

# FATORES BIOFÍSICOS DA VARIABILIDADE ESPÁCIO-TEMPORAL DOS INCÊNDIOS RURAIS NA REGIÃO CENTRO DE PORTUGAL

Bergonse, Raffaello <sup>1\*</sup>; Oliveira, Sandra <sup>2</sup>; Zêzere, José Luís <sup>3</sup>; Lima e Santos, José Manuel <sup>4</sup>; Moreira, Francisco <sup>5</sup>; Ribeiro, Paulo Flores <sup>6</sup>; Leal, Miguel <sup>7</sup>

1 Centro de Estudos Geográficos e Laboratório Associado TERRA, Universidade de Lisboa; rafaellobergonse@campus.ul.pt

2 Centro de Estudos Geográficos e Laboratório Associado TERRA, Universidade de Lisboa; sandra.oliveira1@campus.ul.pt

3 Centro de Estudos Geográficos e Laboratório Associado TERRA, Universidade de Lisboa; zezere@campus.ul.pt

4 Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa; jlsantos@isa.ulisboa.pt

5 CIBIO – InBIO, Universidade do Porto; fmoreira@cibio.up.pt

6 Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa; pfribeiro@isa.ulisboa.pt

7 Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa; mleal@campus.ul.pt

\*Autor correspondente: Tel.: +351 21 044 3000

**Resumo:** Este trabalho relaciona os padrões espácio-temporais dos incêndios em 972 freguesias no centro de Portugal com um conjunto de fatores biofísicos, aplicando a regressão logística ordinal. Os incêndios são caracterizados usando três parâmetros (1975-2018): percentagem acumulada de área ardida, um índice de concentração temporal da área ardida (Gini) e frequência de incêndios ponderada pela área. Os fatores biofísicos incluem a topografia, a temperatura e a precipitação sazonais, os tipos de uso/ocupação do solo e a respetiva fragmentação espacial. Os resultados mostram que as características dos incêndios variam substancialmente na área de estudo, sendo sobretudo influenciados pelo uso/ocupação do solo, a precipitação de primavera e a temperatura de verão.

**Palavras-chave:** índice de concentração de Gini; regressão ordinal; fatores biofísicos dos incêndios; padrões espácio-temporais

**Abstract:** We investigated the relationship between the spatial and temporal wildfire patterns within 972 parishes in central Portugal and a set of potential biophysical control factors, using ordinal logistic regression. Wildfire activity is characterized using three parameters (1975-2018): cumulative percentage of area burnt, an index of temporal concentration of burnt damage (Gini), and area-weighted wildfire frequency. Biophysical factors include topography, temperature, and seasonal rainfall, as well as land use/land cover and its spatial fragmentation. Results show that wildfire characteristics vary greatly within the study area, being mostly influenced by land use/land cover, spring rainfall and summer temperature.

**Keywords:** Gini concentration index; ordinal logistic regression; wildfire biophysical controls; spatial and temporal patterns

## 1. Introdução

O comportamento espácio-temporal dos incêndios rurais é muito variável no território português. Os maiores incêndios tendem a ocorrer no sector central do país, dominado por floresta e matos, enquanto as outras áreas com elevada densidade de ignições, nomeadamente as áreas suburbanas das regiões noroeste e de Lisboa, apresentam incêndios de menor dimensão (Tonini et al., 2017). Estes padrões resultam em grande parte da variação espacial de diversos fatores biofísicos que influenciam a

ocorrência de incêndios e das suas múltiplas combinações: combustível, topografia e condições meteorológicas (Fernandes et al., 2016).

Este estudo teve como objetivos caracterizar a distribuição espaço-temporal das áreas ardidas (1975-2018) nas 972 freguesias que compõem a NUTS II Centro (área total de 28 199 km<sup>2</sup>) e analisar a sua relação com um conjunto de potenciais controlos biofísicos, de forma a identificar os fatores preponderantes e a variação da sua importância na área de estudo.

