



JOÃO PEDRO LIMA PINELA

Licenciado em Matemática

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA AVALIAR A PRONTIDÃO DE BOMBEIROS: UM ESTUDO DE CASO

MESTRADO EM MATEMÁTICA E APLICAÇÕES

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2022

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA AVALIAR A PRONTIDÃO DE BOMBEIROS: UM ESTUDO DE CASO

JOÃO PEDRO LIMA PINELA

Licenciado em Matemática

Orientador: Nelson Fernando Chibeles Pereira Martins

Assistant Professor, NOVA School of Science and Technology

Coorientadora: Maria Isabel Azevedo Rodrigues Gomes

Associate Professor, NOVA School of Science and Technology

Júri

Presidente: Isabel Maria Oitavem Fonseca da Rocha Kahle

Associate Professor, NOVA School of Science and Technology

Arguente: Ana Paula Ferreira Barroso

Assistant Professor, NOVA School of Science and Technology

Orientador: Nelson Fernando Chibeles Pereira Martins

Assistant Professor, NOVA School of Science and Technology

MESTRADO EM MATEMÁTICA E APLICAÇÕES

ESPECIALIDADE EM ATUARIADO, ESTATÍSTICA E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2022

Modelo de Simulação para Avaliar a Prontidão de Bombeiros: Um Estudo de Caso

Copyright © João Pedro Lima Pinela, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer aos meus orientadores o Prof.^o Doutor Nelson Chibeles Martins e a Prof.^o Doutora Maria Isabel Gomes pelo acompanhamento e disponibilidade ao longo de toda esta jornada.

Gostaria também de agradecer a todos os meus colegas e amigos que sempre me apoiaram e ajudaram.

Por fim, um agradecimento à minha família, em especial à minha mãe por me ter dado a possibilidade de alcançar tudo o que consegui até hoje.

RESUMO

Em Portugal, a maioria dos corpos de bombeiros são associações humanitárias que surgiram da necessidade e da vontade popular. Consequentemente, não existiram estudos anteriores à criação destes corpos de bombeiros de modo a perceber-se quais seriam as localizações em que se deveriam construir os quartéis de cada corpo. Isto originou uma discrepância nas várias localizações dos quartéis, existindo algumas zonas do país com excesso de quartéis e outras onde que faltam quartéis. Esta dissertação surge da necessidade de se perceber qual a eficiência das localizações atuais dos quartéis bem como quais as zonas que se encontram mais desprotegidas. Para tal, implementou-se um modelo de simulação que modela o processo de resposta dos bombeiros e o comportamento dos incêndios urbanos de modo a se poder analisar o impacto das diferentes localizações dos quartéis na eficiência da resposta. Foram analisadas as atuais localizações dos quartéis assim como possíveis novas localizações determinadas por modelos de otimização. Foram ainda testadas diferentes regras para a alocação dos incêndios aos quartéis.

No modelo de simulação foram utilizados dois métodos para gerar os tempos de viagens, sendo um deles com recurso às distâncias euclidianas e o outro utilizando as distâncias obtidas através das *Google Maps APIs*, chegando-se à conclusão que ambos os métodos providenciam resultados consideravelmente diferentes. O modelo permitiu ainda analisar o impacto da utilização de uma distribuição dos incêndios tendo em conta a densidade populacional ao invés da habitual distribuição uniforme das ocorrências utilizada na maioria da literatura.

O modelo de simulação foi aplicado ao distrito do Porto, sendo que os principais resultados mostram que existe uma distribuição incorreta dos quartéis de bombeiros pelo distrito, verificando-se que a percentagem de incêndios cobertos é no melhor dos casos de 65%. Por outro lado, mostrou-se que é possível aumentar em cerca de 10% a cobertura alterando as regras de alocação. Relativamente aos métodos utilizados para distribuir as ocorrências verificou-se que estas apresentam diferenças significativas na cobertura verificada, sendo esta diferença de 10%. No entanto, devido à falta de dados não foi possível concluir qual o método que melhor se adequa ao sistema em estudo. Por fim conclui-se que as localizações provenientes dos modelos de otimização não são mais

eficazes que as atuais localizações dos quartéis e como tal estes modelos precisam de ser melhorados.

Palavras-chave: Simulação, Quartéis de Bombeiros, Problema de Localização

ABSTRACT

This work comes from the need to understand the efficiency of the current locations of fire stations in Portugal, as well as which areas are mostly unprotected. To this end, a simulation model was implemented to review the firefighters response process and behavior of urban fires, in order to analyze the impact and response efficiency, according to their different locations. The current fire station locations were analyzed, as well as possible new locations determined by optimization models. New rules for the allocation were also tested.

Two methods were used in the simulation model in order to generate the travel times, one of them uses the euclidean distances and the other method is by using the distances obtained through *Google Maps APIs*, coming to the conclusion that both methods provide considerably different results. With this model it was also analyzed the impact of using distribution of fires considering the population density instead of the usual method used in most of the literature.

This simulation model was applied in the Porto district, the main results showed what was already expected, there was a wrong distribution of fire stations through the district, where the percentage of contained fires is 65% in the best case. On the other hand, it was determined that it is possible to increase coverage by 10% by changing the allocation rules. Regarding the methods used to distribute the occurrences, it was found that they present significant differences in the coverage verified, this difference being 10%, however due to the lack of data it was not possible to conclude which is the best method to use in the simulation. Finally, it is concluded that the locations from the optimization models are not more effective than the current fire station locations, and as such, these models need to be improved.

