificação é um indicador da ocorrência de um "downburst". Às 1800 UTC, o vento junto à frente de fogo continua de leste e a área ardida expandiu-se consideravelmente relativamente ao quarto de hora anterior. Às 1900 UTC continua a expansão acelerada para oeste da área ardida e às 2000 UTC o vento torna a ser de norte e a área ardida expande-se novamente para sul.

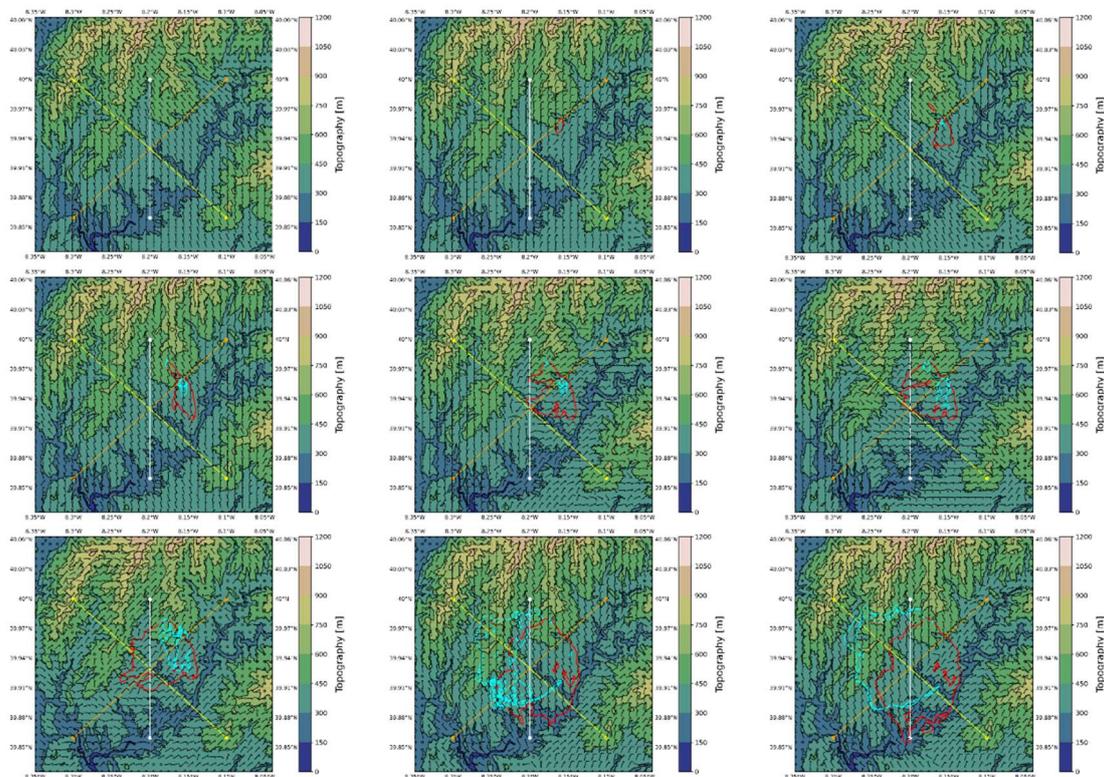


Figura 2.15. Campos do vento horizontal (barbelas) e área ardida (linha vermelha simulada e linha azul observada). Para as 13:30; 14:45; 16:00; 17:00; 17:45; 18:00; 19:00; 20:00; 21:00; 22:00.

A instabilidade à superfície é patente no campo da velocidade vertical (Figura 2.16). Às 1745 UTC e às 1800 UTC são visíveis zonas de movimento ascendente intercaladas por outras de forte movimento descendente. Às 1745 UTC, o corte da linha amarela é paralelo à frente de fogo sendo visível as plumas ascendentes associadas ao incêndio. No corte ao longo da linha laranja, além das ascendentes associadas à frente de fogo, é possível ver, em altitude, uma zona com um intenso movimento descendente imediatamente em frente do incêndio e outro junto à superfície atrás da frente de fogo. Este último é ainda mais visível no corte da linha branca onde existe um intenso movimento descendente entre as duas frentes de fogo. Às 1800 UTC, verifica-se a intensificação da zona de fluxo descendente ao longo do corte da linha laranja.

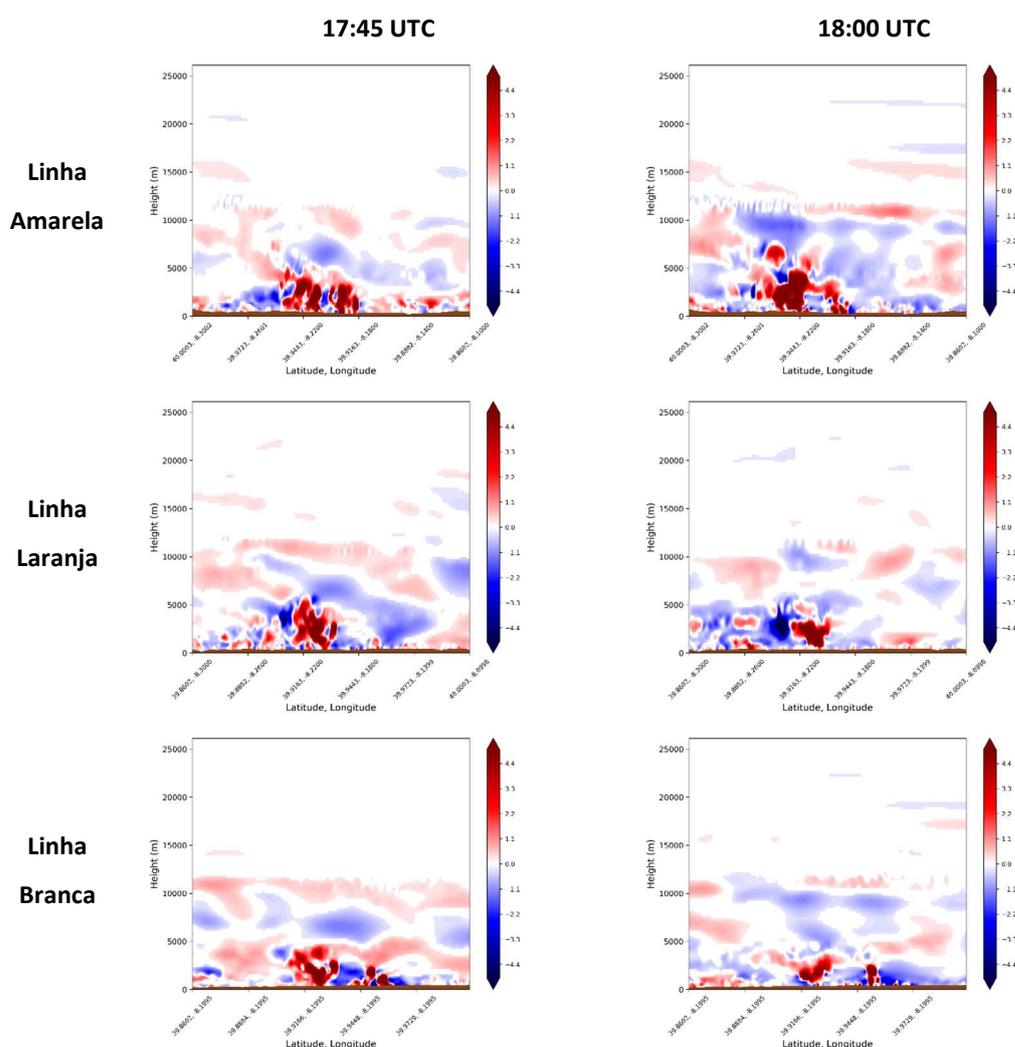


Figura 2.16. Campos do vento vertical para as três linhas da figura 4, às 17:45 e 18:00 UTC

A evolução da nebulosidade (Figura 2.17) ilustra a formação de um cúmulo a oeste da frente de fogo que se intensifica significativamente entre as 1745 UTC e as 1800 UTC.