## 2. Dados e Métodos

### 2.1. Características espaço-temporais dos incêndios

Utilizaram-se três parâmetros para descrever as características espaço-temporais dos incêndios durante o período 1975-2018 (44 anos), calculados com base nos mapas anuais de área ardida em formato vetorial produzidos pelo ICNF: 1) a percentagem acumulada de área da freguesia ardida (PAA), que quantifica a tendência da freguesia para arder extensivamente ao longo do tempo; 2) a frequência de incêndios ponderada pela área (FIPA), quantificada como o número total de incêndios ocorridos na freguesia, dividido pela área desta em km<sup>2</sup>, representando a recorrência de incêndios ao longo do tempo; 3) o índice de concentração de Gini (ICG) (Gini, 1921) aplicado às áreas ardidas anuais, a fim de quantificar a concentração temporal de área ardida em cada freguesia. Valores elevados significam uma concentração da área ardida num número reduzido de anos.

### 2.2. Fatores biofísicos

Foram adotadas inicialmente 28 variáveis, descrevendo as condições topográficas e climáticas, a biomassa, o uso e ocupação do solo e a sua fragmentação (Tabela 1). As variáveis de ocupação do solo e fragmentação, representadas em percentagem de área da freguesia, correspondem a médias ponderadas pelo número de anos que cada COS vigorou, seguindo o procedimento de Oliveira *et al.*, 2020. Estes dados estão apenas disponíveis desde 1990, assumindo-se, contudo, que as características biofísicas analisadas são representativas do período em estudo.

A fim de evitar multicolinearidade, analisaram-se as correlações bivariadas, eliminando-se variáveis com  $R > 0,7$  ou  $< -0,7$ . Calculou-se subsequentemente o *Variance Inflating Factor* (VIF) para as restantes, eliminando-se de forma iterativa aquela de VIF mais elevado até só restarem valores de VIF  $< 5$ . O conjunto final de variáveis integradas no modelo é identificado com um asterisco na Tabela 1.

**Tabela 1.** As variáveis biofísicas utilizadas. Variáveis identificadas com um asterisco passaram a análise de multicolinearidade inicial. Topografia obtida a partir de (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-eu-dem>). Variáveis climáticas obtidas a partir de <https://www.worldclim.org/>. COS para os anos 1990, 1995, 2007, 2010, 2015 e 2018 obtido a partir da Direção-Geral do Território. Produtividade primária líquida obtida a partir de imagens MODIS da *United States Geological Survey* (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgv006/>).

Fator	Código	Variáveis	Período	Resolução espacial original	Unidades
Topografia	ELE50, 75, 80, 90, 95	Elevação (percentis 50, 75, 80, 90, 95)	n.a.	25 m	Metros (m)
	DEC50, 75, 80*, 90, 95	Declive (percentis 50, 75, 80, 90, 95)	n.a.	25 m	Graus (°)
Clima	PMA	Precipitação média anual	1970-2000	≈1000 m	Milímetros (mm)
	PAJ*	Precipitação acumulada média Abril-Junho			
	PJS	Precipitação acumulada média Julho-Setembro			
	TAJ	Temperatura média mensal Abril-Junho			
	TJS*	Temperatura média mensal Julho-Setembro			
Biomassa	PPL*	Produtividade primária líquida	2000-2014	500 m	KgC/m <sup>2</sup>
Uso/Ocupação do Solo (UOS)	AGR*	Agricultura	1990-2018	Vectorial. Área mínima cartografada 1 ha	% área da freguesia
	PIN	Florestas de pinheiro bravo/manso			
	SAZ*	Florestas de sobreiro/azinheira			
	EUC*	Florestas de eucalipto			
	INV*	Florestas de espécies invasivas	1995-2018		
	CON*	Florestas de coníferas excluindo pinheiro bravo/manso	1990-2018		
	FOL*	Florestas de folhosas excluindo eucalipto/ sobreiro/azinheira			
MHN*	Mato e vegetação herbácea natural				
Fragmentação do UOS	FRAGF*	Fragmentação das parcelas de floresta	1995-2018		Nº de centróides/ha
	FRAGFM	Fragmentação das parcelas de floresta/matos/veg. herbácea natural			

Todos os parâmetros de distribuição dos incêndios e as variáveis biofísicas foram calculados por freguesia (Carta Administrativa Oficial de Portugal 2018, DGT), sendo as freguesias usadas como unidades de análise na estimação dos modelos.

### 2.3. Regressão logística ordinal

A regressão logística ordinal apresenta a vantagem de não assumir relações lineares entre variáveis dependentes e independentes, assim como não requerer uma distribuição normal, e de ser pouco sensível a *outliers* (Maroco, 2007). As variáveis dependentes foram classificadas em quintis, adotando uma escala de medida ordinal, e os valores dos fatores biofísicos foram convertidos em *z-scores*.