Keywords: Simulation, Fire stations, Location Problem

ÍNDICE

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Abordagem metodológica	2
1.4 Estrutura da dissertação	2
2 Revisão da Literatura	3
2.1 Simulação	3
2.2 Geração de ocorrências	6
2.2.1 Modelação temporal	6
2.2.2 Modelação espacial	6
2.3 Estimação dos tempos de viagem	7
2.4 Considerações finais	7
3 Metodologia	9
3.1 Simulação	9
3.2 Sistema em estudo	10
3.3 Modelo de Simulação	11
3.4 Parâmetros Iniciais	13
3.4.1 Modelação temporal	13
3.4.2 Modelação espacial	15
3.4.3 Tempos de viagem	17
4 Estudo de Caso	19
4.1 Base de dados	19

5	Resultados	26
5.1	Validação do Modelo	26
5.2	Análise dos localizações atuais dos quartéis de bombeiros	30
5.2.1	Comparação entre os métodos de modelação espacial	30
5.2.2	Análise do tempo limite de resposta	36
5.2.3	Comparação entre as regras de afetação dos quartéis	36
5.3	Impacto da regressão linear	39
5.4	Análise de novas localizações utilizando Modelos de otimização	42
5.4.1	Modelo de minimização	43
5.4.2	Modelo de maximização	44
6	Conclusão	47
	Bibliografia	49
	Anexos	
I	Tabelas	51

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Modelo de otimização-simulação.	4
3.1	Fases de um incêndio urbano.	11
3.2	Modelo de simulação implementado.	12
4.1	Localização dos quartéis de bombeiros no distrito do Porto.	20
4.2	Número de incêndios registado em cada ano.	20
4.3	Distribuição dos incêndios por hora no distrito do Porto.	22
4.4	Distribuição dos incêndios por mês no distrito do Porto.	22
4.5	Histograma relativo ao tempos entre ocorrências sucessivas no concelho de Amarante.	24
4.6	Mapas do distrito do Porto com a grelha utilizadas e os com os centroides correspondentes.	25
5.1	Percentagem de incêndios por concelho.	27
5.2	Número de incêndios gerados.	27
5.3	Percentagem anual de incêndios cobertos (100 simulações).	29
5.4	Percentagem total de ocorrências cobertas.	29
5.5	Número média de ocorrências em cada localização no distrito do Porto (1º imagem - 1º abordagem ; 2º imagem - 2º abordagem).	30
5.6	Mapa do distrito do Porto com as localizações que são cobertas.	32
5.7	Mapa do distrito do Porto com as localizações que são cobertas utilizando as novas regras comparativamente às atuais.	38
5.8	Mapa do distrito do Porto com as localizações que são cobertas.	40
5.9	Mapa com as localizações utilizadas nos modelos de otimização.	42
5.10	Mapa das novas localizações determinadas pelo modelo de minimização para cada cenário.	43
5.11	Mapa das novas localizações determinadas pelo modelo de maximização para cada cenário.	44

5.12	Porcentagem de incêndios cobertos em cada cenário para os modelos de minimização e maximização utilizando a Regra do quartel mais próximo	46
------	---	----

ÍNDICE DE TABELAS

3.1	Parâmetros recolhidos sobre cada ocorrência pelo modelo de simulação . . .	13
4.1	Percentagem total de incêndios e população de cada concelho do Porto. . . .	21
4.2	Estatísticas dos tempos entre ocorrências, em horas.	23
4.3	Parâmetro λ da distribuição exponencial utilizado na geração dos tempos entre ocorrências em cada concelho, valor em horas.	24
5.1	Tempos, em minutos, obtidos através do <i>Google Maps</i> e das <i>Google Maps APIs</i>	28
5.2	Cobertura, variância e tempo de computação (em minutos).	29
5.3	Número de incêndios simulados por concelho utilizando o método 1 e 2. . .	31
5.4	Estatísticas do tempo de cobertura em minutos de cada método e cobertura obtida.	32
5.5	Número de ocorrências e percentagem de ocorrências cobertas de cada quartel em cada método.	33
5.6	Estatísticas do tempo de cobertura, em minutos, e cobertura obtida sem os quartéis em estudo utilizando o método 2.	34
5.7	Número de localizações respondidas pelos quartéis em análise e tempos médios de viagem para as localizações com e sem o quartel em análise obtidas utilizando o método 2.	34
5.8	Número de ocorrências em cada localização e tempos de viagem para cada localização com e sem o quartel 9, utilizando o método 2.	35
5.9	Vantagens e desvantagens de cada método.	36
5.10	Percentagem de ocorrências cobertas para os novos tempos estabelecidos. .	36
5.11	Estatísticas do tempo de cobertura em minutos e cobertura obtida (Regra Intermédia).	37
5.12	Estatísticas do tempo de cobertura em minutos e cobertura obtida (Regra do quartel mais próximo).	37
5.13	Número de ocorrências e percentagem de ocorrências cobertas de cada quartel em cada método utilizando a novas regras.	39

5.14	Estatísticas do tempo de cobertura em minutos e percentagem de ocorrências cobertas.	40
5.15	Número de ocorrências e percentagem de ocorrências cobertas de cada quartel.	41
5.16	Percentagem de ocorrências cobertas para cada cenário em cada modelo. . .	45
I.1	Localizações utilizadas nos modelos de otimização	51
I.2	Localizações provenientes do modelo de minimização para o 1º cenário. . . .	55
I.3	Localizações provenientes do modelo de minimização para o 2º cenário. . . .	56
I.4	Localizações provenientes do modelo de minimização para o 3º cenário. . . .	56
I.5	Localizações provenientes do modelo de minimização para o 4º cenário. . . .	56
I.6	Localizações provenientes do modelo de maximização para o 1º cenário. . .	57
I.7	Localizações provenientes do modelo de maximização para o 2º cenário. . .	57
I.8	Localizações provenientes do modelo de maximização para o 2º cenário. . .	58
I.9	Localizações provenientes do modelo de maximização para o 2º cenário. . .	58
I.10	Quarteis de bombeiros existentes no distrito do Porto.	59

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Os corpos de bombeiros desempenham funções de extrema importância em qualquer país, sendo responsáveis por responder a vários tipos de emergências, tais como incêndios urbanos, incêndios florestais e operações de resgate. Consequentemente estão envolvidos uma grande quantidade de recursos humanos e financeiros. É, então, muito importante uma utilização eficiente dos recursos disponíveis (Chevalier et al., [2012](#)).

