



LABORATÓRIO COLABORATIVO
PARA GESTÃO INTEGRADA DA FLORESTA E DO FOGO



CENTRO DE ESTUDOS FLORESTAIS

Cartografia de Regimes de Fogo à Escala da Freguesia (1980-2017)



FICHA TÉCNICA

Título

Cartografia de Regimes de Fogo à Escala da Freguesia (1980-2017)

Projeto ForestWISE nº

P32100231

Cliente

AGIF, I.P. – Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais, no âmbito da aquisição de serviços de investigação e desenvolvimento CEXC/09CE-SGPCM/2020

Direção de Projeto

Paulo Fernandes (ForestWISE)
Arlindo dos Santos (AGIF)

Gestão de Projeto

Rui Pinto (ForestWISE)

Equipa Técnica (Autoria)

José Miguel Cardoso Pereira (CEF/ISA)
Pedro Cristiano Silva (CEF/ISA)
Inês Melo (CEF/ISA)
Duarte Oom* (CEF/ISA)
Giuseppe Baldassarre (CEF/ISA)
Mário Gonzalez Pereira (CITAB/UTAD)

*Atualmente no Joint Research Centre, European Commission, Itália.

Citação recomendada

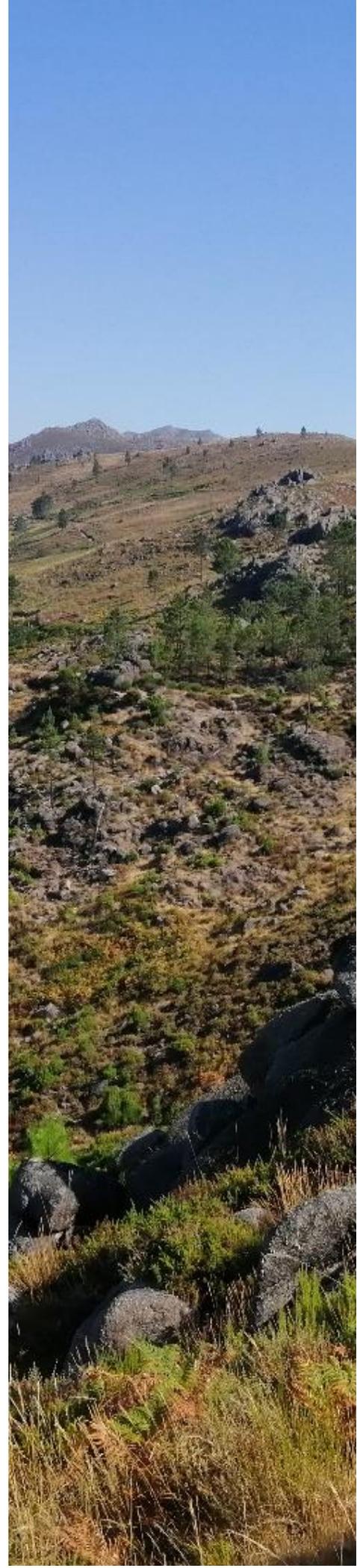
Pereira J.M.C., Silva P.C., Melo I., Oom D., Baldassarre G. e Pereira M.G. (2022). Cartografia de Regimes de Fogo à Escala da Freguesia (1980-2017). ForestWISE (Coord.) - Projetos AGIF 2021 (P32100231), Vila Real, 29 pp.



forestwise



janeiro 2022



Índice Geral

Sumário Executivo	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. DADOS	1
2.1. Condicionamentos dos dados.....	1
2.2. Descrição sumária das variáveis construídas	2
2.2.1. <i>Variáveis descritoras do fogo.</i>	3
2.2.2. <i>Variáveis antecedentes</i>	7
3. ANÁLISE DE DADOS	9
3.1. Análise em componentes principais (ACP)	9
3.2. Análise classificatória.....	9
3.3. Testes-v	10
4. RESULTADOS	11
4.1. Mapas das variáveis	11
4.1.1. <i>Variáveis do fogo.</i>	11
4.1.2. <i>Variáveis antecedentes</i>	15
4.2. ACP e classificação	17
4.3. Testes-v	19
4.4. Mapas dos regimes.....	21
5. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	25
7. REFERÊNCIAS	29

Índice de Figuras

Figura 1- Série cronológica cumulativa (1980-2017) dos valores diários de área queimada na freguesia de Arões, concelho de Vale de Cambra, distrito de Aveiro (4033 ha).....	5
Figura 2- Série cronológica do valor total nacional de área queimada em cada dia, para o período 1980 – 2017. Com base nestes dados demarcaram-se os semestres de Verão (a vermelho) e de Inverno (azul). .	6
Figura 3- Área queimada, normalizada pela área da freguesia (ha/ha)	11
Figura 4- Coeficiente de variação da área queimada normalizada (ha/ha).	11
Figura 5- Tamanho médio dos 10 maiores fogos (ha), normalizado pela área de cada freguesia.....	12
Figura 6- Número de fogos, normalizado pela área da freguesia (nº/ha).....	12
Figura 7- Potência radiativa (intensidade) do fogo (MW).	13
Figura 8- Duração da época de fogo (dias)	14
Figura 9- Percentagem do número de dias com fogo que ocorrem no Inverno (1 nov. – 30 abr.).....	14
Figura 10- Ocupação predominante do solo.	15
Figura 11- Tipos de termoclima.	16
Figura 12- Tipos de pluvioclima.	16
Figura 13- Densidade populacional média.	17
Figura 14- Variação percentual da densidade populacional entre os censos de 1991 e de 2021, com referência ao censo de 1991.....	17
Figura 15- Representação dos regimes no plano das componentes principais 1 e 2 (a) e 1 e 3 (b).	18
Figura 16- Testes-v das variáveis do fogo, para cada regime. O tamanho das barras mede a magnitude da associação de cada variável a cada regime, positiva no caso das barras vermelhas e negativa no caso das barras azuis.	19
Figura 17- Testes-v das categorias das variáveis antecedentes, para cada regime. Quanto maior [menor] o tamanho da barra vermelha [azul] melhor [pior] a categoria está representada no regime..	20
Figura 18- Mapa dos nove regimes de fogo de Portugal Continental.	21
Figura 19- Macroregimes do fogo em Portugal Continental, obtidos por agregação dos nove regimes do mapa da figura 18.	24

Índice de Tabelas

Tabela 1- Resultados da ACP, com identificação das cinco componentes usadas na análise classificatória.	18
---	----

Sumário Executivo

Apresenta-se neste documento o estudo intitulado “Cartografia de Regimes de Fogo à Escala da Freguesia (1980-2017)”, cujo objetivo é analisar, num período de quase 40 anos, os fogos rurais que ocorreram em Portugal Continental, agrupando os seus diversos padrões de ocorrência no espaço e no tempo.

O relatório descreve um exercício de análise quantitativa de dados georreferenciados e privilegia as sínteses de informação sob a forma de mapas, que facilitam a compreensão da distribuição espacial dos diferentes regimes de fogo definidos. A descrição detalhada das variáveis utilizadas permite perceber como se obtiveram as propostas de cartografias de regime de fogo apresentadas.

Identificaram-se nove regimes de fogo em Portugal Continental e após a análise da associação entre esses regimes e variáveis antecedentes relativas a ocupação do solo, bioclima e demografia, sugeriram a sua agregação em quatro macrorregimes, onde predominam, respetivamente, as queimadas de pastorícia, pequenos fogos periurbanos, incêndios florestais e queimadas agrícolas.

1. INTRODUÇÃO

A definição de regimes de fogo incorpora um conjunto de parâmetros essenciais para descrever padrões espaciais, temporais e comportamentais do fogo, tal como a frequência, tamanho, sazonalidade e intensidade (definição em sentido estrito). A caracterização de regimes pode também incluir variáveis antecedentes, ou pré-requisitos para a ignição e propagação do fogo, (e.g. clima, a população e uso da terra), bem como as consequências imediatas do fogo, representadas pelos seus vários impactos (definição em sentido lato) (Krebs *et al.*, 2010). São precisos dados abrangendo um período de várias décadas para uma caracterização fiável de regimes de fogo (Whitlock *et al.*, 2010).

A classificação e cartografia de regimes de fogo tem como principal vocação o apoio ao planeamento de estratégias de médio/longo prazo para a informação e sensibilização, prevenção, preparação e supressão, à escala regional/nacional e numa lógica de gestão integrada de fogo. Esta tarefa diferencia-se claramente da mais conhecida cartografia de perigo ou de risco de incêndio, uma vez que não visa quantificar a probabilidade de ocorrência do fogo, eventualmente conjugada com a quantificação dos danos potencialmente resultantes. A classificação e cartografia de regimes identifica e localiza síndromes de fogo, ou seja, conjuntos coerentes de “sintomas” do fenómeno fogo, tendo sobretudo uma função de descrição multidimensional. Produz uma tipologia qualitativa, que não tem necessariamente implícita uma valoração da sua (in)desejabilidade. O objetivo do presente trabalho é propor uma classificação dos regimes de fogo em Portugal Continental e fazer a sua representação cartográfica, para apoio à regionalização de políticas públicas de âmbito nacional para a gestão integrada dos fogos rurais.

2. DADOS

2.1. Condicionalismos dos dados

A classificação e cartografia dos regimes de fogo em Portugal Continental requereu a criação de diversas variáveis descritoras de atributos espaciais, temporais e de comportamento do fogo, ao longo de um período de várias décadas. Esta tarefa foi complexa, devido à necessidade de harmonizar num suporte espacial comum – a Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) de 2017, ao nível da freguesia – um conjunto de variáveis construídas a partir de dados de várias proveniências, de diferentes naturezas e abrangendo diferentes períodos de tempo.

Esta heterogeneidade dos dados subjacentes impossibilita uma harmonização perfeita entre as diferentes variáveis. A maior dificuldade decorre do facto de, na “Lista de incêndios florestais ao nível do local”¹, corrigida através dos procedimentos descritos em Pereira *et al.* (2011), onde

¹ <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/estat-sgif#list>

é designada por *Portuguese Rural Fire Database* (PRFD), a totalidade da área de cada incêndio ser alocada à freguesia onde se verificou a ignição. Esta peculiaridade de organização dos dados espaciais dos fogos induz enviesamentos nos dados, uma vez que em determinados anos há freguesias que registam uma área queimada várias vezes superior à extensão do seu território, enquanto que a freguesias vizinhas efetivamente afetadas por um grande incêndio, não é contabilizada qualquer área queimada.

A abordagem que usámos para minorar este problema foi a de recorrer aos mapas anuais de área queimada em Portugal Continental, produzidos nalguns anos pelo ICNF e noutros anos pelo Centro de Estudos Florestais do Instituto Superior de Agronomia, com base em imagens de satélite. Os perímetros dos fogos cartografados nesses mapas, em cada ano, foram cruzados com os limites das freguesias da CAOP 2017, obtendo-se assim uma distribuição correta da área de cada fogo pelas freguesias realmente atingidas. Contudo, este procedimento tem duas limitações: i) a cartografia baseada em imagens de satélite não permite delimitar com confiança áreas queimadas com dimensão inferior a aproximadamente 5 ha; ii) os mapas são anuais, portanto não permitem identificar datas de ocorrência dos fogos com maior precisão do que essa.