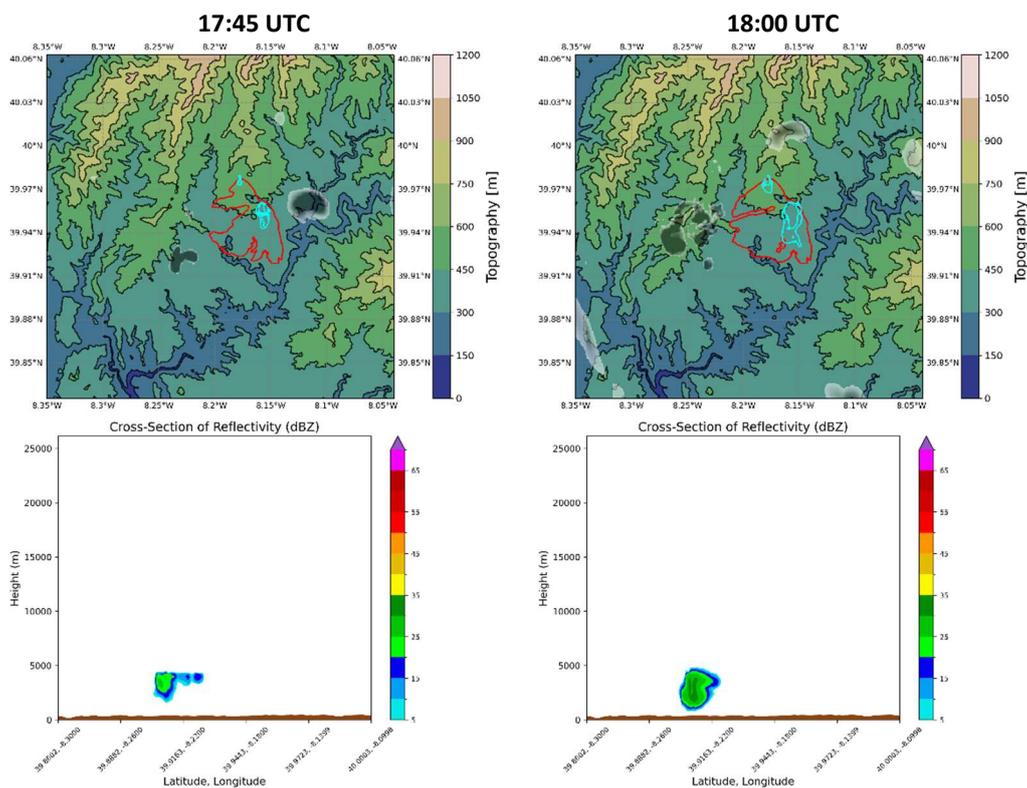


Figura 2.17. Campos da nebulosidade e da reflectividade para a linha laranja da Figura 2.15, às 1745 e 1800 UTC.

3. MODELAÇÃO DA ATIVIDADE PIRO-CONVECTIVA NO MEGA INCÊNDIO DE QUIAIOS

Em 2017, Portugal registou 11 mega incêndios, dos quais 8 ocorreram a 15 de outubro e causaram 48 vítimas mortais. De acordo com um relatório oficial das autoridades portuguesas [Relatório CTI, 2018], a atividade piro-convectiva extrema associada ao desenvolvimento de nuvens PyroCb ocorreu nos mega incêndios de Pataias, Arganil, Lousã e Sertã. Dada a evidência fotográfica da formação de uma nuvem PyroCu, o estudo de caso selecionado foi o evento do mega incêndio de Quiaios. Considerando a mesma metodologia apresentada na Secção 2.2, o estudo apresentado nesta secção também pretendeu simular o impacto de um incêndio na atmosfera.

De acordo com o relatório do IPMA [Simões et al., 2018], o dia 15 de outubro foi caracterizado por condições meteorológicas de incêndio extremas e por um baixo teor de humidade dos combustíveis, resultando em valores elevados dos índices meteorológicos. Por exemplo, o Fire Weather Index (FWI) apresentou valores excepcionalmente altos para outubro, com valores acima do percentil 50 durante a primeira quinzena e atingiu o valor mais elevado desde 1999 em 15 de outubro de 2017 (FWI = 59,2). Em relação ao Índice Spread Inicial (ISI), o índice apresentou valor superior ao percentil 90 naquele dia [Simões et al., 2018].

A freguesia de Quiaios pertence ao concelho da Figueira da Foz (distrito de Coimbra) com cerca de 3000 habitantes e situa-se na costa oeste de Portugal. A região possui uma orografia relativamente plana com altitudes em torno de 50 m. Quanto à cobertura do solo, esta era composta maioritariamente por cobertura florestal (92,16 %), composta de matos (2,31 %) e floresta (89,85 %), esta última constituída por pinheiro bravo (64,04 %) e eucalipto (17,89 %). A agricultura (6,78%) e a área urbana (1,06%) representam uma pequena percentagem da cobertura do solo [cf. Tabela 3.2 do Relatório CTI, 2018].

A origem do incêndio de Quiaios foi intencional, tendo iniciado no dia 15 de outubro pelas 14h36 e sendo extinto às 23h10 do dia 16 de outubro. A área total ardida atingiu 19.000 ha, resultado de várias ignições [Viegas et al., 2019]. Por exemplo, à primeira ignição às 13h34, na Quintã (Vagos), seguiu-se pela ignição mais importante na Cova da Serpe, às 14h36 [Viegas et al., 2019; Relatório CTI, 2018]. Ignições secundárias com fonte desconhecida também foram relatadas e contribuíram para a área ardida total. Destaca-se uma alta taxa de propagação com velocidade de 4,8 km/h durante as primeiras 4 horas, bem como um máximo de 5,4 km/h [Relatório CTI, 2018]. Embora os relatórios oficiais, focados no comportamento do fogo, não mencionem atividade piro-convectiva intensa, algumas fotografias mostram evidências de desenvolvimento de nuvens PyroCu [Foz ao Minuto, 2017].

3.1. SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO "ONE-WAY" (MESONH/FOREFIRE)

Para o incêndio de Quiaios, o MesoNH foi acoplado ao modelo ForeFire e configurado em 3 domínios aninhados (300 × 300 pontos da grelha), similar à configuração utilizada no caso de Pedrogão Grande. A resolução da grelha horizontal é de 2000 m para o domínio externo cobrindo 600 km × 600 km. As grelhas internas têm resoluções de 400 m e 80 m, cobrindo uma área total de respetivamente 120 km × 120 km, 24 km × 24 km (Figura 3.1a). A partir de uma avaliação qualitativa, o modelo permitiu representar a estrutura vertical atmosférica e os efeitos de piro-convecção na atmosfera sobre a pluma. A Figura 3.1b mostra a configuração do ForeFire com uma resolução de 20 metros e 1200 × 1200 pontos de grelha.