Em Portugal, a maioria dos corpos de bombeiros são associações humanitárias que surgiram da necessidade e da vontade popular. Consequentemente, não existiram estudos anteriores à criação destes corpos de bombeiros de modo a perceber-se quais seriam as localizações em que se deveriam construir os quartéis de cada corpo de bombeiros. Isto originou uma discrepância nas várias localizações dos quartéis, existindo algumas zonas do país com excesso de quartéis e outras onde faltam quartéis. Este trabalho surge então da necessidade de se perceber exatamente qual a eficiência das localizações atuais dos quartéis, bem como quais as zonas que se encontram mais desprotegidas. Neste trabalho apenas se vai avaliar a eficiência dos quartéis de bombeiros na resposta aos incêndios urbanos. Segundo Castro e Abrantes, [2005](#) um incêndio urbano é a combustão, sem controlo no espaço e no tempo, dos materiais combustíveis existentes em edifícios, incluindo os constituintes dos elementos de construção e revestimento.

Em Portugal como a grande maioria dos corpos de bombeiros são associações humanitárias em que o estado apenas contribui com uma pequena percentagem de recursos financeiros, não existe nenhuma lei que exija um tempo de resposta máximo e consequentemente não existem dados sobre os tempos de resposta por parte dos bombeiros aos incêndios urbanos.

A eficiência de cada quartel de bombeiro é dada pela percentagem de incêndios cobertos. Entenda-se como incêndio coberto um incêndio em que o tempo de resposta é inferior ao tempo limite pré-estabelecido.

1.2 Objetivo

Foi então necessário implementar um modelo que permita analisar estes tempos. Com vista a este objetivo desenvolveu-se um modelo de simulação que pretende modelar:

- o processo de resposta dos quartéis às ocorrências;
- o comportamento dos incêndios urbanos.

Através deste modelo pretende-se analisar diferentes localizações para os quartéis de bombeiros e novas políticas de alocação dos quartéis às ocorrências, com vista a obter-se uma maior eficiência dos quartéis de bombeiros.

1.3 Abordagem metodológica

As localizações serão determinadas recorrendo a modelos de otimização que serão desenvolvidos num trabalho paralelo a este. A simulação irá permitir averiguar a qualidade dos resultados provenientes destes modelos. Para além do estudo das localizações dos quartéis de bombeiros que é o principal objetivo deste trabalho também se pretende estudar diferentes métodos utilizados no modelo de simulação para modelar o comportamento dos incêndios urbanos. Pretende-se ainda analisar as diferenças que se verificam quando se usam tempos de viagens reais comparativamente aos tempos de viagens determinados utilizando distâncias euclidianas.

1.4 Estrutura da dissertação

Os restantes capítulos deste documento estão organizados como se descreve de seguida. No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura onde se utiliza a simulação para resolver problemas de localização de alguns serviços de emergência. São analisados os diversos tipos de simulação utilizados assim como os diferentes métodos abordados em cada artigo. Em seguida, no capítulo 3, é apresentada de forma detalhada o modelo de simulação assim como os métodos utilizados para a elaboração do mesmo. Posteriormente, o caso de estudo ao qual se aplicou o modelo de simulação é explicado no capítulo 4 onde é ainda descrita a base de dados utilizada. No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos quando aplicado o modelo ao caso de estudo, são ainda apresentadas as análises referentes aos diferentes métodos e às localizações dos quartéis. Por fim as principais conclusões e o trabalho futuro é exposto no capítulo 6.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Simulação

Neste capítulo, aborda-se alguns trabalhos científicos que recorrem à simulação para analisar o problema de localização de corpos de bombeiros. Devido às semelhanças que existem entre os problemas de localização dos corpos de bombeiros e de outros serviços de emergência, são também analisados estudos para outros serviços de emergência, tais como helicópteros de resgate e ambulâncias, sendo estes últimos os que existem em maior abundância na literatura. Averiguou-se também o contributo dos autores para os principais desafios apresentados neste género de processos de simulação que são a modelação das ocorrências no tempo e no espaço e determinação do tempo de viagem dos veículos.

A simulação é uma técnica muito útil neste tipo de problemas, uma vez que nos permite modelar o funcionamento dos sistemas que se pretendem estudar. Os primeiros autores a utilizar a simulação como ferramenta para estudar problemas de localização dos quartéis de bombeiros foram Hendrick et al., 1975. Estes autores realizaram um estudo sobre os recursos usados pelos bombeiros de Denver, Colorado, com o objetivo de otimizar as suas localizações, aumentando assim a eficiência dos quartéis. Deste modo, seria necessário um número mais reduzido para manter uma cobertura semelhante à existente com as localizações iniciais. O modelo de simulação permitiu verificar que as novas localizações propostas pelos autores mantinham a cobertura pretendida. Antes de Hendrick et al., 1975, Savas, 1969 utiliza um modelo de simulação para analisar o tempo de resposta das ambulâncias na cidade de Nova Iorque considerando três cenários diferentes. Em cada um dos cenários as ambulâncias eram distribuídas de maneira diferente pela cidade e foi analisado de que forma a variação do número de ambulâncias afeta os tempos de resposta em cada cenário.

Em ambos os trabalhos, os autores utilizaram os modelos de simulação para testar os vários cenários que pretendiam avaliar. Mais tarde surgiram os modelos de otimização-simulação, que recorrem a modelos de otimização, para gerar possíveis localizações para os serviços de emergência, e a modelos de simulação, para analisar e validar os resultados

obtidos pelo modelo de otimização. Na literatura revista destacaram-se dois tipos de abordagens de otimização-simulação. Na primeira abordagem a simulação é utilizada apenas para analisar os resultados obtidos pelo modelo de otimização. Enquanto que na segunda abordagem os modelos de otimização e simulação funcionam em conjunto, uma vez que o modelo de simulação além de analisar os cenários resultantes do modelo de otimização, alimenta o modelo de otimização com informação adicional que permite melhorar a solução obtida (figura 2.1).