Tendo em conta estas características das duas fontes de dados, usaram-se os mapas anuais de área queimada, baseados em imagens de satélite, para criar as variáveis “Área queimada por freguesia” e “Área média dos 10 maiores fogos”. Para fogos com área inferior a 5 ha, usaram-se os valores da PRFD, em que a totalidade da área queimada é afetada à freguesia onde ocorre a ignição. A variável “Coeficiente de variação inter-anual da área queimada”, produzida a partir dos mapas anuais de área queimada por freguesia, também tem a sua origem nos mapas anuais criados por classificação de imagens de satélite. As variáveis “Número de fogos por freguesia” e “Coeficiente de variação do número de fogos” também provém da PRFD, tal como as variáveis “Duração da época de fogo” e “% da época no Inverno”, que requerem datação diária dos fogos.

Há ainda uma terceira fonte de dados usados neste estudo. A variável “Intensidade do fogo” foi criada com dados de potência radiativa do fogo do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS), disponibilizados no produto de fogos ativos MCD14ML².

2.2. Descrição sumária das variáveis construídas

Construíram-se mapas de sete variáveis caracterizadoras de aspetos espaciais, temporais e comportamentais do fogo, para caracterizar os seus regimes em Portugal Continental, ao nível da freguesia: área ardida, coeficiente de variação da área ardida, tamanho médio das 10 maiores áreas queimadas em cada freguesia, número de fogos, potência radiativa (intensidade) do fogo, duração da época de fogo, e percentagem da época de fogo que ocorre no “Inverno”. Para formalizar a interpretação dos regimes em termos de variáveis que os influenciam, ou

² <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>

condicionam criaram-se mapas de mais cinco variáveis: ocupação predominante do solo, bioclima, nas vertentes térmica e pluviométrica, e demografia, descrita pela densidade populacional média e sua variação.

Foram excluídas da análise classificatória as freguesias que registaram uma fração de área queimada acumulada, ao longo dos 38 anos do estudo, inferior a 5% da sua área total (316 freguesias) ou cuja reduzida incidência e dispersão temporal dos fogos impossibilitaram a demarcação da época de fogo, nos termos do procedimento descrito abaixo (572 freguesias). Embora as freguesias excluídas representem aproximadamente 30% da área de Portugal continental, apenas correspondem a cerca de 7% da sua área queimada. Após a aplicação das duas máscaras de exclusão e da não inclusão de sete freguesias com dados omissos, ou de qualidade duvidosa, foram analisadas 2222 das 2882 freguesias de Portugal continental. A exclusão da análise de freguesias com muito baixa incidência do fogo foi feita para focar a atenção nas regiões onde o fogo tem maior relevância, mas não implica a impossibilidade de ocorrência, seguramente muito esporádica, de eventos significativos nessas freguesias.

2.2.1. Variáveis descritoras do fogo.

Neste ponto é feita uma descrição sumária de cada uma das variáveis que se construíram e que constituem a base de dados que serviu de suporte às diferentes análises efetuadas.

Nome: AA_ha (área ardida, em hectares queimados por hectare da área da freguesia)

Origem: Mapas anuais de área queimada (CEF/ISA, ICNF) obtidos por satélite, para as áreas ≥ 5 ha e PRFD para as áreas < 5 ha.

Unidades: ha/ha.

Observações: Pode exceder o valor de 1, porque uma mesma área pode arder várias vezes nos quase 40 anos da nossa análise (1980-2017). É uma das principais medidas da incidência geográfica do fogo.

Nome: AA_CV (coeficiente de variação de AA_ha)

Origem: Calculada a partir da variável anterior.

Unidades: adimensional.

Observações: É dada pelo quociente entre o desvio-padrão da área queimada anual e o valor médio de área queimada, em cada freguesia, para todo o período de estudo. Valores baixos da variável indicam que a área queimada é estável entre anos, enquanto que valores altos indicam variação substancial. Valores baixos costumam estar associados a locais onde o fogo é uma ocorrência regular, enquanto que valores altos representam ocorrência mais esporádica de fogo.

Nome: Media_10M (Valor médio das 10 maiores áreas queimadas)

Origem: Calculada a partir de AA_ha.

Unidades: ha/ha.

Observações: É o valor médio das 10 maiores áreas queimadas na freguesia (e não dos 10 maiores fogos com início na freguesia), dividida pela área da freguesia. Destina-se a caracterizar a ocorrência de grandes incêndios, para permitir distinguir freguesias onde um determinado valor de área queimada ocorre pela acumulação de um grande número de pequenos fogos, por oposição aquelas onde a área queimada registada se deve a um pequeno número de grandes incêndios.

Nome: Fogos_ha (número de fogos por hectare da área da freguesia)

Origem: PRFD

Unidades: nº/ha.

Observações: Usa-se a PRFD por permitir contabilizar todos os fogos de que há registo, incluindo aqueles com área inferior a 5 ha, nomeadamente fogachos (< 1 ha, a partir de 1990), que não seriam considerados caso se recorresse à cartografia por satélite. Esta variável tende a ter valores altos nas freguesias com elevada densidade populacional, mas que, simultaneamente, tenham áreas com ocupação do solo passível de arder e onde ocorram práticas diversas, legítimas ou ilegítimas de uso do fogo.

Nome: FRP90 (percentil 90 da potência radiativa do fogo)

Origem: MCD14ML, sensores TERRA e AQUA do satélite *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS).

Unidades: MegaWatts (MW)

Observações: Esta variável caracteriza a intensidade das frentes de chamas ativas nos momentos de passagem dos satélites. A maioria dos fogos ativos detetados por satélite tem valores relativamente baixos de potência radiativa, qualquer que seja o tipo de vegetação. Porém, apenas alguns tipos de formações vegetais têm biomassa com características capazes de sustentar incêndios de elevada potência radiativa. O uso de um percentil alto da distribuição dos valores de potência radiativa do fogo em cada freguesia visa distinguir locais onde ocorrem fogos de copas, em florestas ou matagais altos, daqueles onde apenas se verificam fogos de superfície e de pequena dimensão.

Por vezes, o fumo de grandes incêndios impede a observação da superfície, prejudicando a deteção destes dados. Este problema afetou, p.e., alguns dos grandes incêndios de 2003 e de 2017 no Pinhal Interior, e de 2017 nas matas do litoral.

Os dados de potência radiativa dos fogos apenas estão disponíveis desde 2001, pelo que esta variável cobre só a segunda metade do período de estudo. Só usámos fogos ativos com nível de confiança > 30%, detetados em 2550 freguesias, atribuindo-se o valor zero ao percentil 90 da potência radiativa dos fogos relativamente às restantes 332 freguesias sem fogos ativos detetados, partindo do pressuposto que os fogos nelas ocorridos tiveram intensidade inferior ao limiar de deteção pelos sensores do MODIS.

Nome: Duração época (duração da época de fogo)

Origem: PRFD

Unidades: número de dias

Observações: Esta variável usa uma definição própria de “época de fogo”, sendo a variável conceptualmente mais elaborada deste estudo. Para cada freguesia, adicionaram-se as áreas ardidadas de todos os fogos ocorridos ao longo do período de estudo, com os respetivos dias de início e ignorando o ano de ocorrência. Portanto, criou-se uma única série temporal para cada freguesia, datada de 1 de janeiro a 31 de dezembro. O valor de área queimada registado em cada dia é o somatório das áreas que arderam nesse dia do ano, ao longo de todos os anos de período de estudo (Figura 1).

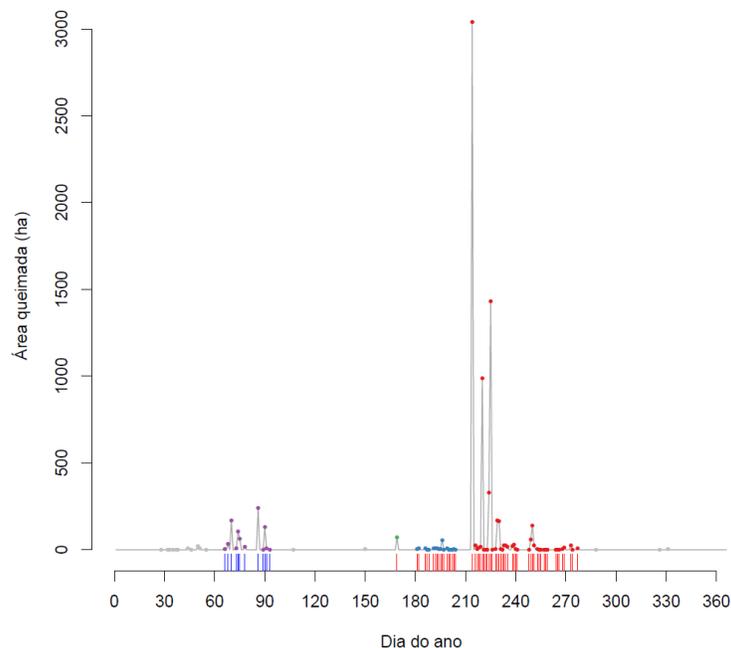


Figura 1- Série cronológica cumulativa (1980-2017) dos valores diários de área queimada na freguesia de Arões, concelho de Vale de Cambra, distrito de Aveiro (4033 ha).

Os dias assinalados com traço vertical azul, por baixo da série de valores de área queimada, correspondem à época de inverno e os assinalados a vermelho pertencem à época de verão. Esta

freguesia tem uma época de fogo secundária em março e uma época principal no verão. A demarcação entre os períodos de verão e de inverno foi feita com base na série cronológica de área queimada diária agregada para todo o país, durante o período 1980 – 2017 (Figura 2).

Ocorrem valores mínimos anuais de área queimada próximo do início de maio e do início de novembro, pelo que se demarcou o período de verão como decorrendo entre 1 de maio e 31 de outubro e o período de inverno entre 1 de novembro e 30 de abril. Esta é a demarcação mais defensável entre semestres, com base nos dados da PRFD. Evidentemente, o número de dias com fogo durante cada um destes períodos varia de freguesia para freguesia.

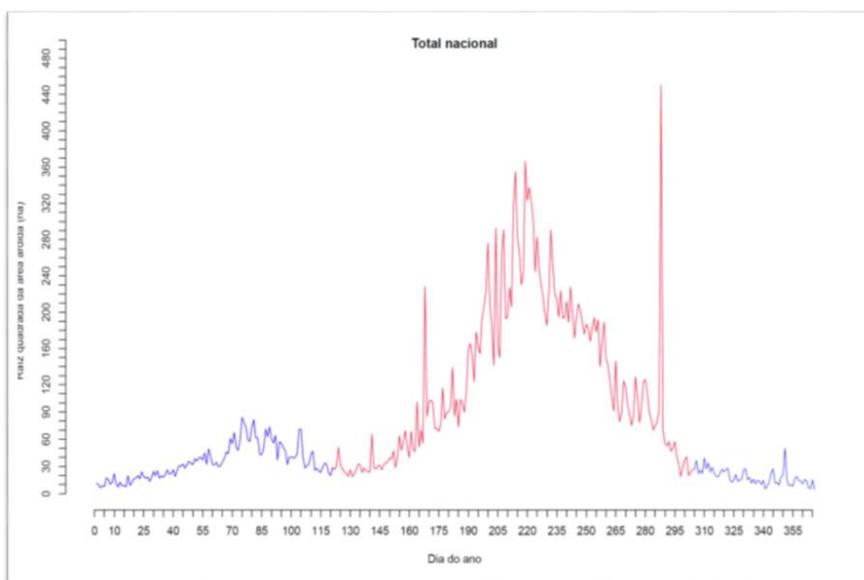


Figura 2- Série cronológica do valor total nacional de área queimada em cada dia, para o período 1980 – 2017. Com base nestes dados demarcaram-se os semestres de Verão (a vermelho) e de Inverno (azul).