Num contexto de escala local, a atmosfera à superfície apresentou temperaturas superiores a 30 °C e humidade relativa inferior a 30 % ao início da tarde, condições inesperadas para a altura do ano. O escoamento foi predominante de sudeste durante o período. Em relação à estrutura vertical da

atmosfera, uma troposfera inferior seca e mais quente foi seguida por uma camada húmida nos níveis médios. As condições atmosféricas documentadas neste estudo são como as identificadas em estudos anteriores sobre o desenvolvimento de PyroCu/PyroCb, ou seja, um perfil atmosférico com uma típica configuração em V invertido, ou um “ambiente de trovoada seca”.

EXPERIÊNCIA DE QUIAIOS

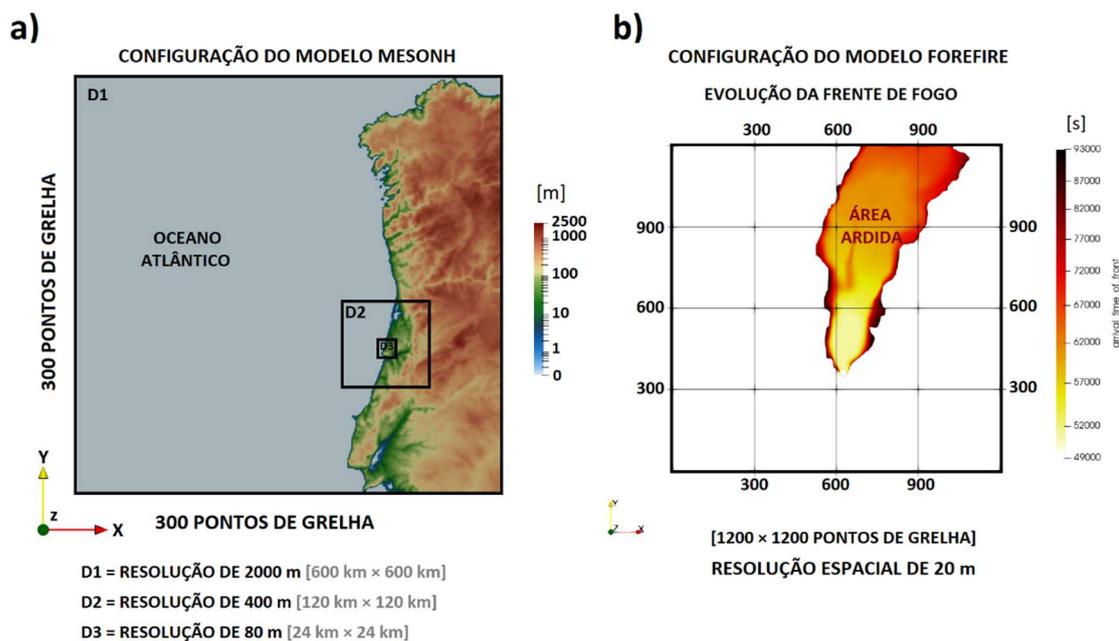


Figura 3.1. Configuração da experiência numérica de Quiaios: **a)** grelha horizontal do MesoNH e **b)** grelha do modelo de propagação de fogo ForeFire.

A simulação acoplada permitiu identificar a formação de uma nuvem PyroCu composta por diferentes espécies de hidrometeoros, nomeadamente graupel e gotas de chuva. A piro-nuvem desenvolveu-se no interior da pluma devido ao transporte vertical de vapor de água para níveis mais elevados, transporte que foi originado pelos fluxos de calor sensível e numa segunda fase de calor sensível proveniente do incêndio.

A simulação mostrou a mudança da direção do vento de Sudeste para Sudoeste em território português, o que criou condições favoráveis à intensificação dos incêndios ativos e ao desenvolvimento de nuvens PyroCb durante o final da tarde.

A Figura 3.2 mostra uma secção vertical que intercepta a coluna de fumo às 14h30 UTC de 15 de outubro de 2017. A Figura 3.2a mostra a concentração relativa de fumo (S) com a frente de fogo sendo identificada pelos valores mais altos perto da superfície ($> 0,1$). O fumo simulado se estende até os níveis médios da atmosfera. Em geral, as Figuras 3.2b a 3.2e mostram o impacto da emissão de calor e vapor de água na atmosfera.

O campo de energia cinética turbulenta apresenta a intensidade mais alta da turbulência perto da superfície (acima de $5 \text{ m}^2/\text{s}^2$), o que facilita a mistura vertical dos componentes dentro do ambiente de incêndio (Figura 3.2b). Por outro lado, os movimentos turbulentos aumentam o transporte vertical de calor, permitindo-lhe atingir níveis mais elevados da atmosfera, bem como o transporte de fumo e de vapor de água. É de ressaltar também a região turbulenta próxima ao topo da pluma de fumo, com valores em torno de $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

A Figura 3.2c mostra os movimentos verticais dentro da pluma, com as regiões em tons de azul representando os movimentos descendentes e, em tons de vermelho, os movimentos ascendentes. A velocidade vertical é aproximadamente zero fora da pluma, enquanto dentro dela os movimentos verticais são mais intensos. Os movimentos ascendentes com velocidade vertical de 2 e 3 m/s atingem altitudes acima de 6 km e estendem-se por uma ampla região, revelando o impacto do fogo na circulação atmosférica local. O campo da razão de mistura do vapor de água (Figura 3.2d) também é impactado pela presença do fogo. O campo é fortemente perturbado pelo fogo com humidade sendo encontrada nos níveis mais altos dentro da região da pluma.

A simulação mostrou que os fluxos turbulentos e as correntes ascendentes organizadas permitiram o transporte vertical de vapor de água para níveis mais elevados. No topo da pluma de fumo existe um teor significativo de vapor de água, que se condensa parcialmente, dando origem a outras espécies de hidrometeoros. A Figura 3.2e mostra o campo da razão de mistura de graupel e, mesmo com valores muito baixos, a presença de hidrometeoros dentro da coluna convectiva, confirmando que o acoplamento entre o modelo de propagação do

fogo e o modelo atmosférico representa a atividade piro-convectiva levando ao desenvolvimento de piro-nuvens. A presença de hidrometeoros foi encontrada apenas no domínio de resolução de 400 m.