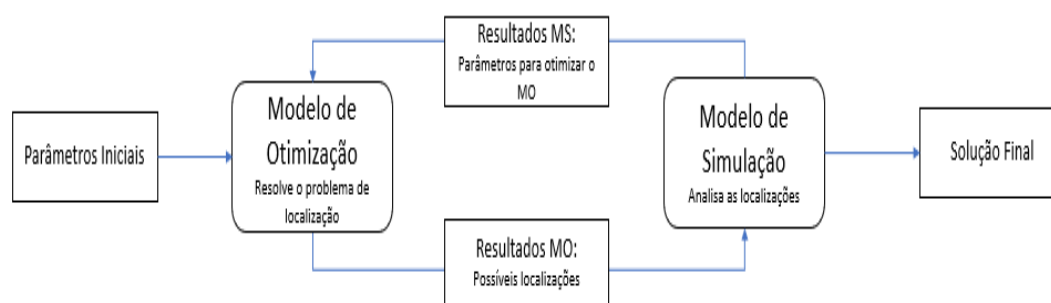


Figura 2.1: Modelo de otimização-simulação.

Grande parte da literatura recorre à primeira abordagem como é o de Aringhieri, 2007. O autor pretendeu estudar para a zona urbana de Milão, Itália, como diferentes localizações e número de ambulâncias afetavam a eficiência dos serviços de emergência. Para tal, recorreu a dois modelos de otimização para gerar as localizações ótimas para diferentes cenários e posteriormente utilizam um modelo de simulação para avaliar e comparar os resultados dos diferentes cenários. O modelo de simulação é ainda utilizado para comparar a eficácia dos dois modelos de otimização, um modelo que os autores consideram como um modelo “standard” para estes problemas e um modelo adaptado ao caso de Milão. Um trabalho semelhante é realizado por Zhen et al., 2014 que pretendem estudar como diferentes distribuições e número de ambulâncias disponíveis afetam a eficácia do serviço de emergência em Shanghai, China. Neste trabalho, os autores realizam simulações em diferentes períodos do dia, uma vez que a intensidade das ocorrências varia com os mesmos. Por fim, Enayati et al., 2018 apresentam um modelo de otimização que determina as localizações das ambulâncias e redistribui as ambulâncias em espera de modo a maximizar a cobertura. Os autores têm como objetivo maximizar a cobertura sem que a constante recolocação das ambulâncias resulte num aumento significativo do volume de trabalho. O modelo de simulação é utilizado para analisar estes dois fatores para diferentes cenários. Além destes, os trabalhos de Hendrick et al., 1975 e Savas, 1969 podem ser incluídos nesta abordagem de otimização-simulação.

Como referido anteriormente, no trabalho destes autores a simulação é uma técnica que apenas analisa as localizações determinadas pelos modelos de otimização, no entanto os modelos de simulação são, na sua maioria, mais detalhados, logo mais complexos, do que os modelos de otimização permitindo simular as condições “reais” dos sistemas em

análise. Como tal permitem retirar informações que podem servir para retirar dados que permitam melhorar as soluções obtidas.

Surge assim uma segunda abordagem de otimização-simulação, nesta os modelos de simulação e os modelos de otimização são usados em conjunto para se obterem as localizações ótimas. Silva e Pinto, 2010 utilizam esta abordagem para investigar o número mínimo de ambulâncias necessárias por estação de modo que os tempos médios de resposta sejam inferiores a um limite pré-estabelecido. O modelo de simulação foi também utilizado para analisar como é que um aumento das ocorrências afetaria o serviços de emergências, para os atuais veículos disponíveis. Mais recentemente, Rodriguez et al., 2021 de modo a determinar as localizações ótimas para os quartéis de bombeiros no Chile, os autores utilizam em simultâneo um modelo de otimização, de onde provêm as localizações, e um modelo de simulação, que analisa as localizações e verifica se determinados parâmetros obtidos se desviam dos valores pretendidos. No caso de tal se verificar, a informação extraída do modelo de simulação é utilizada no modelo de otimização para obter uma nova solução. No entanto, os parâmetros analisados e que tipo de informação é utilizada no modelo de otimização para se obterem as novas soluções não é especificada no artigo. Os autores avaliam também a performance de três modelos de otimização para 15 cenários diferentes utilizando o modelo de simulação. Por fim, Karatas et al., 2017 utilizam uma abordagem de otimização-simulação semelhante às anteriores para determinar a localização óptima das bases de helicópteros de busca e salvamento e como estes se devem distribuir pelas mesmas. No entanto, com o intuito de maximizar a cobertura, os autores propõem um modelo de simulação ligeiramente diferente dos anteriores. Este modelo é alimentado por um conjunto de condições que permitem alterar a solução inicial da localização dos helicópteros, originando assim um modelo que vai otimizando as localizações ao longo da simulação.

Os modelos de simulação utilizados pelos autores anteriores podem ser divididos em dois tipos de simulação: a simulação de eventos discretos e *agent-based simulation*. A *agent-based simulation* permite modelar continuamente o comportamento dos agentes ao longo da simulação. Aringhieri, 2007 utiliza este tipo simulação é utilizada de modo que em qualquer momento da simulação seja possível alterar os destinos das ambulâncias. Isto mostra-se importante para casos como uma ambulância estar a caminho de ocorrências de baixa prioridade e surgir uma ocorrência de prioridade elevada. Contrariamente, a simulação de eventos discretos apenas permite modelar os agentes no final de cada evento. Apesar da *agent-based simulation* ser mais completa, esta depende de saber-se a qualquer momento da simulação onde estão todas as ambulâncias, o que se torna quase impossível quando se trabalha com estradas. Para resolver este problema, o autor considera que as ambulâncias percorrem apenas um caminho reto entre as localizações. Outro inconveniente deste tipo de simulação é que a maioria dos serviços de emergências não estão preparados para implementar um sistema deste género, isto é, um sistema que permita saber onde se encontram todos os veículos e ao mesmo tempo redesignar as missões. Logo, uma vez que a *agent-based simulation* é mais dispendiosa computacionalmente e mais difícil de

implementar do que a simulação discreta de eventos, pode não compensar implementar este tipo de simulação. Devido a estes fatores, a simulação discreta de eventos é então o tipo de simulação mais presente na literatura estudada.

2.2 Geração de ocorrências

Quando se pretende simular um modelo referente a serviços de emergência é importante que o processo de geração das ocorrências apresente um comportamento semelhante ao verificado na realidade. Neste caso, podemos dividir o processo de geração de ocorrências em duas partes, a geração de ocorrências no tempo e a geração de ocorrências no espaço, ou seja, quando ocorrem e onde ocorrem.