O algoritmo adaptativo desenvolvido para quantificar a duração da época de fogo utiliza, numa 1ª fase, o algoritmo de classificação DBSCAN (Ester *et al.*, 1996) para agregar os dias com fogo em intervalos temporais que representam *concentrações secundárias de fogo*. Para parametrizar o algoritmo DBSCAN tem-se em conta, por um lado, a densidade temporal da distribuição dos dias de ocorrência de fogo (DOF) na série cronológica para determinar a amplitude de janelas móveis temporais centradas nesses DOFs, e por outro lado, a % de área ardível de cada freguesia consideraram-se não ardíveis as megaclasses da Cartografia de Ocupação do Solo “territórios edificados”, “agricultura”, “pastagens”, “espaços com pouca vegetação”, “zonas húmidas” e “massas de água”) para estimar a área mínima queimada que cada janela temporal deve conter de modo que o DOF não seja considerado isolado (DOFs isolados não são contabilizados para o cálculo da duração da época). Mais precisamente, considera-se que um DOF é *não isolado* se numa dada janela temporal centrada nesse DOF a média diária de área queimada for superior à área ardível da freguesia/366. Este valor corresponde aproximadamente à média diária nacional de área queimada (considerando todos

os anos agregados), uma vez que no conjunto dos anos em estudo a área queimada em Portugal Continental (aproximadamente 5164×10^3 ha) foi sensivelmente equivalente à área total considerada ardível (aproximadamente 4551×10^3 ha). Para definir o raio da janela temporal centrada em cada DOF, que vai depender da dispersão temporal dos DOFs na freguesia, utilizou-se o percentil 90 da distribuição das diferenças entre dias consecutivos com ocorrência de fogo. Deste modo, em freguesias com muita área ardível, para que um dia seja considerado como pertencente a uma época de fogo, a janela temporal centrada nesse dia tem de registar uma área queimada proporcionalmente maior que numa freguesia com pouca área ardível. Em freguesias com espaçamentos grandes entre dias consecutivos com fogo, a janela temporal centrada é maior que nas freguesias com uma elevada densidade de dias de fogo. Uma concentração secundária de fogo é alocada à Época de Verão [Inverno], se a fração do intervalo temporal que está contida no período do Verão for maior [menor] que a fração contida no período do Inverno. Dentro das épocas de Verão e Inverno as concentrações secundárias de fogo separadas entre si por menos que 30 dias são agregadas no menor intervalo temporal que as contém. A duração da época de Verão [Inverno] é então calculada como a soma das durações dos intervalos que representam concentrações (ou uniões de concentrações) secundárias de fogo alocadas à época de Verão [Inverno]. Finalmente a duração total da época de fogo é definida como a soma das durações das épocas de Verão e Inverno.

Nome: %Duração_Inv (Importância da época de Inverno)

Origem: PRFD.

Unidades: adimensional (%)

Observações: % do nº de dias considerados de época de fogo que ocorrem no semestre de Inverno (novembro – abril). Esta variável tem como principal função contribuir para a identificação das freguesias em que há queimadas de Inverno, tipicamente associadas à prática da pastorícia tradicional de montanha.

2.2.2. Variáveis antecedentes

Nome: COS_predom (Ocupação predominante do solo)

Origem: Cartografias de Ocupação do Solo (COS/DGT), 1995, 2007, 2010, 2015 e 2018.

Unidades: classes de ocupação do solo, variável nominal.

Observações: A ocupação do solo condiciona fortemente os usos do fogo (que, reciprocamente, condicionam fortemente a ocupação do solo), a propensão da vegetação para arder, bem como o comportamento dos fogos. Para cada COS, determinou-se a ocupação do solo mais abundante em cada freguesia. Depois, alocou-se a cada freguesia a ocupação que por maior número de vezes foi a mais abundante, considerando as cinco COS. A carta pretende representar a ocupação

do solo principal e mais estável. Deste modo, o período abrangido pelo mapa é mais compatibilizável com o dos dados de fogo do que seria o de qualquer COS individual.

Nome: Termo (Termoclima)

Origem: Sistema Global de Classificação Bioclimática (Rivas-Martínez *et al.*, 2011), adaptado para Portugal por Monteiro-Henriques *et al.* (2015).

Unidades: tipos de termoclima, variável ordinal.

Observações: O bioclima sintetiza as condicionantes climáticas ao crescimento da vegetação. A análise separada dos efeitos da temperatura e da precipitação sobre a vegetação facilita a interpretação das suas relações com os regimes de fogo. Os tipos de termoclima são demarcados a partir da combinação de dados dos macrobioclimas, do Índice de Termicidade compensado (I_{tc}) e da Temperatura positiva anual (T_p), tal como definidos em Rivas-Martínez *et al.* (2011).

Nome: Pluvio (Pluvioclima)

Origem: Sistema Global de Classificação Bioclimática (Rivas-Martínez *et al.*, 2011), adaptado para Portugal por Monteiro-Henriques *et al.* (2015).

Unidades: tipos de pluvioclima, variável ordinal.

Observações: Os tipos de pluvioclima são definidos com base numa segmentação de valores do Índice Ombrotérmico (I_o), tal como definidos na Tabela 5 de Monteiro-Henriques *et al.* (2015).

Nome: PopMéd (Densidade populacional média)

Origem: Censos 2021 do Instituto Nacional de Estatística

Unidades: habitantes por km²

Observações: O mapa representa o valor médio da densidade populacional em cada freguesia, calculado com dados dos censos de 1991, 2001, 2011 e 2021. A densidade populacional exerce um forte controle sobre o número de ignições, bem como sobre a rapidez das respostas de deteção/alerta e de supressão.

Nome: PopVar (Variação da densidade populacional média)

Origem: Censos 2021 do Instituto Nacional de Estatística

Unidades: %

Observações: O mapa representa a diferença entre a densidade populacional em 1991 e 2021, dividida pela densidade populacional de 1991 e multiplicada por 100%. As áreas em perda demográfica estão associadas a situações de abandono rural, alterações do uso da terra e acumulação de combustíveis problemáticos para a gestão do fogo.

3. ANÁLISE DE DADOS

O procedimento de classificação dos regimes de fogo em Portugal Continental constou de uma análise em componentes principais dos dados das sete variáveis descritoras do fogo, seguida da análise classificatória (*cluster analysis*) com base nas componentes principais consideradas relevantes. Cada classe (*cluster*) identificado neste passo corresponde a um regime de fogo. O terceiro passo consistiu na identificação das variáveis do fogo e das categorias ou intervalos de valores das variáveis antecedentes mais fortemente associados a cada regime.

3.1. Análise em componentes principais (ACP)

Normalizaram-se as sete variáveis descritas acima para equilibrar as suas importâncias relativas, uma vez que estavam expressas em unidades e grandezas muito distintas. O conjunto dos dados normalizados foi posteriormente sujeito a uma análise em componentes principais, para reduzir a sua dimensionalidade e excluir as componentes que explicassem uma menor proporção da variabilidade total dos dados, muitas vezes associadas a “ruído”. Para determinar o número de componentes principais a reter levou-se em conta não só a % cumulativa de variância explicada, mas também a observação da estrutura espacial nos mapas de cada componente principal.

3.2. Análise classificatória

Seguidamente, os dados das componentes principais que se considerou conterem a informação relevante para a caracterização e classificação dos regimes foram sujeitas a uma análise classificatória não hierárquica, usando o algoritmo dos K-medóides (PAM; Kaufman and Rousseeuw, 1990; Schubert and Rousseeuw, 2021), mais robusto à presença de observações atípicas que outros algoritmos, como por exemplo, o algoritmo mais conhecido das K-médias. O número ótimo de grupos foi estimado recorrendo a medidas de estabilidade e de validação interna (Sekula *et al.*, 2017). As medidas de estabilidade avaliam a consistência de um resultado da análise classificatória, comparando-o com as partições em grupos que se obtêm após a remoção de uma variável de cada vez. As medidas de validação interna refletem a coesão interna dos grupos e a separabilidade entre grupos.

Usaram-se quatro medidas de estabilidade: proporção média de não-sobreposição (APN), distância média (AD), distância média entre médias (ADM) e figura de mérito (FOM) e três medidas de validação interna (conectividade, índice de Dunn e silhueta).

3.3. Testes-v

Para descrever objetivamente os regimes do ponto de vista das variáveis descritoras de fogo e em termos dos descritores climáticos, de ocupação de solo e demográficos (variáveis antecedentes), usámos um teste estatístico designado por *teste-v* (Lebart *et al.*, 1995; Morineau, 1984). No primeiro caso, em que as variáveis tomam valores numéricos, o teste-v é baseado na comparação entre a média das k observações de uma variável no regime e a média dessa variável na população. Quanto maior o valor absoluto do teste-v, melhor a variável caracteriza o regime. No segundo caso em que as variáveis tomam valores qualitativos, o teste-v baseia-se na comparação entre a proporção do número de observações de uma categoria no regime e a proporção dessa categoria na população. Quanto maior o valor positivo (ou menor o negativo) do teste-v, mais a categoria está sobre-representada (sub-representada) no regime. Dentro de cada regime, as variáveis descritoras de fogo foram ordenadas por ordem decrescente de relevância, ou seja, por ordem decrescente dos respetivos valores do teste-v. Seguiu-se um procedimento análogo para as cinco variáveis antecedentes, tendo-se neste caso ordenado as categorias por ordem decrescente dos correspondentes valores do teste-v. Apenas variáveis e/ou categorias com valores estatisticamente significativos para um nível de 1% foram consideradas.

4. RESULTADOS

4.1. Mapas das variáveis

Optou-se por apresentar como resultados os mapas das variáveis usadas na classificação de regimes, porque uma parte deles não resulta apenas da representação espacializada dos dados. Foi necessário tomar decisões sobre exclusão de valores, definição de limiares entre classes e mesmo de cálculos mais complexos, como os explicados para o cálculo da duração da época de fogo.

4.1.1. Variáveis do fogo.

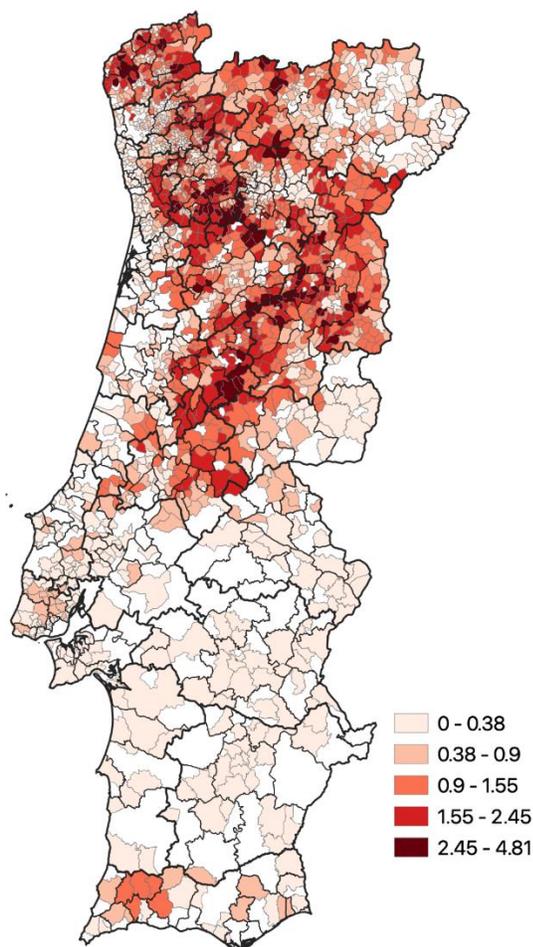


Figura 3- Área queimada, normalizada pela área da freguesia (ha/ha)

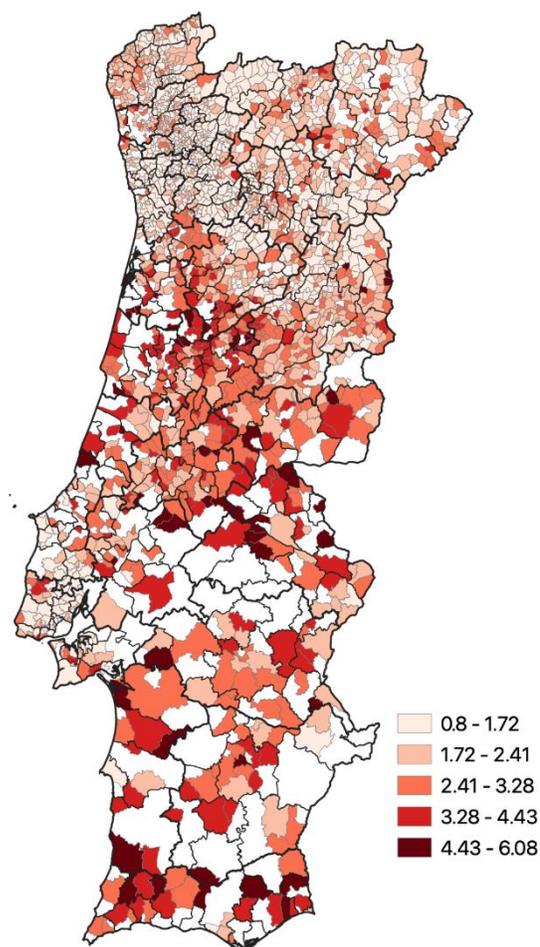


Figura 4- Coeficiente de variação da área queimada normalizada (adim.).