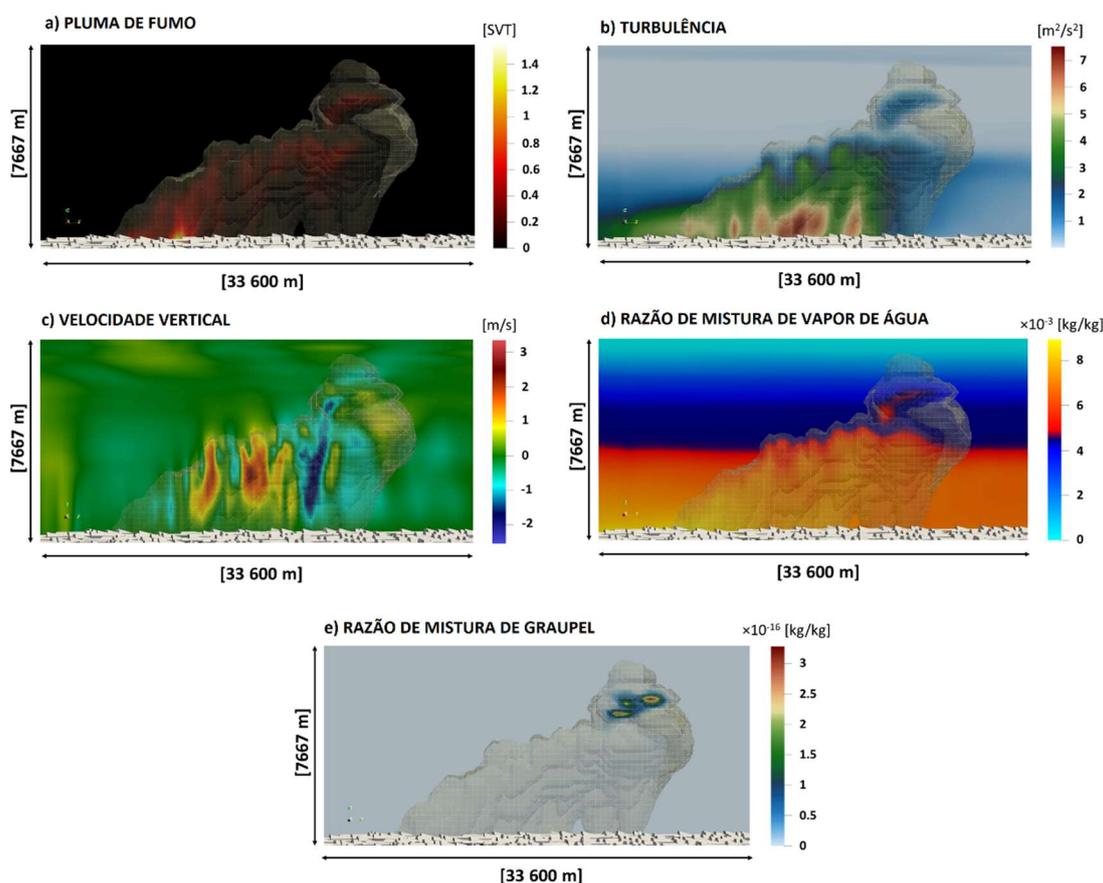


Figura 3.2. Secção vertical intersectando a pluma de fumo simulada às 1430 UTC em 15 de outubro de 2017: **a)** campo relativo de concentração de fumo (S), **b)** energia cinética turbulenta, **c)** velocidade vertical, **d)** razão de mistura de vapor de água, e **e)** razão de mistura de graupel. Vista de leste da coluna de fumo simulada no domínio de resolução de 400 m.

A Figura 3.3a mostra uma foto da nuvem PyroCu durante o incêndio de Quiaios e a Figura 3.3b a localização do fotógrafo. A simulação representou bem a coluna de fumo orientada para o norte (Figura 3.3c). A Figura 3.3c também mostra a presença de água líquida e água congelada dentro da piro-nuvem. Embora as concentrações de hidrometeoros sejam baixas, da ordem de grandeza mostrada na Figura 3.3e, elas são suficientes para indicar a ocorrência de processos microfísicos no interior da pluma gerada pelo fogo.

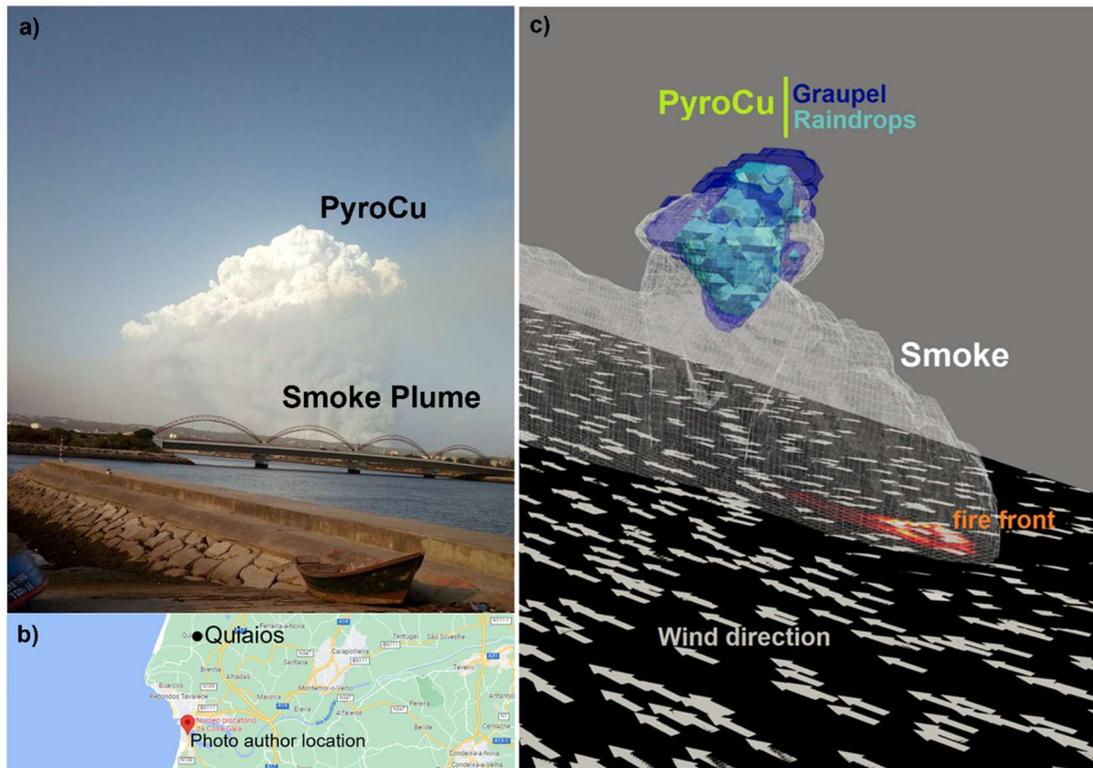


Figura 3.3. a) fotografia do incêndio de Quiaios em 15 de outubro de 2017, (Foz ao minuto, 2017), **b)** localização do fotógrafo, e **c)** simulação obtida a partir do acoplamento dos modelos MesoNH e ForeFire. Variável de concentração de fumo, vento à superfície (vetores) e graupel (azul escuro) e gotas de chuva (azul claro), em 15 de outubro de 2017, às 1430 UTC, para o domínio de resolução de 400m.

A análise completa desta simulação foi submetida em forma de um artigo científico a uma revista científica de circulação internacional, a *Atmospheric Research* (<https://www.sciencedirect.com/journal/atmospheric-research>), estando atualmente em fase de revisão por pares (peer review):

Título: Modelling pyro-convection phenomenon during a mega-fire event in Portugal

Autores: Cátia Campos^{1,2,3}, Flavio Tiago Couto^{1,2,3,4}, Jean-Baptiste Filippi⁵, Roberta Baggio⁵, Rui Salgado^{1,2,3,4}

¹ Instituto de Ciências da Terra – ICT (Polo de Évora), Universidade de Évora, Évora, Portugal.