Construíram-se modelos de regressão usando cada um dos parâmetros que caracterizam a distribuição dos incêndios como variável dependente (PAA, FIPA, ICG). Os modelos foram construídos iterativamente, sendo as variáveis menos significativas excluídas uma a uma até só restarem variáveis significativas ( $p \leq 0,05$ ).

As operações de análise espacial recorreram ao ArcMAP 10.7.1 (ESRI Inc.), sendo adotado um pixel de 25 m para operações matriciais. As análises estatísticas foram realizadas no SPSS 24 (IBM Corp.).

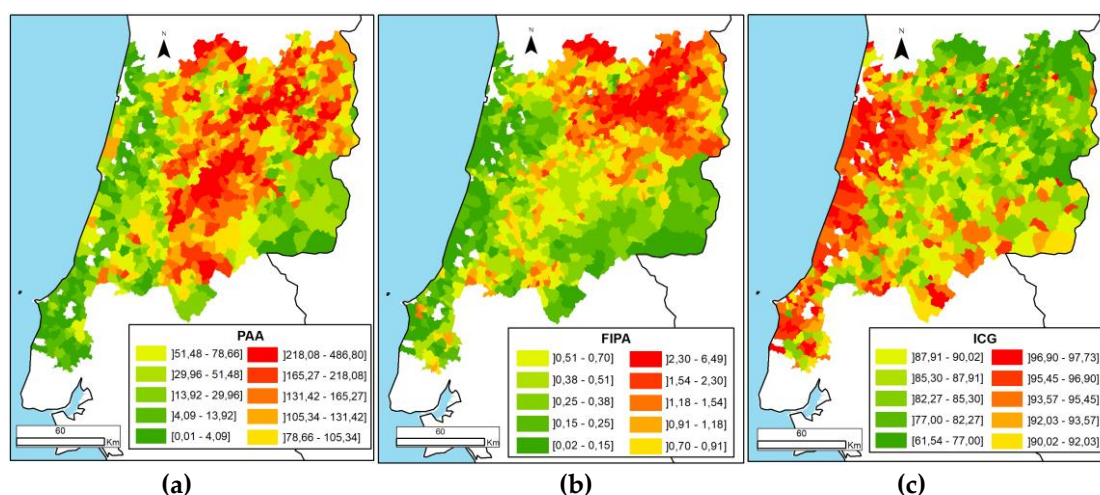
## 3. Resultados e discussão

### 3.1. Variabilidade espaço-temporal dos incêndios

Das 972 freguesias da região Centro, 35 nunca arderam durante o período de estudo, tendo sido excluídas das análises.

A percentagem acumulada de área ardida (PAA) (Figura 1-a) é marcada por valores reduzidos, dominando quase exclusivamente o setor costeiro e o SE, com valores elevados e maior heterogeneidade no centro e NE da área de estudo. A frequência de incêndios ponderada pela área (FIPA) (Figura 1-b) apresenta uma concentração similar de valores reduzidos ao longo da costa e a SE. Neste caso, porém, os valores mais elevados estão concentrados no NE, com o setor central marcado por valores médios.

Pelo contrário, o índice de concentração de Gini (ICG) da área ardida (Figura 1-c) mostra a existência de valores mais elevados ao longo da costa, com valores mais heterogêneos na restante área de estudo, médios a muito altos nos sectores S e SE, e sobretudo médios a muito baixos no centro-norte e NE.



**Figura 1.** Distribuição espacial dos parâmetros de comportamento dos incêndios. (a) PAA; (b) FIPA; (c) ICG. Valores classificados em decis.

A análise combinada dos três parâmetros sugere a existência de regimes de fogo distintos na área de estudo. Por exemplo, o sector costeiro é marcado por áreas ardidas pouco extensas (baixa PAA) e incêndios pouco frequentes (baixa FIPA), com as áreas ardidas concentradas no tempo (elevado ICG). Em contraste, o sector NE é distinguido por incêndios frequentes e área ardida extensa, com as áreas ardidas a ocorrerem relativamente dispersas no tempo.