2.2.1 Modelação temporal

Para fazer face à primeira questão, um dos métodos mais utilizados na literatura são os processos de Poisson. Os processos de Poisson homogéneos estão presentes nos trabalhos de Silva e Pinto, 2010 e Karatas et al., 2017. No entanto, como é possível verificar no em Zhen et al., 2014, o número de ocorrências pode variar ao longo do dia. Os processos de Poisson homogéneos não conseguem modelar estas variações, como tal, os autores recorrem a um processo de Poisson não-homogéneo, de modo a conseguirem representar as variações observadas. Por fim, Rodriguez et al., 2021 utilizam o processo *non-homogeneous non-renewal*. Os autores recorrem a este método para ultrapassar as limitações relativas aos processos de Poisson, uma vez que estes partem do pressuposto das ocorrências serem independentes e o coeficiente de variação ser igual a um, o que nem sempre se verifica. No entanto, o método utilizado por estes autores é muito elaborado e a sua utilização pode não se justificar quando os processos de Poisson se mostram eficazes para gerar as ocorrências.

2.2.2 Modelação espacial

Para determinar a componente espacial das ocorrências, um dos métodos mais utilizados na literatura é a utilização de pontos que retêm toda a informação de uma determinada zona/área/cidade. Este método é utilizado por Aringhieri, 2007, McCormack e Coates, 2015, Karatas et al., 2017 e Enayati et al., 2018 que recorrem a uma grelha para dividir as zonas a estudar e utilizam os centroides de cada elemento da grelha para representar todos os eventos que ocorrem nos mesmos. Dois problemas surgem quando se utiliza este método. O facto de se assumir que as ocorrências só acontecem em pontos específicos resulta que as distâncias sejam apenas calculadas para esses mesmos pontos ignorando as restantes possíveis localizações. A outra questão que se levanta quando se recorre a este método é a de se considerar que as ocorrências estão uniformemente distribuídas pelas áreas representadas por cada ponto. Asgary et al., 2010 e Rodriguez et al., 2021 utilizam nos seus trabalhos um estimador de densidade de kernel para modelar a componente

espacial. Este tem a vantagem de recorrer à base de dados das ocorrências para determinar uma função de massa de probabilidade para as zonas em estudo. Zhou e Matteson, 2015 recorrem a um estimador de densidade de kernel ponderado para determinar a procura de ambulâncias em Toronto, Canada. A função ponderadora utilizada determina a correlação entre as diferentes ocorrências. A utilização de estimadores de densidade de kernel depende do histórico das ocorrências e da sua fiabilidade. Se existirem poucos dados ou se a localização das ocorrências não estiver bem definida este método não é aconselhável.

2.3 Estimação dos tempos de viagem

Na literatura, o método mais utilizado para determinar as distâncias de viagens são as distâncias euclidianas (Karatas et al., 2017). Contudo este método parte do pressuposto de os veículos se deslocarem num caminho reto, o que não se verifica quando se analisa a rede de estradas. Para compensar este fator é usual recorrer-se a um coeficiente de correção. Este procedimento está presente em Aringhieri, 2007 e Silva e Pinto, 2010.

Um método semelhante é utilizado por McCormack e Coates, 2015, com a diferença de que, neste caso os autores condicionam as viagens apenas para as células vizinhas (a área em estudo foi dividida utilizando uma grelha) e diferentes coeficientes de correção foram determinados consoante o número de viagens necessárias entre a célula inicial e a célula final. Apesar dos autores utilizarem um coeficiente de correção, as distâncias calculadas continuaram a não corresponder às distâncias reais. Note-se que se considera como distância real a distância percorrida por estrada entre o ponto de origem e o ponto de destino e, como tal, pontos equidistantes têm distâncias reais diferentes.

Após determinadas as distâncias, a maioria dos autores determinam os tempos de viagem através das velocidades médias, estas são determinadas a partir da base de dados utilizada em cada estudo. Estas podem ser assumidas contantes ao longo do dia (Aringhieri, 2007) ou dependentes da hora do dia (Silva & Pinto, 2010) e (McCormack & Coates, 2015). Ao utilizar velocidades médias, os autores partem do pressuposto que os veículos andam sempre à mesma velocidade. Apesar de alguns autores estudarem as velocidades para diferentes horas do dia, nenhum estudo é feito para as diferentes zonas. E uma vez que diferentes zonas apresentam diferentes regras de circulação, diferentes limites de velocidade e diferentes intensidades de tráfego estas podem apresentar diferentes velocidades médias.

2.4 Considerações finais

Embora existam alguns trabalhos onde se utilizou a simulação para analisar a localização de serviços de emergência, praticamente nenhum destes trabalhos se foca unicamente na simulação. Estes trabalhos utilizam simulação e otimização em conjunto, o que resulta que não exista uma descrição detalhada dos modelos de simulação. Um exemplo é o trabalho de Aringhieri, 2007 que utiliza um coeficiente de correção para determinar as

distâncias, mas a forma de como estes fatores foram determinados não é explicada. O mesmo se verifica nos trabalhos de Silva e Pinto, 2010 e de Karatas et al., 2017. Como foi referido anteriormente, no trabalho de Rodriguez et al., 2021 não é especificado que tipo de informação é avaliada pelo modelo de simulação e que dados provenientes do modelo de simulação é que são utilizados no modelo de otimização para se obter as novas soluções.

Esta dissertação pretende colmatar as lacunas na literatura existente apresentando de forma mais detalhada todos os métodos e fases para a elaboração do modelo de simulação ajustado ao caso em estudo. São ainda apresentados e comparados diferentes métodos para a geração de ocorrências no espaço e para a estimação dos tempos de viagem. Alguns destes métodos são baseados nos trabalhos revistos, tais como a utilização de grelhas para distribuir as ocorrências e a utilização das distâncias euclidianas para determinar os tempos de viagem.

METODOLOGIA

3.1 Simulação

A simulação é uma técnica muito útil quando se pretende estudar sistemas reais e como possíveis alterações que ocorram no sistema o poderão afetar, uma vez que esta permite “prever” o comportamento do sistema através de modelos matemáticos e um conjunto de suposições. Banks et al., 2014 definem simulação como a imitação do funcionamento de um sistema do mundo real ao longo do tempo (“*simulation is the imitation of the operation of a real-world process or system over time*”). O sistema estudado neste trabalho é o funcionamento dos bombeiros portugueses no combate a incêndios urbanos.