² Instituto de Investigação e Formação Avançada – IIFA, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

³ Earth Remote Sensing Laboratory (EaRS Lab), Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁴ Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁵ Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Sciences Pour l'Environnement – Unité Mixte de Recherche 6134, Università di Corsica, Campus Grossetti, Corte, France.

Abstract

The present study contributes to an increased understanding of pyro-convection phenomena by using a fire-atmosphere coupled simulation, and investigates in detail the large-scale meteorological conditions affecting Portugal during the occurrence of multiple mega-fires events on 15 October 2017. Two numerical simulations were performed using the MesoNH atmospheric model. The first simulation, was run for a large single domain (300×250 grid points) with a 15 km resolution. In the second one, the MesoNH was coupled to a fire propagation model (ForeFire) to study in detail the Quiaios's fire. To optimize both high resolution in the proximity of the fire region and computational efficiency, the simulation is set up using 3 nested domains (300×300 grid points) with horizontal resolution of 2000 m, 400 m, and 80 m respectively. The emission into the atmosphere of the heat and the water vapour fluxes caused by the evolving fire is managed by the ForeFire code. The fire spatio-temporal evolution is based on an assigned map, which follows what reported by public authorities. At the large scale, the simulation shows the evolution of the hurricane Ophelia, pointing out the influence of south/southwest winds on the rapid spread of active fires, as well as the subtropical moisture transport toward mainland Portugal in the early evening, when violent pyroconvective activity was observed in Central Portugal. The coupled simulation allowed to reproduce the formation of a PyroCu cloud inside the smoke plume. The convective updraughts caused by the fire led to the vertical transport of water vapour to higher levels and enhanced the development of a high-based cloud over a dry atmospheric layer within the smoke plume.

Keywords: pyro-convection; PyroCu clouds; mega-fires; hurricane; MesoNH model; ForeFire model

3.2. SIMULAÇÃO DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO E ACOPLADO EM MODO “TWO-WAY” (WRF/SFIRE)

De maneira a complementar o estudo, uma colaboração com a Universidade de Tessalónica, Grécia, possibilitou a realização de uma simulação com o modelo WRF acoplado ao modelo SFIRE, realizada pelo investigador Doutor Stergios Kartsios.

A simulação foi realizada seguindo a configuração utilizada com o modelo MesoNH/ForeFire, ou seja, 3 domínios aninhados (Figura 3.4). A resolução do domínio maior é 2 km cobrindo 600 km × 600 km (d01). As grelhas internas têm resoluções de 400 m (d02) e 80 m (d03), cobrindo uma área total de respetivamente 120 km × 120 km, 24 km × 24 km. A simulação iniciou às 0600 UTC do dia 15 de outubro de 2017 e terminou às 1200 UTC do dia 16 de outubro de 2017. O SFIRE foi configurado com 8 m de resolução e 3010 × 3010 pontos, correspondendo a dimensão do domínio de 80 m (d03). A Simulação foi realizada em modo de acoplamento nas duas direções (two-way), permitindo a representação das interações fogo-atmosfera.

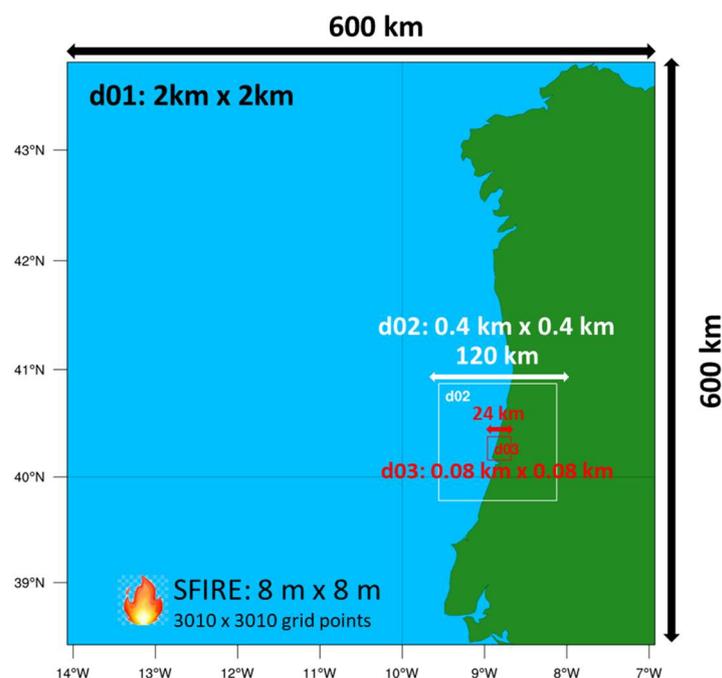


Figura 3.4. Configuração dos domínios do sistema de modelação online acoplado WRF/SFIRE e considerando o incêndio de Quiaios (15 de outubro de 2017), Portugal.

Para a experiência acoplada, o modelo de combustível apresentado na Figura 3.5 foi utilizado no domínio mais pequeno de resolução horizontal de 80 m. A Tabela 3.1 mostra as principais características da simulação realizada com o WRF/SFIRE, bem como das principais parametrizações físicas consideradas.