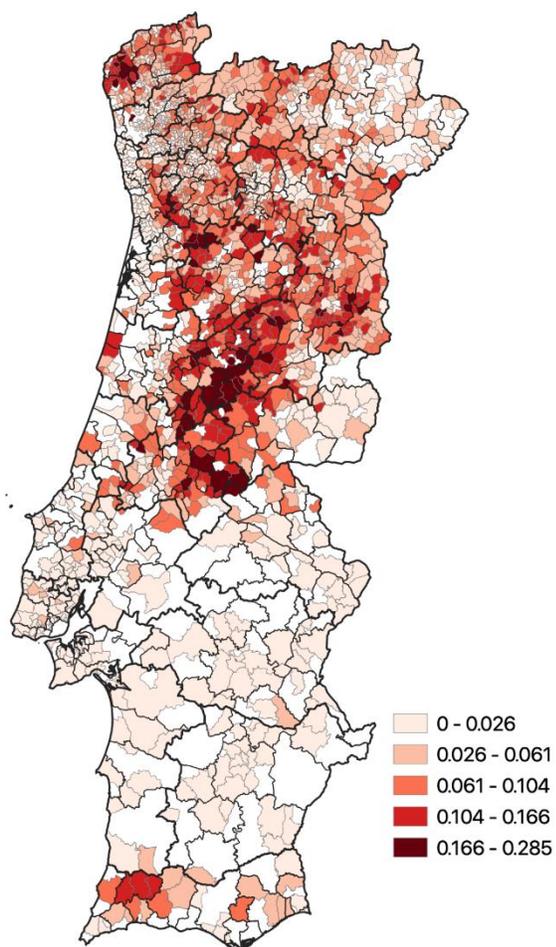


Figura 5- Tamanho médio dos 10 maiores fogos (ha), normalizado pela área de cada freguesia.

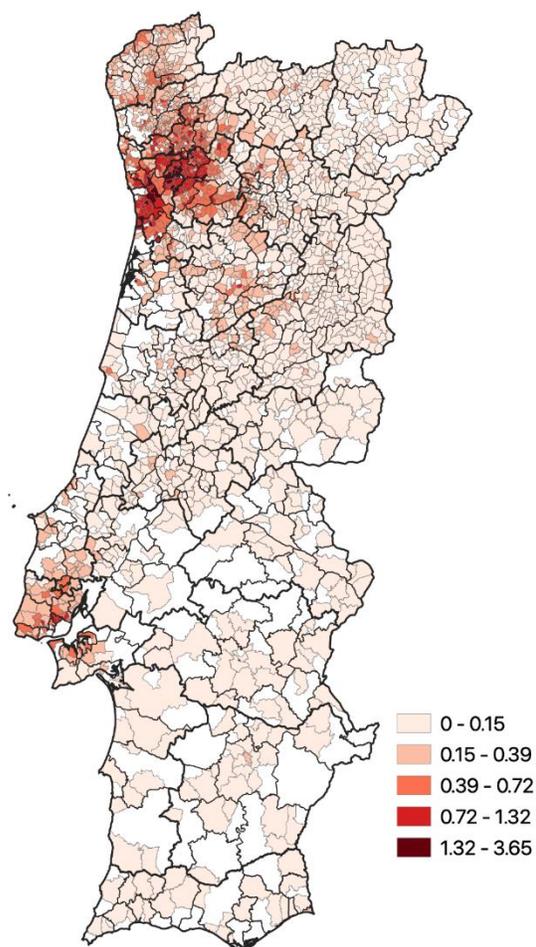


Figura 6- Número de fogos, normalizado pela área da freguesia (nº/ha).

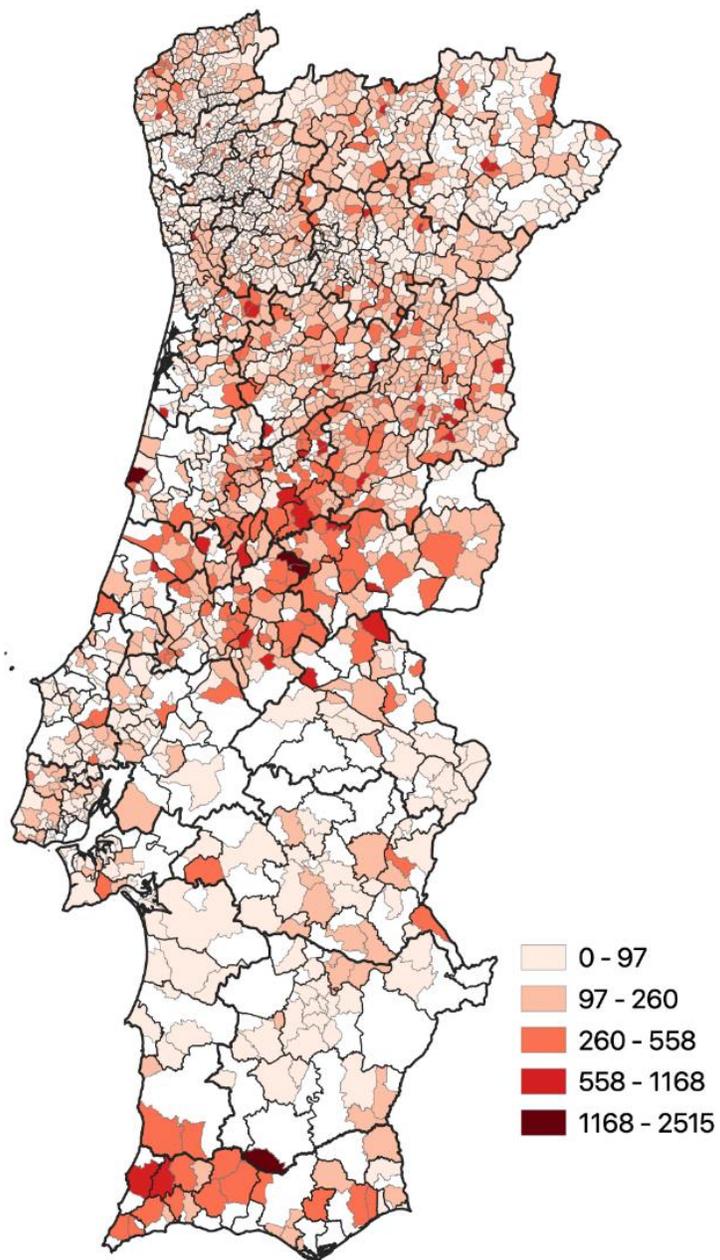


Figura 7- Potência radiativa (intensidade) do fogo (MW).

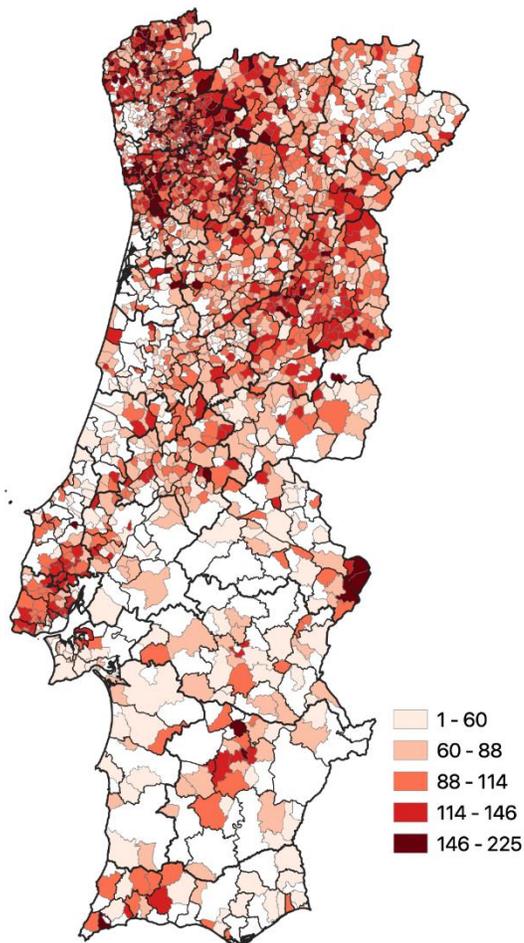


Figura 8- Duração da época de fogo (dias)

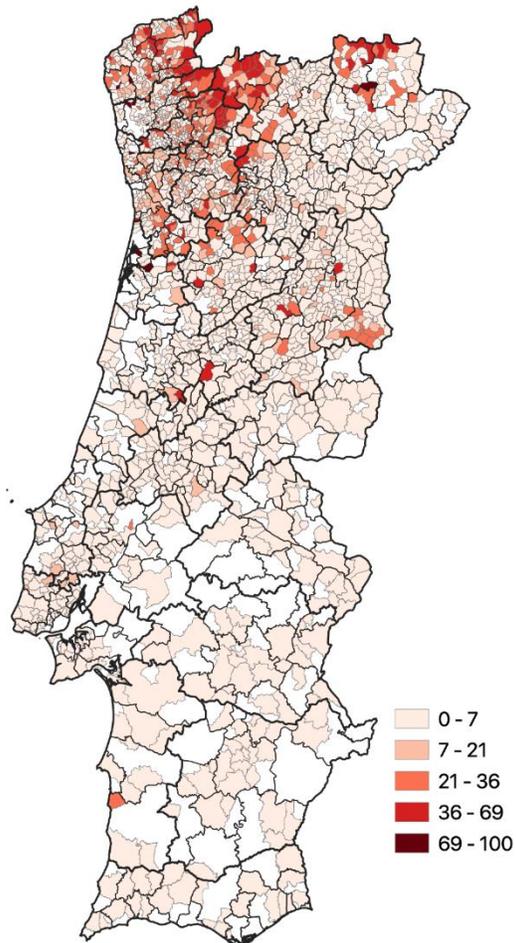


Figura 9- Percentagem do número de dias com fogo que ocorrem no Inverno (1 nov. – 30 abr.).