Os modelos de simulação, ao contrário dos modelos de otimização, não determinam soluções para os problemas em estudo. Estes permitem analisar os sistemas em estudo e perceber como estes se comportam e como possíveis variações que ocorram no sistema o irão afetar. Neste trabalho, o modelo de simulação tem como principal objetivo analisar como as localizações dos quartéis de bombeiros afetam a eficácia dos mesmos no combate a incêndios urbanos. As várias localizações avaliadas correspondem às atuais localizações dos quartéis de bombeiros, assim como a novas localizações determinadas previamente por um modelo de otimização. Como qualquer método, os modelos de simulação têm vantagens e desvantagens. Banks et al., 2014 apresentam algumas das vantagens e desvantagens da simulação.

Algumas das vantagens:

- A possibilidade de testar uma vasta quantidade de alterações no sistema sem perturbar as operações reais do sistema. Estas alterações podem ser novas políticas do sistema, novos procedimentos operacionais, novas localizações, etc;
- Permite testar a viabilidade de certas hipóteses que pretendem esclarecer como ou porquê que certos acontecimentos ocorrem;
- O tempo pode ser comprimido ou expandido de forma a acelerar ou desacelerar fenómenos que se pretendem estudar;

- É possível obter informação sobre a importância das variáveis para a performance do sistema;
- Permite analisar como as falhas que possam ocorrer no sistema o poderão afetar (*Bottleneck analysis*);
- Pode ajudar a compreender melhor como o sistema funciona;
- Possibilita a resposta a perguntas “E se ...?”.

Desvantagens:

- A construção de modelos de simulação requer treino e um conjunto específico de competências. No entanto, dois modelos construídos por duas pessoas podem ser semelhantes, mas dificilmente serão iguais;
- Os resultados obtidos podem ser difíceis de interpretar. Uma vez que a maioria dos *outputs* baseiam-se num conjunto de inputs aleatórios, por vezes torna-se difícil perceber se estes resultam do acaso ou de um conjunto de relações entre os *inputs*;
- A simulação pode consumir muito tempo e/ou ser muito dispendiosa.

3.2 Sistema em estudo

De maneira a construir um modelo de simulação eficaz é necessário perceber como o sistema que se pretende modelar funciona. A figura 3.1 exemplifica de maneira simplificada o que acontece aquando de um incêndio urbano. Aspetos técnicos relativos ao combate aos incêndios não foram tidos em conta e alguns pressupostos foram assumidos na realização do modelo de simulação, nomeadamente:

- No modelo de simulação utilizado considerou-se que os bombeiros iniciam a viagem até às ocorrências no momento em que estas acontecem, não sendo considerada toda a parte da recolha de informação e transferência de chamadas por parte da central de serviços de emergência e dos bombeiros. O tempo de preparação dos bombeiros também não foi contabilizado. Estes fatores podem ser ignorados, uma vez que o que se pretende estudar são as localizações dos quartéis de bombeiros e como estas afetam o tempo de resposta no combate aos incêndios urbanos;
- Considerou-se que todos os quartéis têm os meios necessários para responder a qualquer incêndio urbano e consequentemente apenas um quartel responde a cada ocorrência;
- Uma vez que os quartéis têm meios ilimitados, o tempo que os veículos estão fora do quartel é irrelevante. Como tal, considerou-se que a duração dos incêndios é igual a zero;

- Considerou-se que os tempos de viagem são dados pelo tempo que o primeiro veículo demora a chegar ao local do incêndio.



Figura 3.1: Fases de um incêndio urbano.

Em Portugal, cada quartel de bombeiros está responsável por uma área administrativa previamente estabelecida. A informação sobre estas áreas não foi disponibilizada, no entanto, utilizando os dados do histórico das ocorrências, foram estabelecidas regras para a afetação dos quartéis a cada ocorrência. Todavia, as regras em vigor não aparentam ser as mais eficientes quando se pretende diminuir os tempos de resposta. Posto isto, foram então estabelecidas mais dois conjuntos de regras, apresentadas em seguida, de modo a tornar mais eficiente a afetação dos quartéis.

- **Regras Atuais:** Cada ocorrência é alocada ao quartel que exista na mesma freguesia da ocorrência. Caso não haja nenhum, é afeta ao quartel mais próximo pertencente ao concelho da ocorrência;
- **Regras Intermédias:** Dado que os quartéis se regem por áreas administrativas, realizou-se apenas uma pequena mudança relativamente às regras anteriores, sendo alocados aos incêndios o quartel do mesmo concelho da ocorrência que se encontre mais próximo;
- **Regra do quartel mais próximo:** Neste caso ignora-se por completo as áreas administrativas e é afeto o quartel mais próximo da ocorrência.

No caso de não existir nenhum quartel no concelho onde o incêndio ocorre, o quartel alocado nas duas primeiras regras será o quartel que se encontre mais próximo. É de realçar que quando se fala em quartel mais próximo está-se a referir ao quartel que leva menos tempo a chegar ao incêndio e não necessariamente ao que se encontra mais perto em termos de distância.

3.3 Modelo de Simulação

Com base no sistema da figura 3.1 e nos pressupostos anteriormente definidos, implementou-se o modelo de simulação representado na figura 3.2.