### 3.2. Relações com os fatores biofísicos

Todos os modelos obtidos (Tabela 2) são estatisticamente significativos. Considerando os pseudo- $R^2$  de Cox & Snell, Nagelkerke e McFadden, o modelo de PAA obteve respetivamente 0,627, 0,653 e 0,306, com os valores para FIPA ligeiramente mais baixos de 0,551, 0,574 e 0,249, e para ICG de 0,488, 0,509 e 0,208, os mais baixos dos três modelos.

Entre as variáveis usadas, o declive (DEC80) mostrou ter apenas um efeito modesto sobre a PAA, o que pode ser devido ao seu papel na propagação do fogo (Marques *et al.*, 2011). A fragmentação das parcelas de floresta (FRAGF) exerce um efeito positivo fraco apenas sobre o ICG. Embora seja de esperar que a fragmentação contrarie a propagação do fogo (Gralewicz *et al.*, 2012), pela descontinuidade espacial da vegetação, este efeito tenderá a ser mais reduzido nas condições meteorológicas excecionais que promovem grandes incêndios.

**Tabela 2.** Variáveis biofísicas integradas nos modelos de regressão para PAA, FIPA e ICG, respetivos coeficientes de regressão e significação estatística.

PAA			
Variável	Coeficiente	Wald	Sig.
MHN	1.486	181.010	0.000
AGR	-1.144	139.879	0.000
PAJ	0.767	68.181	0.000
TJS	0.723	57.663	0.000
PPL	-0.426	22.860	0.000
SAZ	-0.363	20.279	0.000
FOL	0.273	13.795	0.000
DEC80	0.262	8.398	0.004
EUC	0.233	8.169	0.004
CON	-0.216	11.138	0.001
INV	0.197	9.699	0.002
FIPA			
Variável	Coeficiente	Wald	Sig.
PAJ	1.391	222.450	0.000
MHN	1.222	156.020	0.000
FOL	0.531	51.421	0.000
TJS	0.358	17.436	0.000
SAZ	-0.301	9.705	0.002
PPL	-0.276	10.654	0.001
AGR	0.268	11.610	0.001
EUC	0.193	5.915	0.015
ICG			
Variável	Coeficiente	Wald	Sig.
MHN	-1.495	223.518	0.000
PAJ	-0.685	72.839	0.000
PPL	0.443	29.249	0.000
TJS	-0.266	10.723	0.001
EUC	-0.224	9.328	0.002
FRAGF	0.166	4.662	0.031
FOL	-0.145	4.139	0.042

### 3.2.1. Uso e ocupação do solo

As variáveis de UOS exercem uma grande influência sobre os padrões espaço-temporais dos incêndios, especialmente os matos/vegetação herbácea natural (MHN), variável dominante sobre a PAA e o ICG, e a segunda em relação à FIPA.

A proporção de área ardida (PAA) aumenta com a existência de matos (MHN), folhosas (FOL), eucaliptos (EUC) e espécies invasoras (INV), corroborando a tendência destas classes para arder (Moreira *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2014, 2020). O efeito contrário foi associado à agricultura (AGR), florestas de sobreiro/azinheira (SAZ) e outras coníferas (CON), que mostram uma baixa propensão para arder (Moreira *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2014).

Em relação à frequência de incêndios (FIPA), a percentagem de área de matos (MHN) é a segunda variável mais importante, sendo apenas ultrapassada pela precipitação da Primavera (PAJ). A relação com os matos pode ser devida à rápida regeneração pós-fogo, promovendo a disponibilidade de combustível em intervalos curtos. FOL, AGR e EUC também exercem efeitos positivos. A agricultura tende a estar associada a atividades que promovem as ignições, como as queimadas, e possivelmente a uma maior presença de pessoas, passíveis de produzir ignições (Catry *et al.*, 2009). O EUC parece exercer o seu efeito através da relativamente rápida regeneração. Contrariamente às anteriores, as SAZ promovem baixas frequências de incêndios.

A concentração temporal da área ardida (ICG) diminui sobretudo com o aumento de matos e vegetação herbácea natural, mas também com o aumento de eucaliptos e outras folhosas (MHN, EUC e FOL, respetivamente), possivelmente associada à maior frequência de incêndios nestas classes,

distribuindo a área ardida ao longo do tempo.

### 3.2.2. Clima

Todos os parâmetros que caracterizam a distribuição espaço-temporal dos incêndios são influenciados por variáveis climáticas.