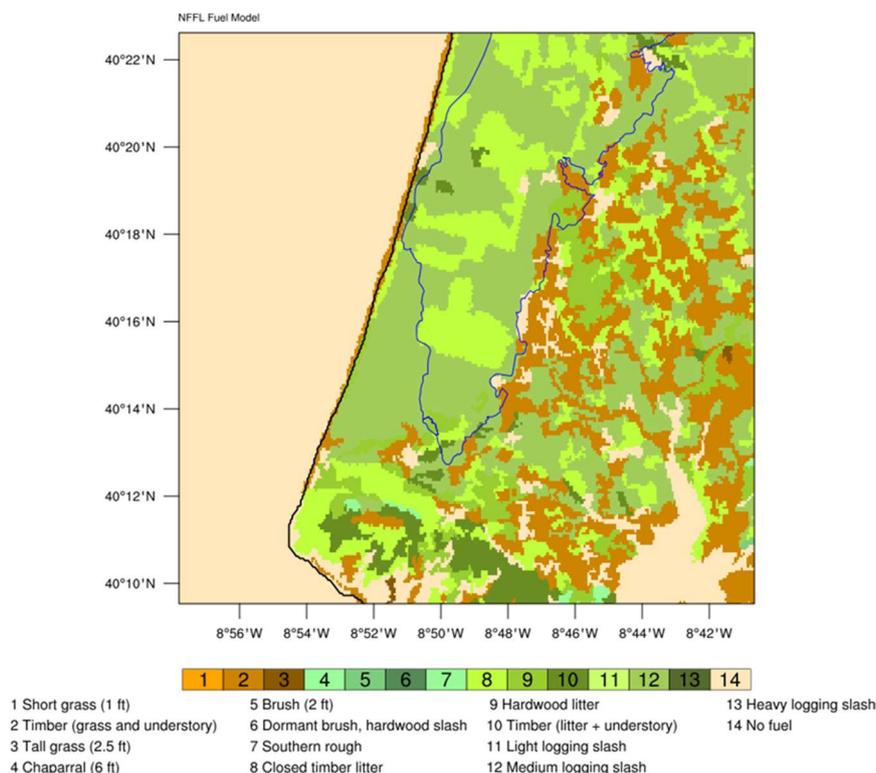


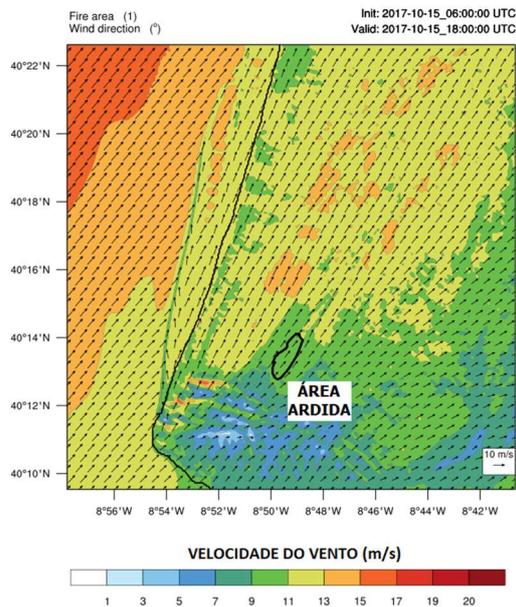
Figura 3.5. Classificação de combustível de acordo com o sistema de classificação NFFL no domínio mais interno.

A Figura 3.6a indica a área do incêndio simulado (contorno preto), velocidade e direção do vento a 10 m (vetores) e velocidade do vento interpolada verticalmente a 6,2 m (colorido, m/s; informação de entrada para o modelo de propagação de fogo) em 15 de outubro de 2017 às 1800 UTC, no domínio de 80 m (d03). A Figura 3.6b apresenta a área ardida e o vento à superfície a partir da experiência MesoNH/ForeFire para o mesmo horário. De maneira geral, o campo do vento é semelhante nas duas experiências. Quanto à área ardida e, visto que o MesoNH/ForeFire considerou os dados oficiais para traçar a evolução da frente de fogo, a análise subjetiva sugere uma subestimação da taxa de propagação do fogo pelo WRF/SFIRE.

Tabela 3.1. Configuração das parametrizações utilizadas na simulação WRF/SFIRE.

	WRF-d01	WRF-d02	WRF-d03
Acoplamento atm-fogo	-	-	Two way
Nudging	-	-	-
Ignição [Hora]	-	-	13.30 UTC
Ignição [coordenadas]	-	-	Lat: 40.214575 Lon: -8.829037
Resolução horizontal	2 km	400 m	80 m / 8 m (sfire)
Microfísica	WSM 6-class graupel scheme	WSM 6-class graupel scheme	WSM 6-class graupel scheme
Camada Limite	Mellor-Yamada- Janjic (Eta) TKE scheme	LES	LES
Superfície	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme
Radiação [lw/sw]	RRTMG	RRTMG	RRTMG
Cumulus	-	-	-
Land model	Noah	Noah	Noah
Turbulência	TKE	TKE	TKE

a) EXPERIÊNCIA WRF/SFIRE



b) EXPERIÊNCIA MESONH/FOREFIRE

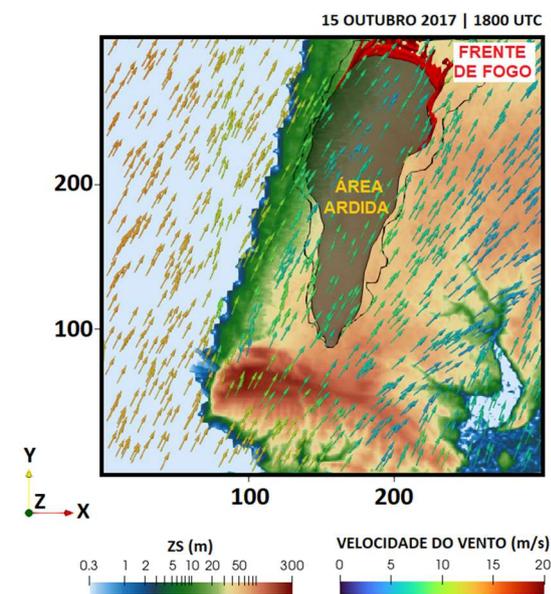


Figura 3.6. Experiência WRF/SFIRE: **a)** Área do incêndio simulada (contorno preto), velocidade e direção do vento a 10 m (setas) e velocidade do vento interpolada verticalmente a 6,2 m (contornos preenchidos, m/s; entrada para o modelo de incêndio) em 15 de outubro de 2017 às 1800 UTC, no domínio mais pequeno (d03); **b)** Experiência MesoNH/ForeFire: vento à superfície e área ardida total até às 1800 UTC (sombreado). O contorno a preto indica a área ardida no final da simulação, enquanto regiões a vermelho indicam a posição da frente de fogo às 1800 UTC.

Tal aspeto torna-se mais evidente quando analisado todo o período simulado pelo WRF/SFIRE (Figura 3.7a-d). A Figura 3.7a-d indica alguns momentos que mostram essas discrepâncias em relação à área do fogo em diferentes intervalos de tempo durante o período simulado em relação ao mapa oficial, o qual é semelhante ao utilizado na simulação de Quiaios com o código MesoNH/ForeFire (ver Figura 3.1b). Note-se que no caso da simulação com o WRF o fogo foi simulado enquanto no Meso-NH se utilizou o fogo observado.