4.1.2. Variáveis antecedentes

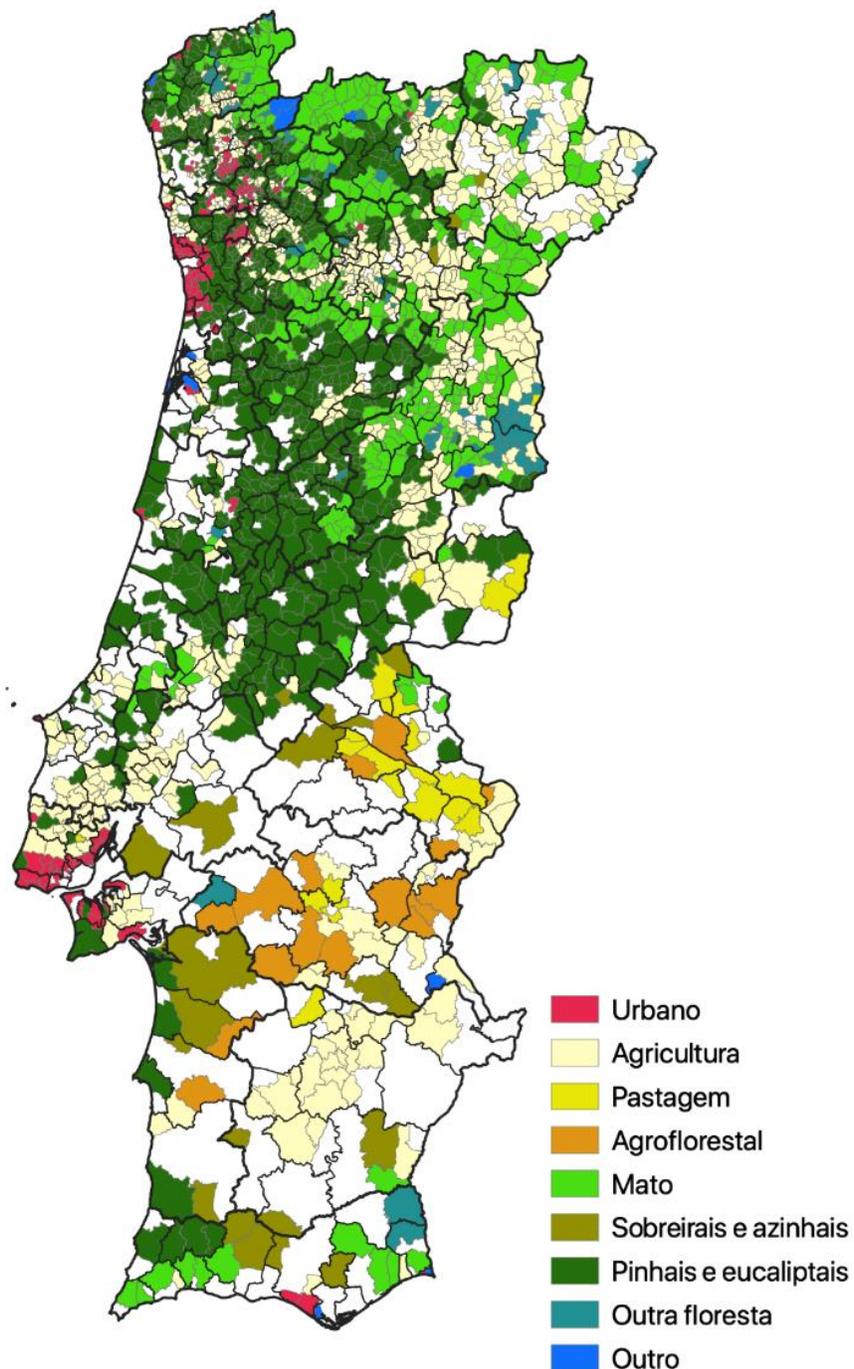


Figura 10- Ocupação predominante do solo.

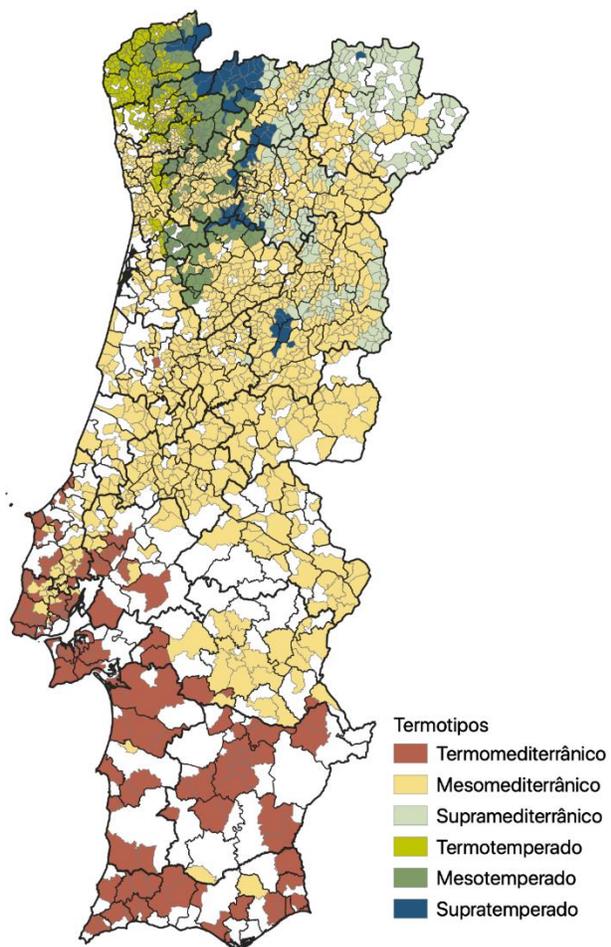


Figura 11- Tipos de termoclima.

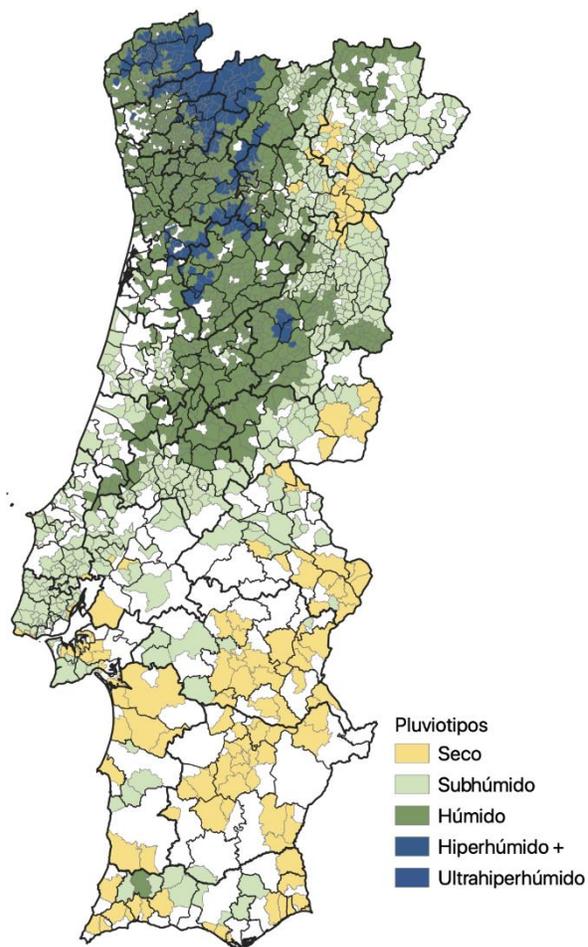


Figura 12- Tipos de pluvioclima.

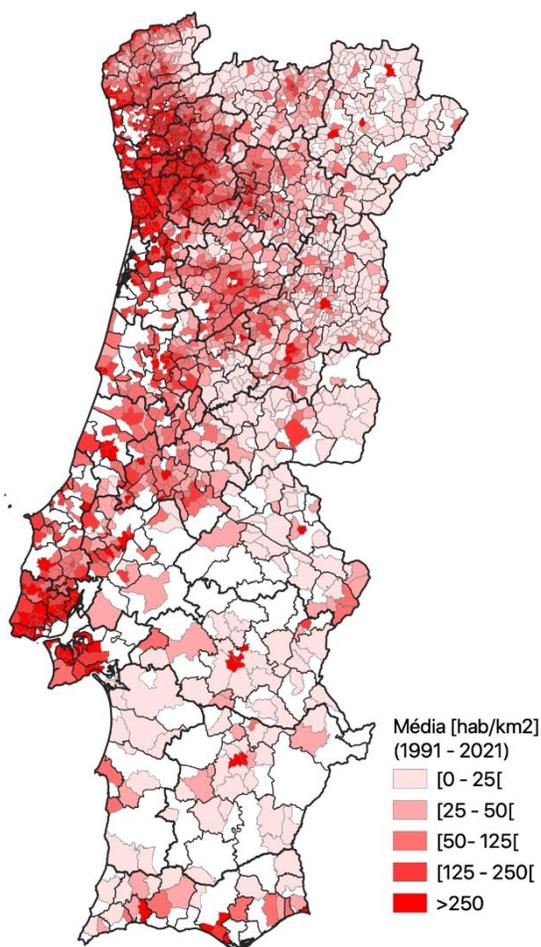


Figura 13- Densidade populacional média.

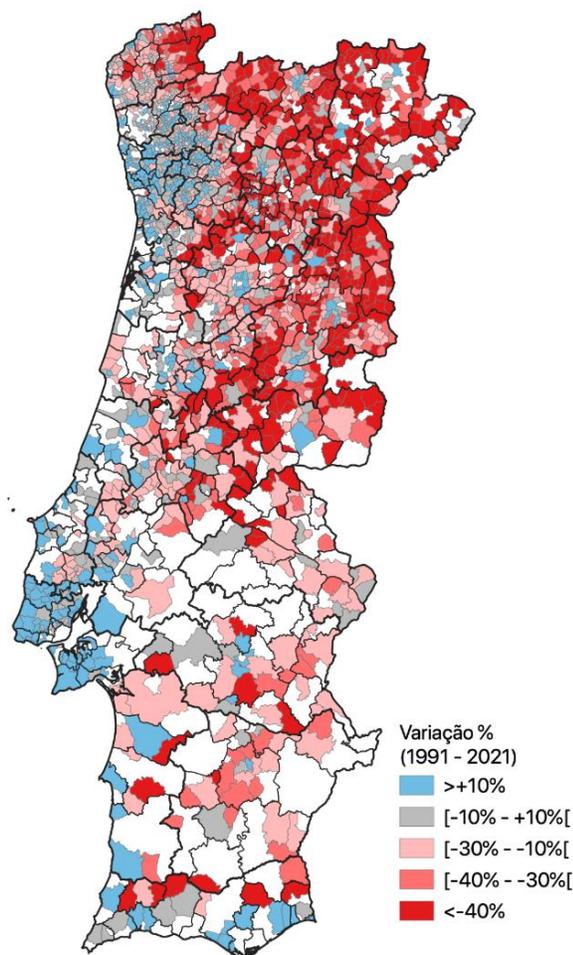


Figura 14- Variação percentual da densidade populacional entre os censos de 1991 e de 2021, com referência ao censo de 1991.