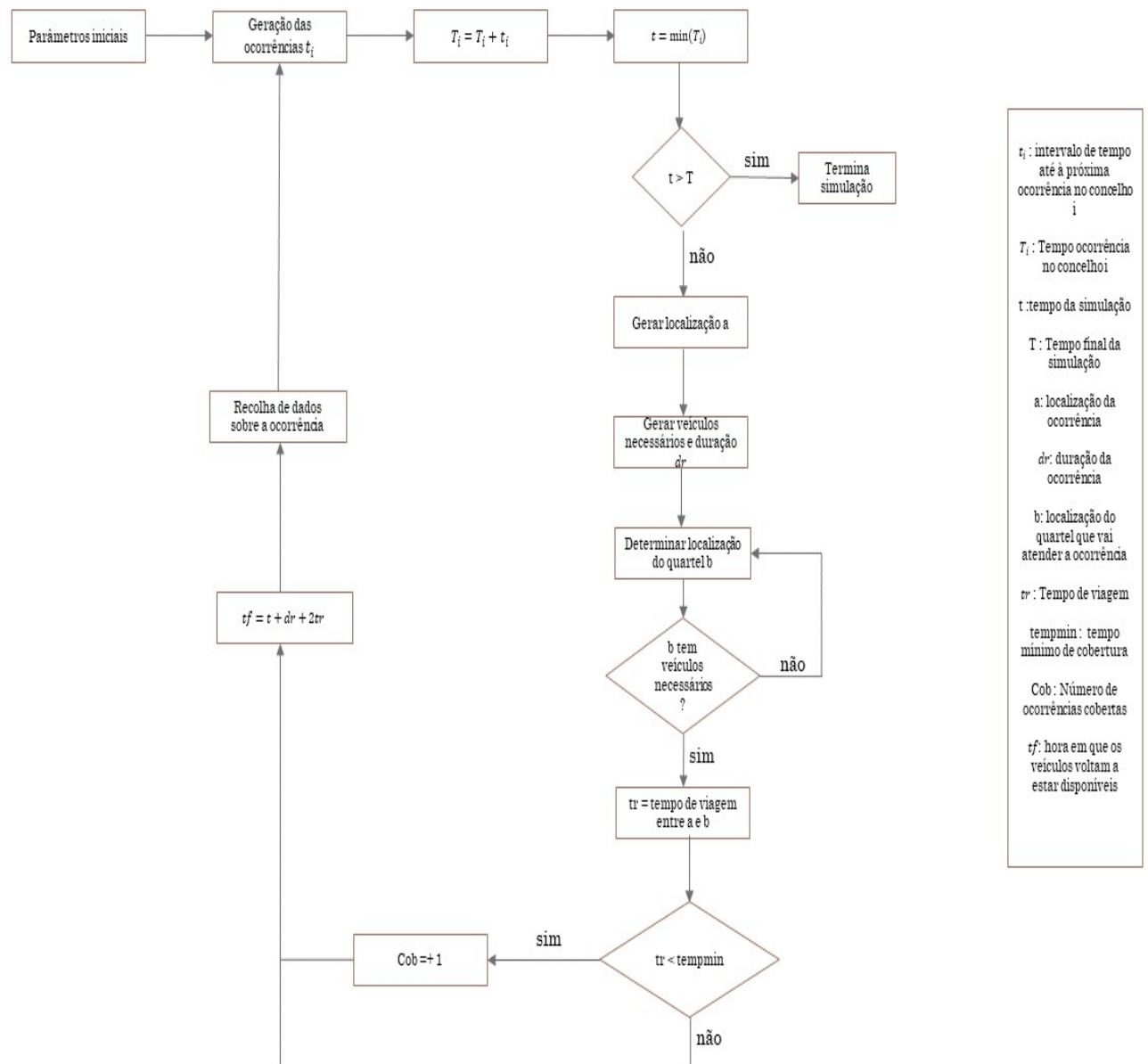


Figura 3.2: Modelo de simulação implementado.

Descrição do modelo de simulação:

- Em primeiro lugar são gerados os intervalos de tempo até que aconteça a próxima ocorrência nos concelhos da região em estudo. Apenas são gerados os tempos para os concelhos se a última ocorrência já tiver sido respondida;
- De seguida é determinado para cada concelho quando vai ocorrer o próximo evento. Para cada concelho é somado ao tempo em que se deu o último incêndio o intervalo de tempo determinado anteriormente. Estes tempos são guardados no vetor T_i , com i a variar com o número de concelhos. Posto isto é determinado o tempo atual da simulação t , que corresponde ao tempo do próximo incêndio, isto é, $\min(T_i)$;

- Nos passos seguintes são geradas as coordenadas exatas do local onde ocorreu o incêndio, bem como os veículos necessários e a sua duração (na simulação implementada, os últimos dois são sempre iguais a zero);
- Em seguida é determinado o quartel com base nas regras de afetação estabelecidas anteriormente e verificado se este tem os meios necessários para responder à ocorrência. No caso de não terem os meios necessários é determinado um novo quartel (no modelo implementado esta condição é sempre verificada);
- Por fim, o tempo de viagem entre o quartel e a ocorrência é gerado. O tempo em que os meios utilizados estão de novo disponíveis, t_f , é calculado. A ocorrência é dada como concluída e os dados sobre a mesma são guardados.

Os parâmetros de entrada do modelo são as localizações dos quartéis de bombeiros, os tempos de viagem e os dados necessários para gerar as ocorrências no tempo e no espaço. Com exceção das localizações dos quartéis de bombeiros, os restantes parâmetros tiveram de ser gerados. Para as localizações dos quartéis de bombeiros utilizou-se as localizações reais e/ou as localizações provenientes do modelo de otimização. O principal parâmetro resultante do modelo é a percentagem de ocorrências cobertas. Além deste parâmetro outros dados sobre cada ocorrência são também recolhidos como mostra a tabela 3.1 .

Tabela 3.1: Parâmetros recolhidos sobre cada ocorrência pelo modelo de simulação

Parâmetros recolhidos
dia
hora do dia (horas)
local da ocorrência
quartel afeto à ocorrência
tempo de viagem (horas)
duração (horas)
tempo de regresso (horas)
cobertura (1 se a ocorrência foi coberta 0 c.c)

3.4 Parâmetros Iniciais

Nesta secção aborda-se como é que os parâmetros iniciais foram determinados. Em primeiro é explicado como é que os tempos entre as ocorrências são gerados e a relação entre os resultados obtidos e com os processos de Poisson. Em seguida discute-se de que modo as localizações das ocorrências são definidas. Por fim apresenta-se os dois métodos utilizados para determinar os tempos de viagem entre as localizações e os quartéis de bombeiros.