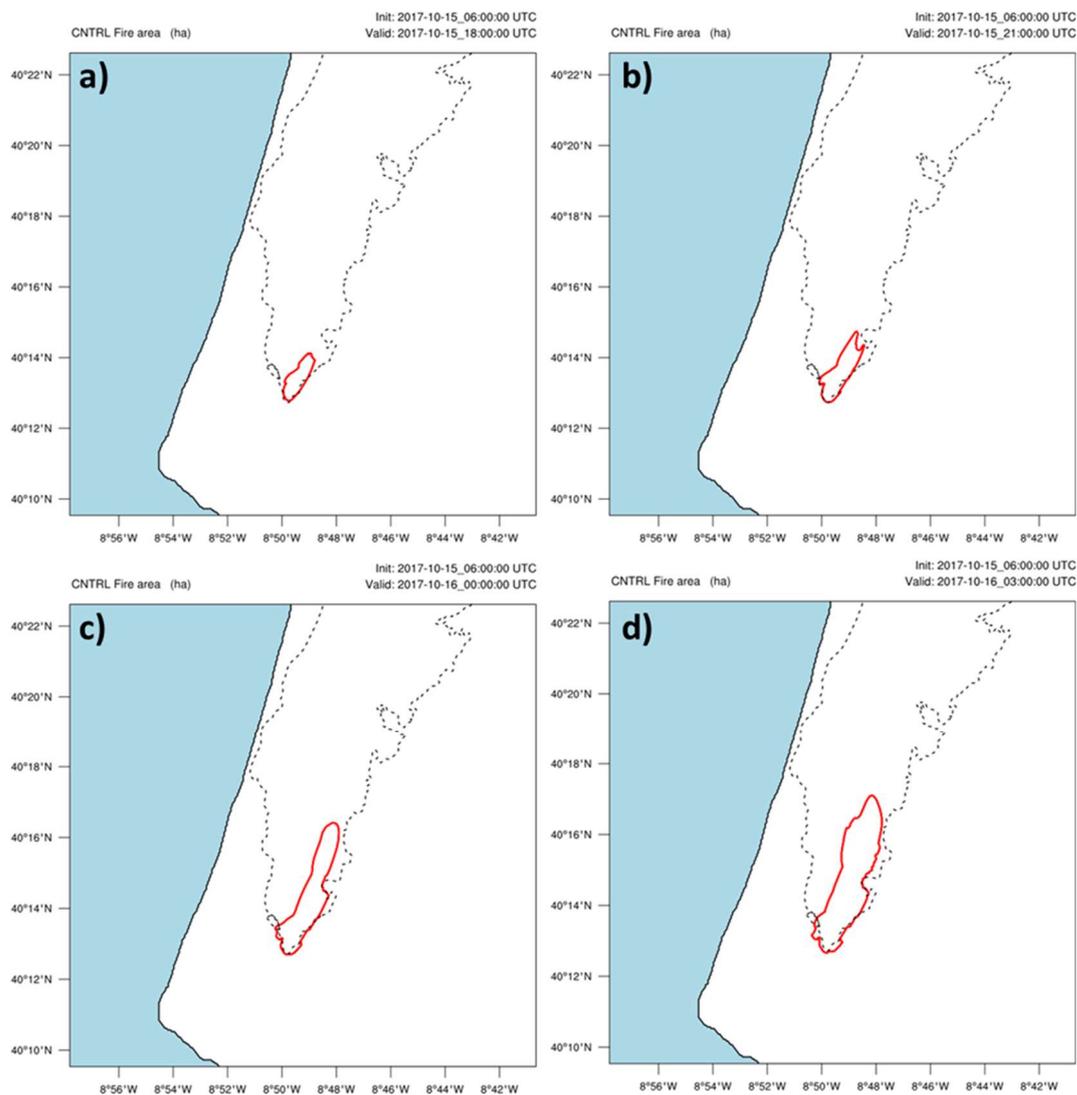


Figura 3.7. Área simulada de incêndio (contorno sólido vermelho) em **a)** 1800 UTC, **b)** 2100 UTC em 15 de outubro de 2017, **c)** 0000 UTC e **d)** 0300 UTC em 16 de outubro de 2017. O contorno tracejado preto mostra a área ardida real recuperada do Copernicus Emergency Management Service. <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR250>.

Nesta secção, o sistema acoplado WRF/SFIRE foi utilizado para explorar o mega incêndio de Quiaios. A simulação mostrou que o código acoplado não foi capaz de simular nenhuma atividade piro-convectiva intensa e, como resultado, nenhuma nuvem do tipo piro-cúmulo foi simulada. Uma razão por trás disso pode estar no campo de vento, o qual apresentava intensas rajadas nos estágios iniciais do incêndio ou na quantidade de energia libertada pelo fogo. No entanto, isso sugere que é necessária uma investigação mais aprofundada sobre a configuração física geral da simulação.

Este trabalho está em andamento e novas simulações têm sido realizadas para perceber melhor as diferenças entre as experiências. Por outro lado, uma simulação do evento de Quiaios em modo totalmente acoplado do código MesoNH/ForeFire também está a ser preparada. Tal trabalho deverá ser apresentado em forma de uma comunicação em uma revista científica após a entrega deste relatório.

4. NOTAS FINAIS

A propagação do fogo associada à atividade piro-convectiva extrema é atualmente altamente imprevisível e difícil de combater. Neste relatório, as descobertas mostram os benefícios do uso de modelos de resolução de nuvens acoplados a modelos de propagação de fogo para avaliar o potencial de condições perigosas associadas à piro-convecção.

O caso de Pedrógão Grande apresentou alto impacto na sociedade e os avanços apresentados com esse estudo é notável. Relativamente ao incêndio de Quiaios, o episódio ocorreu em condições meteorológicas favoráveis a grandes incêndios identificadas a partir de observações meteorológicas. Em ambas situações o código MesoNH/ForeFire foi capaz de reproduzir a estrutura e orientação da pluma de fumo, aspeto importante para ter-se em consideração durante o combate do incêndio e mostrando que o código pode ser usado operacionalmente.

Em termos da evolução da frente de fogo e no caso de Pedrógão Grande, o modelo MesoNH acoplado ao ForeFire mostrou ser consistente com a evolução da frente de fogo de referência. No caso do mega incêndio de Quiaios, a simulação no modo totalmente acoplado encontra-se em preparação. No entanto, a simulação com o modelo WRF/SFIRE indicou uma subestimação da área ardida quando comparado com a simulação do MesoNH/ForeFire que considerou o mapa oficial e foi realizada em modo *one-way* (fogo forçado).

Por fim, os avanços apresentados neste relatório levantaram importantes questões que estão a ser trabalhadas para melhor representar os incêndios em sistemas acoplados de fogo-atmosfera.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Europeu (ECMWF) pelas análises meteorológicas e ao centro de supercomputação da Universidade da Córsega pelo suporte na execução das simulações acopladas.

6. REFERÊNCIAS

Anderson, Hal E., 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-122. Ogden, Utah: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 22p.

Baggio, R.; Filippi, J. B.; Truchot, B. & Couto, F. T., 2022. Local to continental scale coupled fire-atmosphere simulation of large industrial fire plume. *Fire Saf. J.* 103699. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103699>.

Bento-Gonçalves, A., 2021. Os Incêndios Florestais Em Portugal (Vol. 108). Fundação Francisco Manuel Dos Santos, pp. 112.

Coen, J. L., Schroeder, W., Conway, S., & Tarnay, L., 2020. Computational modeling of extreme wildland fire events: A synthesis of scientific understanding with applications to forecasting, land management, and firefighter safety. *J. Comput. Sci.* 45, 101152. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101152>.

Couto, F.T.; Salgado, R.; Costa, M.J. Analysis of intense rainfall events on Madeira Island during the 2009/2010 winter. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012, 12, 2225–2240. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2225-2012>.

Couto, F.T.; Ducrocq, V.; Salgado, R.; Costa, M.J. Numerical simulations of significant orographic precipitation in Madeira island. *Atmos. Res.* 2016, 169, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.10.002>.

Couto, F.T.; Ducrocq, V.; Salgado, R.; Costa, M.J. Understanding significant precipitation in Madeira island using high-resolution numerical simulations of real cases. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2017, 143, 251–264. <https://doi.org/10.1002/qj.2918>.

Couto, F.T., & Salgado, R., 2019. Modelação de descargas eléctricas atmosféricas com modelo de investigação de alta resolução espacial. Report G.1.2.7 – Interreg V A Espanha - Portugal (POCTEP) CILIFO Project (Ref: 0753_CILIFO_5_E). Universidade de Évora, Évora, Portugal. <http://hdl.handle.net/10174/27216>

Couto, F.T., Iakunin, M., Salgado, R., Pinto, P., Viegas, T., & Pinty, J.-P., 2020. Lightning modelling for the research of forest fire ignition in Portugal. *Atmos. Res.* 242, 104993. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104993>.

Couto, F.T.; Cardoso, E.H.C.; Costa, M.J.; Salgado, R.; Guerrero-Rascado, J.L.; Salgueiro, V. How a mesoscale cyclonic vortex over Sahara leads to a dust outbreak in South-western Iberia. *Atmospheric Research*, 2021b, 249, 105302. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105302>.