4.2. ACP e classificação

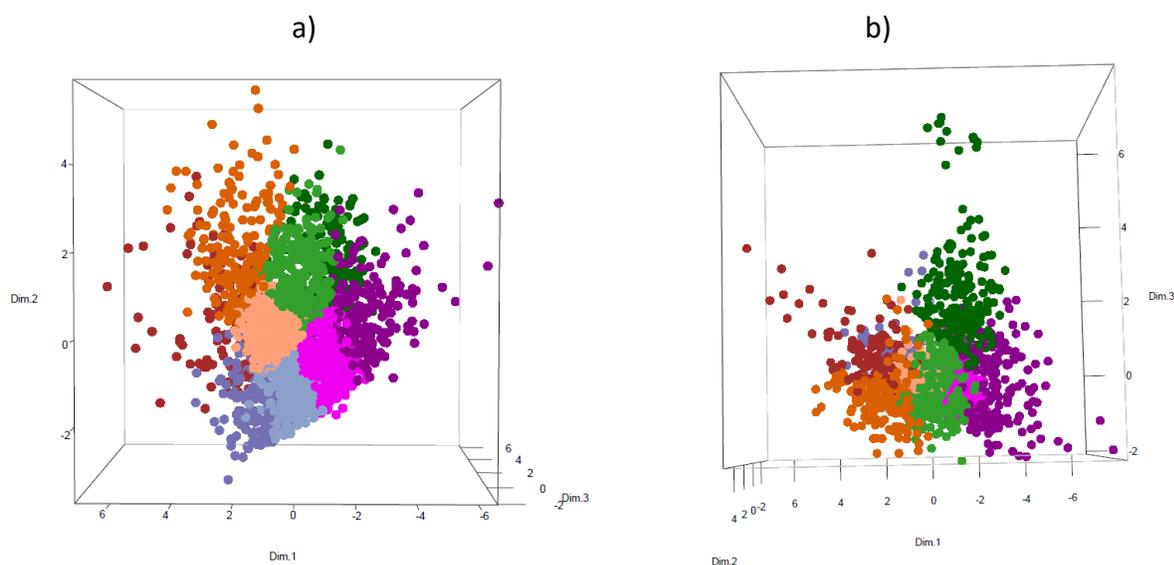
A partir da análise em componentes principais dos dados normalizados obtiveram-se 7 componentes principais. As proporções da variabilidade total dos dados explicada por estas componentes estão reportadas na Tabela 1. Optou-se por guardar as cinco primeiras componentes, que representam 90% da variabilidade total do conjunto dos dados.

Tabela 1- Resultados da ACP, com identificação das cinco componentes usadas na análise classificatória.

Componente	Valor próprio	% variância	% variância acumulada
comp 1	2,132	30,45	30,45
comp 2	2,045	29,22	59,67
comp 3	0,864	12,34	72,01
comp 4	0,771	11,01	83,03
comp 5	0,582	8,31	91,34
comp 6	0,502	7,17	98,51
comp 7	0,104	1,49	100,00

Para a estimação do número ótimo de classes/regimes, começou-se por explorar o intervalo de possibilidades entre três e 15 classes, tendo-se obtido em primeiro lugar o valor de três regimes, seguido por nove regimes. Considerou-se que apenas três regimes seria uma representação demasiado redutora da pirogeografia de Portugal, e explorou-se de seguida o intervalo entre quatro e 15 regimes, tendo sido identificado nove como o novo número ideal, o qual foi o escolhido para a classificação e cartografia dos regimes de fogo em Portugal Continental.

A Figura 15 mostra a distribuição dos nove regimes projetado no espaço definido pelas três primeiras componentes principais, ilustrando o posicionamento relativo dos regimes neste espaço multidimensional

**Figura 15-** Representação aproximada dos regimes no plano das componentes principais 1 e 2 (a) e 1 e 3 (b).

Apesar de os regimes ficarem adjacentes nestes espaços multidimensionais, eles não se interpenetram excessivamente.

4.3. Testes-v

As figuras 16 e 17 mostram os valores do teste-v para as variáveis significativamente associadas (a 1%) a cada regime. As barras vermelhas representam as associações positivas e as barras azuis as associações negativas. As descrições sumárias de cada regime, que acompanham o respetivo mapa, foram elaboradas com base nestes resultados.

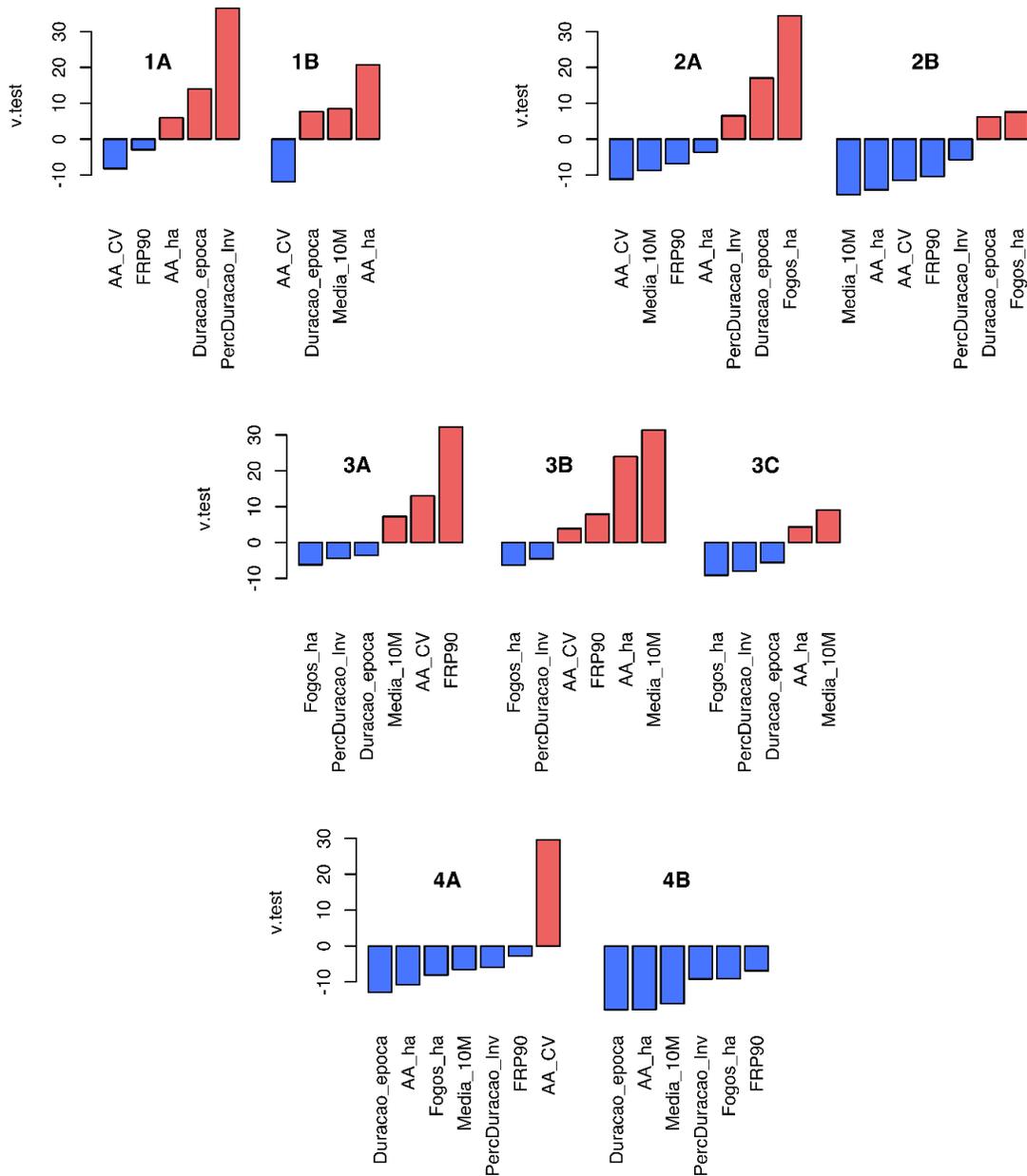


Figura 16- Testes-v das variáveis do fogo, para cada regime. O tamanho das barras mede a magnitude da associação de cada variável a cada regime, positiva no caso das barras vermelhas e negativa no caso das barras azuis.

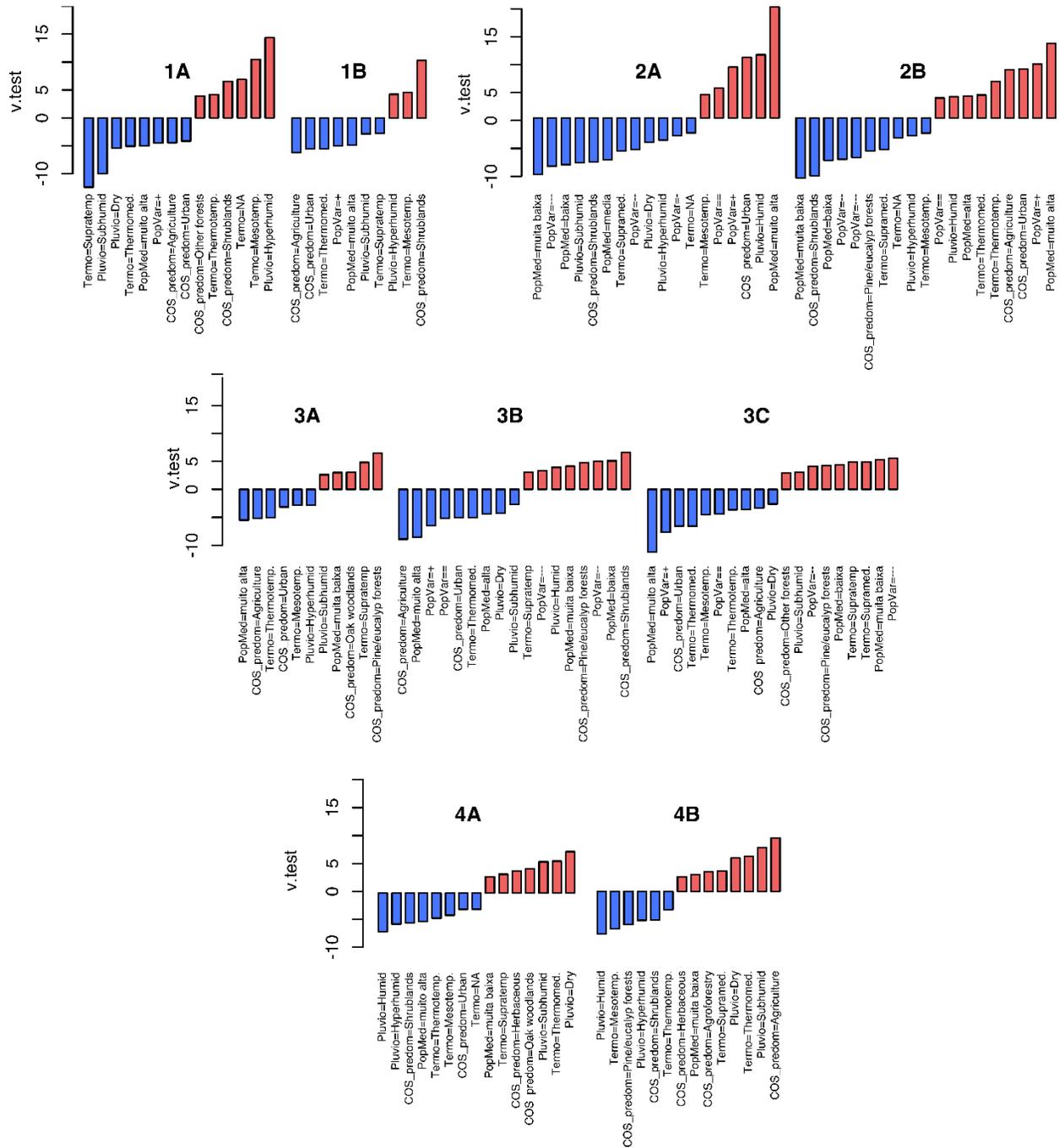


Figura 17- Testes-v das categorias das variáveis antecedentes, para cada regime. Quanto maior [menor] o tamanho da barra vermelha [azul] melhor [pior] a categoria está representada no regime.