A temperatura de verão (TJS) e a precipitação de primavera (PAJ) exercem efeitos positivos sobre a extensão de área ardida (PAA) e a frequência de incêndios (FIPA), com a primeira associada à deflagração e propagação do fogo, a segunda à disponibilidade de combustível para arder posteriormente (Oliveira *et al.*, 2012; Pereira *et al.*, 2005). Em contrapartida, ambas exercem efeitos negativos sobre a concentração temporal de área ardida (ICG): ao promoverem incêndios mais frequentes, promovem também a dispersão dos danos ao longo do tempo.

## 4. Conclusões

A distribuição espaço-temporal dos incêndios varia significativamente na região Centro, sugerindo a existência de regimes de fogo distintos que incluem, entre outros, um setor litoral de incêndios pouco extensivos e pouco frequentes, e um setor NE com incêndios extensivos e de elevada frequência.

Entre as variáveis analisadas, o uso/ocupação do solo, a precipitação de primavera e as temperaturas de verão têm efeitos preponderantes sobre as características dos incêndios. Os matos/vegetação herbácea natural dominam na ocupação do solo, confirmando a relevância deste tipo de coberto vegetal para a ocorrência de incêndios em Portugal. A agricultura, por seu turno, está relacionada com uma menor extensão das áreas ardidas, promovendo ligeiramente a frequência dos incêndios. Os pseudo-R<sup>2</sup> obtidos indicam que uma parte importante da variância dos parâmetros modelados ficou por explicar, em especial no caso da concentração temporal da área ardida (ICG), sugerindo o papel de outros fatores que não foram considerados, possivelmente de natureza social (e.g. a densidade populacional).

## Agradecimentos

Trabalho financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no quadro do projeto People & Fire (PCIF/AGT/0136/2017) e pela unidade de investigação UIDB/00295/2020 e UIDP/00295/2020.

## Bibliografia

- Catry, F. X., Rego, F. C., Bação, F. L., & Moreira, F. (2009). Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 18(8), 921–931. <https://doi.org/10.1071/WF07123>
- Fernandes, P. M., Monteiro-Henriques, T., Guiomar, N., Loureiro, C., & Barros, A. M. G. (2016). Bottom-Up Variables Govern Large-Fire Size in Portugal. *Ecosystems*, 19(8), 1362–1375. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0010-2>
- Gini, C. (1921). Measurement of inequality of incomes. *The Economic Journal*, 31(121), 124–126.
- Gralewicz, N. J., Nelson, T. A., & Wulder, M. A. (2012). Factors influencing national scale wildfire susceptibility in Canada. *Forest Ecology and Management*, 265, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.031>
- Maroco, J. (2007). *Análise Estatística com Utilização do SPSS* (3rd ed.).
- Marques, S., Borges, J. G., Garcia-Gonzalo, J., Moreira, F., Carreiras, J. M. B., Oliveira, M. M., Cantarinha, A., Botequim, B., & Pereira, J. M. C. (2011). Characterization of wildfires in Portugal. *European Journal of Forest Research*, 130(5), 775–784. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0470-4>
- Moreira, F., Vaz, P., Catry, F., & Silva, J. S. (2009). Regional variations in wildfire susceptibility of land-cover types in Portugal: Implications for landscape management to minimize fire hazard. *International Journal of Wildland Fire*, 18(5), 563–574. <https://doi.org/10.1071/WF07098>

- Oliveira, S., Gonçalves, A., & Zêzere, J. L. (2020). Reassessing wildfire susceptibility and hazard for mainland Portugal. *Science of the Total Environment*, 762, 143121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143121>
- Oliveira, S., Moreira, F., Boca, R., San-Miguel-Ayaz, J., & Pereira, J. M. C. (2014). Assessment of fire selectivity in relation to land cover and topography: A comparison between Southern European countries. *International Journal of Wildland Fire*, 23(5), 620–630. <https://doi.org/10.1071/WF12053>
- Oliveira, S., Oehler, F., San-Miguel-Ayaz, J., Camia, A., & Pereira, J. M. C. (2012). Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. *Forest Ecology and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.003>
- Pereira, M. G., Trigo, R. M., Da Camara, C. C., Pereira, J. M. C., & Leite, S. M. (2005). Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1–2), 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.007>
- Tonini, M., Pereira, M. G., Parente, J., & Vega Orozco, C. (2017). Evolution of forest fires in Portugal: from spatio-temporal point events to smoothed density maps. *Natural Hazards*, 85(3), 1489–1510. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2637-x>