Dowdy, A.J., Ye, H., Pepler, A., et al., 2019. Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Sci Rep* 9, 10073. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x>.

Duane, A., Castellnou, M., & Brotons, L., 2021. Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events. *Clim. Change.* 165(3-4). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03066-4>.

Filippi, J.-B., Bosseur, F., Mari, C., & Lac, C., 2018. Simulation of a Large Wildfire in a Coupled Fire-Atmosphere Model. *Atmosphere.* 9(6), 218. <https://doi.org/10.3390/atmos9060218>.

Filippi, J.-B., Bosseur, F., Mari, C., Lac, C., Le Moigne, P., Cuenot, B., Veynante, D., Cariolle, D., & Balbi, J.-H., 2009. Coupled atmosphere-wildland fire modelling. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2. <https://doi.org/10.3894/JAMES.2009.1.11>.

Filippi, J.-B., Bosseur, F., Pialat, X., Santoni, P.-A., Strada, S., & Mari, C., 2011. Simulation of Coupled Fire/Atmosphere Interaction with the MesoNH-ForeFire Models. *J. Combust.* 2011, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2011/540390>.

Foz ao minuto, 2017. Incêndios no concelho da Figueira da Foz: Quiaios e Paião. Available online: <http://www.fozaominuto.com/2017/10/incendios-no-concelho-da-figueira-da-15.html> (accessed on 20 March 2023).

Fromm, M., Lindsey, D.T., Servranckx, R., Yue, G., Trickl, T., Sica, R., Doucet, P., & Godin-Beekmann, S., 2010. The Untold Story of Pyrocumulonimbus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(9), 1193-1210. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3004.1>.

Fromm, M.D., & Servranckx, R., 2003. Transport of forest fire smoke above the tropo-pause by supercell convection. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1542, doi:10.1029/2002GL016820, 10. <https://doi.org/10.1029/2002GL016820>.

Guerreiro, J., Fonseca, C., Salgueiro, A., Fernandes, P., Lopez Iglésias, E., de Neufville, R., Mateus, F., Castellnou Ribau, M., Sande Silva, J., Moura, J.M., et al., 2018. Avaliação dos Incêndios Ocorridos Entre 14 e 16 de Outubro de 2017 em Portugal Continental. Relatório Final; CTI Report 2018; Comissão Técnica Independente (CTI), Assem-bleia da República: Lisboa, Portugal, p. 274.

Iakunin, M., Abreu, E.F., Canhoto, P., Pereira, S. and Salgado, R. 2022, Impact of a large artificial lake on regional climate: a Typical Meteorological Year Meso-NH simulation results. *Int J Climatol*, 42(2), 1231-1252. <https://doi.org/10.1002/joc.7299>.

Iakunin, M., Salgado, R., and Potes, M., 2018: Breeze effects at a large artificial lake: summer case study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5191-5210, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5191-2018>.

Lac, C., Chaboureau, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., Barthe, C., Aouizerats, B., Augros, C., Aumond, P., Auguste, F., Bechtold, P., Berthet, S., Bielli, S., Bosseur, F., Caumont, O., Cohard, J.-M., Colin, J., & Couvreux, F., 2018. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geosci. Model Dev.* 11(5), 1929-1969. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018>.

Lang, T. J., Rutledge, S. A., Dolan, B., Krehbiel, P., Rison, W., & Lindsey, D. T., 2014. Lightning in Wildfire Smoke Plumes Observed in Colorado during Summer 2012. *Mon. Weather Rev.* 142(2), 489-507. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-13-00184.1>.

Mandel, J., Amram, S., Beezley, J. D., Kelman, G., Kochanski, A. K., Kondratenko V.Y., Lynn, B. H., Regev, B. & Vejmelka, M., 2014. Recent advances and applications of WRF-SFIRE. *NHESS.* 14. 2829-2845. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2829-2014>.

Pereira, S., Abreu, E.F., Iakunin, M., Cavaco, A., Salgado, R. and Canhoto, P., 2022: Method for solar resource assessment using numerical weather prediction and artificial neural network models based on typical meteorological data: Application to the south of Portugal. *Solar Energy*, 236, 225-238, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.003>.

Pereira, S., P. Canhoto, R. Salgado, M. J. Costa, 2019: Development of an ANN based corrective algorithm of the operational ECMWF global horizontal irradiation forecasts, *Solar Energy*, Vol. 185, Pages 387-405, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.070>

Pinto, P.; Silva, Á.P.; Viegas, D.X.; Almeida, M.; Raposo, J.; Ribeiro, L.M. Influence of Convectively Driven Flows in the Course of a Large Fire in Portugal: The Case of Pedrógão Grande. *Atmosphere* 2022, 13, 414. <https://doi.org/10.3390/atmos13030414>.

Policarpo, C.; Salgado, R.; Costa, M.J. Numerical Simulations of Fog Events in Southern Portugal. *Adv. Meteorol.* 2017, 2017, 1276784. <https://doi.org/10.1155/2017/1276784>.

Relatório CTI, 2017. In *Análise e Apuramento dos Factos Relativos aos Incêndios que Ocorreram em Pedrógão Grande, Castanheira de Pera, Ansião, Alvaiázere, Figueiró dos Vinhos, Arganil, Góis, Penela, Pampilhosa da Serra, Oleiros e Sertã, entre 17 e 24 de junho de 2017*; Comissão Técnica Independente (CTI), Assembleia da República: Lis-boa, Portugal, 2017; p. 296.

Salgado, R. 2005. *Interacção solo-atmosfera em clima semi-árido*. PhD Thesis. Universidade de Évora, Évora, Portugal.

Santos, D., Costa, M.J., Silva, A.M., Salgado, R., 2013. Modeling Saharan desert dust radiative effects on clouds. *Atmos. Res.* 127, 178–194. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.024>.

Simões N., I., Pinto, P., Silva, Á., B., M., Barroso, C., Santos, M., J. Lopes, M., Moreira, N., & Correia, S., 2018. Os Incêndios Florestais de 14 a 16 de outubro de 2017 em Portugal Continental-*Caracterização meteorológica*. In: IPMA. [https://www.ipma.pt/resources.www/docs/publicacoes.site/Simoes Pinto 2018_Relatorio Incendios Outubro2017 %20VF.pdf](https://www.ipma.pt/resources.www/docs/publicacoes.site/Simoes_Pinto_2018_Relatorio_Incendios_Outubro2017_%20VF.pdf)

Tedim, F., Leone, V., & K. McGee, T., 2020. *Extreme Wildfire Events and Disasters: Root Causes and New Management Strategies*. Elsevier. ISBN 9780128157220 pp. 284.

Tory, K.J., Thurston, W., and Kepert, J.D. 2018: Thermodynamics of Pyrocumulus: A Conceptual Study. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 2579–2598, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0377.1>.

Viegas, X. D., Abrantes Almeida, M., Mário Ribeiro, L., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Rodrigues, A., Ribeiro, C., Lopes, S., Jorge, H., & Xavier Viegas, C., 2019. *Análise dos incêndios florestais ocorridos a 15 de outubro de 2017*. Available online: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=analise-dos-incendios-florestais-ocorridos-a-15-de-outubro-de-2017> (accessed on 20 September 2022).

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR). doi:10.5065/1dfh-6p97.