4.4. Mapas dos regimes

A representação geográfica dos resultados da classificação dos regimes originou o mapa da Figura 18.

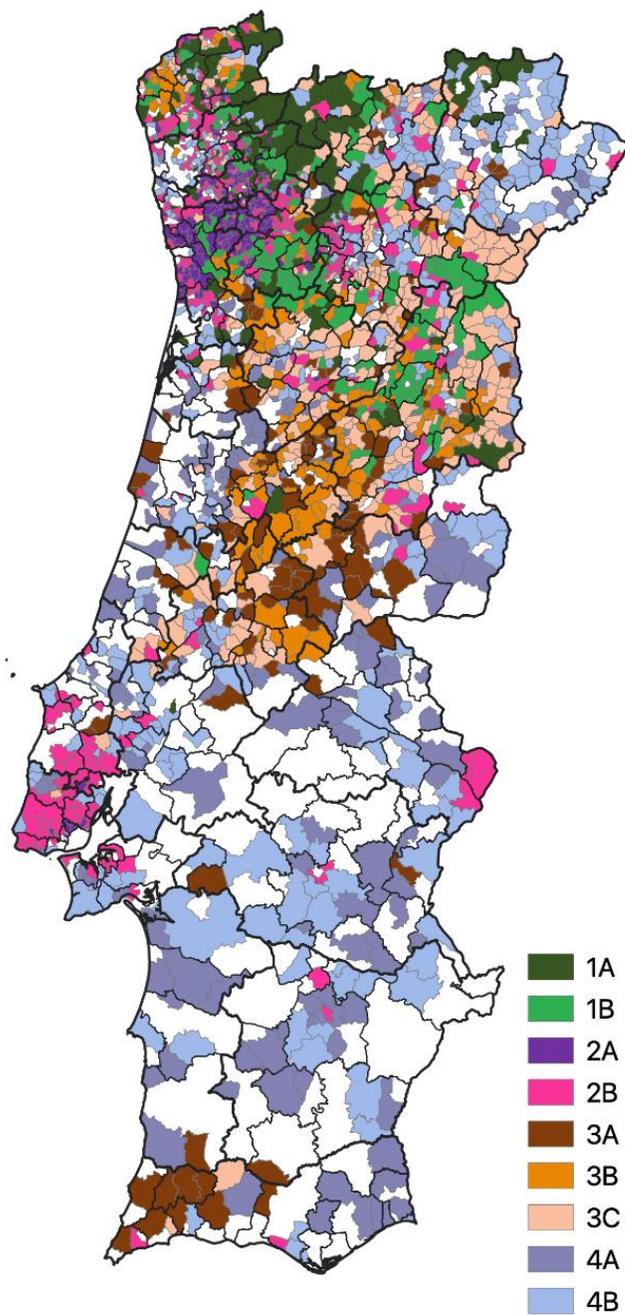


Figura 18- Mapa dos nove regimes de fogo de Portugal Continental.

Propõe-se a seguinte descrição sumária dos regimes, em termos da sua associação com as variáveis do fogo e segundo os resultados dos testes-v. Acrescentam-se exemplos das principais localizações de cada regime:

1A: Época longa, com grande % de dias de fogo no Inverno.

Ex.: Serras do Gerês, Barroso, Cabreira, Montesinho e Alvão.

1B: Área ardida extensa, queimada regularmente.

Ex.: Serras de Montemuro, Marão e Marofa, cabeceira do vale do Mondego.

2A: Muitos fogos, com ocorrência regular e época longa.

Ex.: Área Metropolitana do Porto, Tâmega e Sousa.

2B: Ausência de grandes incêndios, pouca área queimada, com ocorrência regular e baixa intensidade.

Ex.: Área Metropolitana de Lisboa, Oeste e disperso por todo o país.

3A: Incêndios muito intensos e esporádicos.

Ex.: Barlavento Algarvio e Pinhal Interior.

3B: Mega-incêndios e área queimada extensa.

Ex.: Pinhal Interior, Serras da Freita, Arada e Arga.

3C: Alguns grandes incêndios, mas poucos fogos.

Ex.: Distrito da Guarda, SE do distrito de Bragança e disperso pelo Centro interior e Norte interior.

4A: Fogo muito esporádico e época curta.

Ex.: Alentejo, Beira Baixa e Sotavento Algarvio.

4B: Época curta e muito pouca área queimada, com ausência de grandes incêndios.

Ex.: Alentejo, Nordeste Transmontano e planície costeira.

Adicionando a este resultado a análise da associação entre regimes e variáveis antecedentes, enriquece-se esta descrição sumária dos regimes acrescentando-lhe as referências relevantes em termos de ocupação do solo, bioclima e demografia:

1A: Época longa, com grande % de dias de fogo no Inverno; em Matos e Outra Floresta, sob clima Hiperhúmido e Mesotemperado.

1B: Área ardida extensa, queimada regularmente; em Matos, sob clima Mesotemperado, Hiperhúmido.

2A: Muitos fogos, com ocorrência regular e época longa; em Áreas Urbanas com densidade populacional muito alta e população crescente ou estável, sob clima Húmido.

2B: Ausência de grandes incêndios, pouca área queimada, de ocorrência regular e baixa intensidade; em áreas Urbanas e Agrícolas com muito alta densidade populacional, em crescimento demográfico e sob clima Termotemperado.

3A: Incêndios muito intensos e esporádicos; em Pinhais e Eucaliptais, sob clima Supratemperado.

3B: Área queimada extensa e mega-incêndios; em Matos, Pinhais e Eucaliptais de regiões com baixa densidade populacional e em perda demográfica.

3B: Alguns grandes incêndios, mas poucos fogos; áreas com muito baixa densidade populacional e forte perda demográfica; em Pinhais e Eucaliptais, sob climas Supramediterrânico e Supratemperado.

4A: Queima muito esporádica e época curta; em Sobreirais e Azinhais e Pastagens, sob climas Seco e Sub-húmido, ambos Termomediterrânicos.

4B: Época curta e muito pouca área queimada, com ausência de grandes incêndios; em Agricultura, sob climas Sub-Húmido e Seco, ambos Termomediterrânicos.

A interpretação dos regimes em termos destes dois conjuntos de variáveis sugere uma organização hierárquica subjacente (revelada no esquema de numeração escolhido) e que origina o mapa da Figura 19.

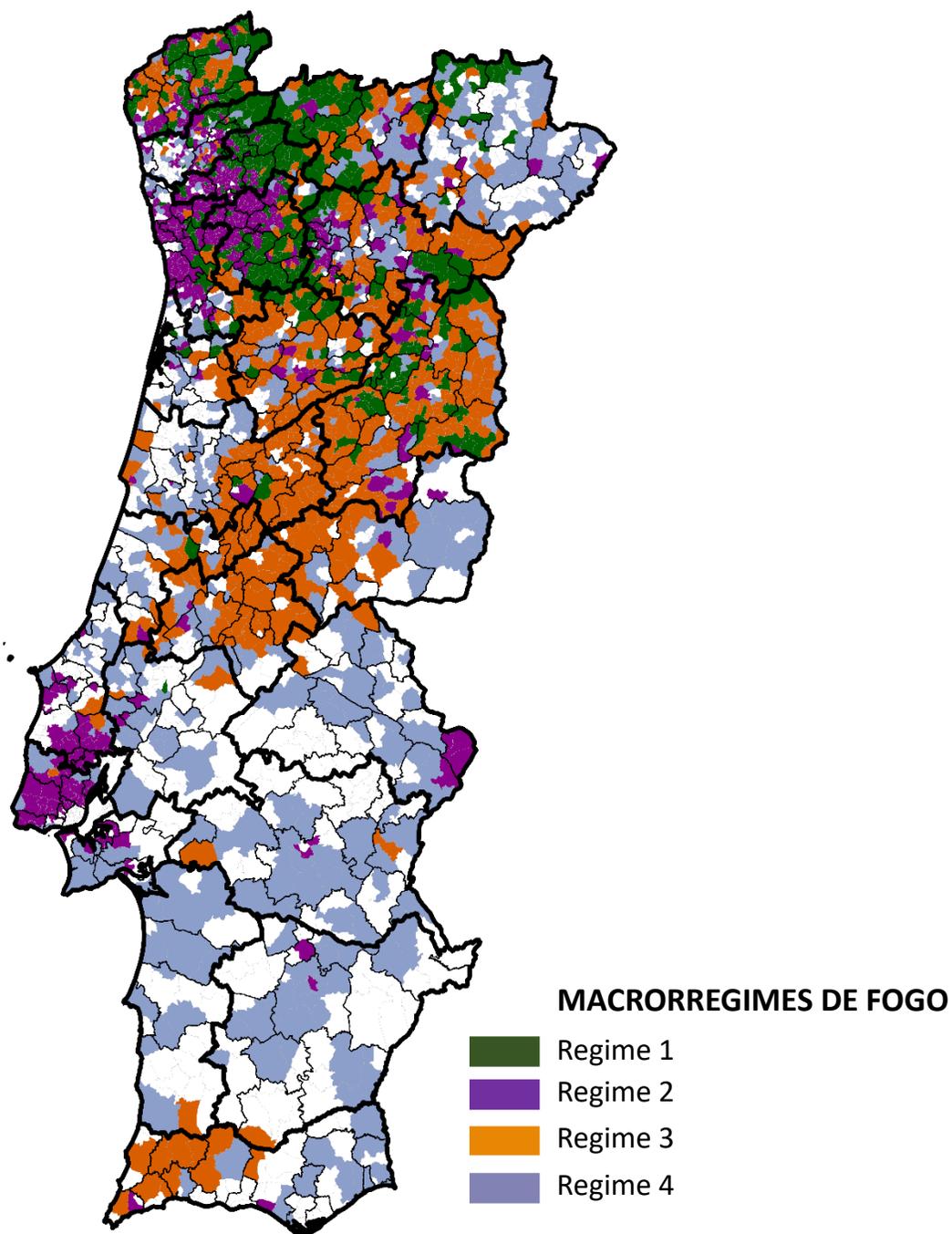


Figura 19- Macroregimes do fogo em Portugal Continental, obtidos por agregação dos nove regimes do mapa da figura 18.

5. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Desenvolvemos aqui um pouco as caracterizações sumárias de cada regime e tecemos alguns comentários interpretativos, incluindo alguns referentes à estratégia de gestão de combustíveis à escala da paisagem.

REGIMES 1

1A: a época longa, com elevada % de dias de fogo no inverno e a baixa intensidade do fogo, conjugadas com a associação predominante a áreas de matos e os locais onde ocorre, sugerem que neste regime são importantes as queimadas de pastorícia.

1B: este regime também ocorre sobretudo em zonas de matos, mas apresenta área queimada substancialmente maior, alguns incêndios de grande dimensão e menor importância do fogo de Inverno. Aparece também um regime de queimadas de pastorícia, mas possivelmente em processo de transição gradual para um regime de incêndios em matagais. Esta interpretação é uma hipótese e poderá ser testada através duma análise ao longo do tempo.

Estes dois regimes têm em comum o facto de incidirem sobretudo em matagais de serras do Centro-Norte e Norte, com climas bastante húmidos e frios e mantêm-se geograficamente muito semelhantes às áreas de pastoreio analisadas por Ribeiro e Santos (1951), se bem que certamente com menor intensidade de uso pastoril, atualmente.

Do ponto de vista da gestão de combustíveis à escala da paisagem, nas freguesias abarcadas por estes dois regimes fará sentido privilegiar as intervenções em área, formadoras de mosaico, expandindo e consolidando tecnicamente as práticas tradicionais de uso do fogo pelos pastores. No caso de regime 1B, justificar-se-á, adicionalmente, um esforço de transferência de área queimada do verão para o inverno, visando reverter o processo de “assilvestramento” dos fogos, com redução do seu tamanho e intensidade, mas não necessariamente da área queimada.

REGIMES 2

2A: o elevado número de incêndios constitui a sua principal característica, mas também tem uma época de fogo notavelmente longa e considerável % de dias de fogo no Inverno. Os fogos são tipicamente pequenos e pouco intensos. Este regime concentra-se fortemente nas NUTS-3 Área Metropolitana do Porto e Tâmega e Sousa, que têm elevada densidade populacional, crescimento demográfico e ocupação predominantemente urbana. Pode considerar-se um regime de fogo periurbano, em regiões com substancial extensão de interface urbano-rural.

2B: é uma versão mitigada do regime anterior, com muito menos fogos, menor área queimada, época mais curta e virtualmente sem fogo de Inverno. Surge principalmente nas NUTS 3 Área Metropolitana de Lisboa e Oeste, mas ocorre também em freguesias dispersas por quase todo o país.

Estes regimes ocupam as duas regiões mais densamente povoadas de Portugal e, apesar do elevado número de fogos, têm poucos incêndios e área queimada pouco extensa. Concentram-se nas regiões demograficamente mais dinâmicas e mais densamente urbanizadas, onde não abundam áreas muito extensas com elevadas cargas de combustível, mas a concentração de pessoas e património edificado é muito alta. Portanto, são áreas com relativamente baixo perigo (*hazard*), mas alto valor exposto (*exposure*).

Aqui, a proteção das áreas envolventes das povoações, aglomerados populacionais e casario disperso será a principal tarefa da gestão de combustíveis à escala da paisagem, alicerçada na rede secundária de faixas de gestão de combustível.

REGIMES 3

3A: é um regime de incêndios esporádicos, mas grandes e muito intensos, que incidem sobretudo em pinhais e eucaliptais, em áreas com muito baixa densidade populacional do Barlavento Algarvio e do Centro de Portugal, aqui com destaque para o Pinhal Interior.

3B: distingue-se de 3A por apresentar área queimada mais extensa e incêndios de maiores dimensões, se bem que menos intensos. Porém, como mencionado no capítulo sobre a construção das variáveis, a deteção por satélite dos focos de calor que permitem quantificar a intensidade do fogo é, por vezes, impossibilitada pelo fumo denso, podendo originar enviesamentos desta variável. Apesar disso, como este problema deverá afetar de igual modo as áreas do regime 3A, é de crer que esta diferença de intensidade seja genuína e não um artefacto decorrente da natureza dos dados. Este regime está sobretudo associado a áreas de matos, pinhal e eucaliptal, em áreas com baixa densidade populacional e em perda demográfica do Interior Centro.

3C: do ponto de vista dos atributos do fogo é o mais incharacterístico dos nove regimes, apresentando valores medianos de todas as variáveis. Esta falta de definição clara é corroborada pela sua elevada dispersão geográfica. Ocorre sobretudo em pinhais e eucaliptais de áreas com forte perda demográfica e baixa densidade populacional.

Os regimes 3A-C, sobretudo os dois primeiros, são de incêndios florestais, com extremos de intensidade em 3A e de tamanho em 3B. Ocorrem nas áreas do país mais densamente arborizadas com pinhais e eucaliptais, sujeitas a fenómenos de despovoamento e abandono da agricultura, já de longa duração. Uma boa parte da sua extensão situa-se em áreas do Centro de Portugal onde se intersecta uma razoavelmente alta produtividade vegetal determinada pela precipitação de Outono-Inverno, com Verões quentes e secos que facilitam a ignição e combustão da vegetação disponível, maximizando a incidência do fogo.

As grandes extensões contínuas, com elevadas cargas de combustível, fazem destes territórios o alvo privilegiado para o uso da rede primária de faixas de gestão de combustível em intervenções à escala da paisagem. São também as áreas mais necessitadas de alterações

substanciais da ocupação da terra, como a expansão de áreas agrícolas e de pastagem. Porém, este objetivo é dificultado pelas suas condições de depressão demográfica e socioeconómica.

REGIMES 4

4A: poucos fogos, distribuídos por uma época relativamente curta e tendo ocorrência muito esporádica. Ocorre predominantemente em montados de sobro e azinho e pastagens, em clima quente e seco, e em regiões com muito baixa densidade populacional. Localiza-se sobretudo na metade Sul de Portugal e nalgumas freguesias da região litoral do Centro.

4B: fogo menos esporádico, um pouco menos intenso e de ligeiramente menores dimensões do que 4A, do qual se pode considerar uma variante atenuada. Incide sobretudo em áreas agrícolas e agroflorestais com clima quente e seco, igualmente caracterizadas por muito baixa densidade populacional. Localiza-se sobretudo no Alentejo e em Trás-os-Montes, com freguesias dispersas no litoral Centro. Ao contrário do regime 4A, está quase ausente do Algarve.

Estes dois regimes estão fortemente associados a áreas agrícolas e agroflorestais, e são aqueles onde a incidência do fogo é menor e de modo geral, menos problemática. Muito provavelmente, encontram-se associados a práticas agrícolas que fazem uso do fogo (p. e., queima de sobrantes, de restolhos entre outros). Porém, e porque os regimes são aglomerados estatísticos com razoável diversidade interna, regista-se que, p. e., a freguesia da Marinha Grande, onde se localiza parte da Mata Nacional de Leiria e que foi fortemente afetada pelo incêndio de Outubro de 2017, foi incluída no regime 4A. Recordamos que os regimes são construídos estritamente com base nas variáveis que caracterizam os fogos e só posteriormente associados às variáveis de ocupação do solo, clima e demografia. Deste modo, e no prazo de quase quatro décadas abarcado por este estudo, a Marinha Grande regista, de facto, uma área queimada total bastante baixa e ocorrência de fogo muito esporádica, o que explica a sua inclusão em 4A. Note-se também que a unidade de análise deste estudo são as freguesias e não as ocorrências individuais de fogo, pelo que a área queimada na MNL em 2017 foi repartida por várias freguesias, com base nos mapas anuais de área queimada, tal como explicado no capítulo que apresenta as variáveis descritivas do fogo. A observação da intensidade do fogo, medida através da sua potência radiativa, ficou prejudicada neste evento devido à quantidade e densidade do fumo gerado pelo incêndio, o que não permitiu aos sensores do satélite MODIS observar a superfície enquanto decorriam as fases de maior intensidade do incêndio. Estas explicações são igualmente válidas, por exemplo, para freguesias dos concelhos de Alcoutim e de Tavira, muito esporadicamente afetadas por grandes incêndios.

Para este regime em concreto seria pertinente a realização de um estudo, à escala das NUT III, que permitisse a elaboração de um calendário generalizado em termos de práticas agrícolas que fazem uso do fogo em Portugal.

Para todos os resultados deste estudo, de modo geral, é essencial ter em mente que os regimes de fogo se definem a escalas temporais de décadas, ou mesmo mais longas (Whitlock et

al., 2010), pelo que não é de esperar que um único evento, por mais extremo que seja, determine por si só a natureza de um regime de fogo, tal como um episódio extremo de precipitação ou de temperatura não determina um tipo de clima.

6. CONCLUSÕES

Elaborou-se a primeira classificação e cartografia de regimes de fogo em Portugal Continental, tendo as freguesias como suporte espacial e abrangendo o período 1980-2017. A metodologia de análise de dados utilizada permitiu identificar nove regimes, caracterizados apenas com base em sete variáveis descritoras de padrões de ocorrência do fogo no espaço e no tempo. De seguida, enriqueceu-se a interpretação dos nove regimes analisando o seu grau de associação com variáveis ambientais de natureza climática, demográfica e de ocupação do solo. Embora a metodologia de análise dos dados não produza uma classificação hierárquica, essa estrutura emergiu espontaneamente e com maior clareza depois da interpretação dos regimes em função das variáveis ambientais que condicionam os padrões de ocorrência do fogo em Portugal Continental. Daqui resultou a proposta de um mapa com quatro macrorregimes de fogo, predominantemente representativos de queimadas de pastorícia, no Centro e Norte do país, com numerosos pequenos fogos, nas regiões de Lisboa e do Porto, de incêndios florestais, na região Centro e no Barlavento Algarvio e, finalmente, de queimadas em áreas dominadas por uso agrícola, no Alentejo e no Nordeste Transmontano.

Classificar e cartografar regimes de fogo equivale a identificar e localizar no território diversas “síndromes”, conjuntos interdependentes de características do fogo, que se estruturam em resultado da ação de variáveis ambientais e socioeconómicas que condicionam a sua ocorrência. Como tal, acreditamos que os resultados deste trabalho poderão ser úteis para apoiar a regionalização das políticas públicas de gestão integrada dos fogos rurais, diferenciando-as em função das especificidades e lógicas territoriais aqui identificadas e interpretadas. O presente trabalho é um ponto de partida para essa tarefa e propõe um enquadramento da questão que é passível de ser aprofundado, nomeadamente segundo as várias vertentes da Estratégia 2020-2030 do Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais.

7. REFERÊNCIAS

- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J. e Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Proceedings of the Second International Conference on Knowledge).
- Kaufman, L., e Rousseeuw, P. J. (1990). Partitioning around medoids (program PAM). Ch. 2, em *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*, pp. 68-125. Wiley-Interscience, NJ.
- Krebs, P., Pezzatti, G. B., Mazzoleni, S., Talbot, L. M., e Conedera, M. (2010). Fire regime: history and definition of a key concept in disturbance ecology. *Theory in Biosciences*, 129(1), 53-69.
- Lebart L, Morineau A e Piron M. (1995). *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, Ed. Dunod, Paris.
- Monteiro-Henriques, T., Martins, M. J., Cerdeira, J. O., Silva, P., Arsénio, P., Silva, Á., Bellu, A., e Costa, J. C. (2016). Bioclimatological mapping tackling uncertainty propagation: application to mainland Portugal. *International Journal of Climatology*, 36(1), 400-411.
- Morineau, A. (1984). Note sur la caractérisation statistique d'une classe et les valeurs-tests. *Bulletin Technique Centre Statistique Informatique Appliquées*, 2(1-2), 20-27.
- Pereira, M. G., Malamud, B. D., Trigo, R. M., e Alves, P. I. (2011). The history and characteristics of the 1980–2005 Portuguese rural fire database. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(12), 3343-3358.
- Ribeiro, O. e M.A.P. Santos (1951). Montanhas pastoris de Portugal – tentativa de representação cartográfica. Pp. 59-69, *Compte Rendu du XVI^e Congrès International de Géographie de Lisbonne*, 1949, III, Lisbonne.
- Rivas-Martínez, Salvador, Salvador Rivas-Saenz, e Angel Penas (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, 1: 1-634.
- Schubert, E., e Rousseeuw, P. J. (2021). Fast and eager k-medoids clustering: O (k) runtime improvement of the PAM, CLARA, and CLARANS algorithms. *Information Systems*, 101, 101804.
- Sekula, M., Datta, S., e Datta, S. (2017). optCluster: An R package for determining the optimal clustering algorithm. *Bioinformatics*, 13(3), 101.
- Whitlock, C., Higuera, P. E., McWethy, D. B., e Briles, C. E. (2010). Paleoeological perspectives on fire ecology: revisiting the fire-regime concept. *The Open Ecology Journal*, 3(1).