3.4.1 Modelação temporal

De forma a gerar os tempos entre as ocorrências no modelo de simulação, estudou-se

o tempo entre as ocorrências em cada concelho da região em estudo. Para tal, recorreu-se ao teste de Kolmogorov-Smirnov de modo a determinar se os tempos seguiam alguma distribuição conhecida. O teste de Kolmogorov-Smirnov compara a frequência cumulativa da população em estudo com a frequência da distribuição empírica que se pretende estudar (Corder e Foreman, 2009).

O teste de Kolmogorov-Smirnov foi implementado com recurso ao software R com um nível de significância $\alpha = 0.05$. As hipóteses testadas pelo teste de Kolmogorov-Smirnov foram:

- H_0 : A amostra segue uma distribuição exponencial λ , com $\frac{1}{\lambda}$ igual à média amostral;
- H_1 : A amostra não segue uma distribuição exponencial λ , com $\frac{1}{\lambda}$ igual à média da amostra.

As distribuições a serem testadas na hipótese H_0 são determinadas com base na análise das estatísticas básicas (tabela 4.2) e dos histogramas dos dados relativos a cada concelho.

No caso de existirem regiões onde é rejeitada a hipótese H_0 para as distribuições testadas utiliza-se o histórico dos dados para determinar uma distribuição empírica relativa ao número de dias entre as ocorrências. Consideremos então N como o número de dias até à próxima ocorrência. Tem-se para $n \geq 0$ e inteiro a seguinte função massa de probabilidade:

$$f(n) = \mathbb{P}[N = n] = \frac{\text{nº de observações} = n}{\text{nº total de observações}} \quad (3.1)$$

As distribuições determinadas para os tempos entre os incêndios são então utilizadas como parâmetros de entrada para gerar os intervalos de tempo entre as ocorrências para cada concelho (1º passo do modelo de simulação).

Como é possível verificar no scção 2.2.1 os processos de Poisson são um dos métodos mais utilizados na literatura para modelar o tempo entre ocorrências. Parzen, 1999 apresenta a seguinte definição de processos de Poisson e o seguinte resultado que permite estabelecer um paralelismo entre os resultados obtidos para os tempos de espera entre incêndios e os processos de Poisson.

Definição: Seja $N(t)$, para qualquer $t > 0$, uma função de contagem que representa o número de ocorrências no intervalo de tempo $]0, t]$. Para cada t , $N(t)$ é uma v.a. que apenas toma valores inteiros positivos $0, 1, 2, 3, 4, \dots$. Temos que $N(t)$, $t \geq 0$ é um Processo de Poisson com intensidade λ se:

1. $N(t)$, $t \geq 0$ tem incrementos independentes;

2. $\forall s < t$, $N(t) - N(s)$, que representa o número de acontecimentos ocorridos no intervalo de tempo $]s, t]$, segue uma distribuição de Poisson com intensidade $\lambda(t - s)$. Isto é:

$$\mathbb{P}[N(t) - N(s) = k] = \exp^{-\lambda(t-s)} \frac{(\lambda(t-s))^k}{k!},$$

$$\mathbb{E}[N(t) - N(s)] = \lambda(t - s), \text{ Var}[N(t) - N(s)] = \lambda(t - s).$$

Do ponto 2 considerando o caso específico $s = 0$ tem-se:

$$\forall t > 0, N(t) \sim P(\lambda t).$$

Teorema: Seja T_k , $k \in \mathbb{N}$, o tempo decorrido entre ocorrências sucessivas. Tem-se que se a sucessão dos tempos $\{T_n, n \geq 1\}$ é *i.i.d* com distribuição Exponencial de intensidade λ , então o processo de contagem $N(t)$, $t \geq 0$ é um processo de Poisson com intensidade λ .

Seja então $N(t)$ o número de incêndios em cada concelho no intervalo $]0, t]$ e T_k o tempo entre os incêndios. Tem-se que $N(t)$ é um processo de contagem e visto que os tempos entre ocorrências seguem uma distribuição Exponencial de valor médio $\frac{1}{\lambda}$ tem-se então que $N(t)$ é um processo de Poisson de intensidade λ .

Uma vez que $N(t)$ é um processo de Poisson pela definição apresentada anteriormente conclui-se que os incêndios urbanos são eventos independentes e $N(t) \sim P(\lambda t)$.

Neste trabalho apesar de se ter seguido uma direção diferente da utilizada na maioria da literatura conclui-se que $N(t)$ é um processo de Poisson e, como tal, seria possível utilizar abordagens semelhantes às utilizadas na literatura.

3.4.2 Modelação espacial

De modo a gerar a localizações das ocorrências, foram estabelecidas unidades geográficas. Estas unidades representam e retêm a informação de toda a sua área envolvente no modelo de simulação. Para tal, utilizou-se uma grelha para dividir a região em estudo e estabeleceu-se o centroide de cada célula da grelha como a unidade geográfica, sendo então cada célula representada pelo centróide no modelo de simulação.

O tamanho da grelha a utilizar é um dos fatores que gera maior discordância entre os autores. Segundo Chevalier et al., 2012 uma grelha muito grosseira leva a que sejam cometidos erros de agregação, uma vez que os centroides representam áreas muito grandes e com diferentes características. Por outro lado, Rodriguez et al., 2021 afirmam que uma grelha demasiado fina não exibirá tendências espaciais. De forma a minimizar os problemas resultantes do tamanho da grelha, Chevalier et al., 2012, recorreram a uma grelha em que em cada quadrado o tempo de viagem entre quaisquer dois pontos do

mesmo seja inferior a 2 minutos. Os autores obtiveram uma grelha de aproximadamente 1,55 km². Nesta dissertação optou-se por uma grelha de 1244 metros de comprimento por 938 metros de largura para dividir e determinar os centróides das regiões em estudo. Dado que a grelha utilizada é ligeiramente mais pequena que a utilizada por Chevalier et al., 2012 pode garantir-se que os tempos de viagem entre quaisquer dois pontos de cada célula é inferior a 2 minutos.

Para cada centroide foram determinadas as suas coordenadas geográficas, latitude e longitude, o concelho e a freguesia onde este se encontra. Considera-se então que todos os incêndios gerados ocorrem nas coordenadas do centroide.

Como especificado na secção anterior serão geradas ocorrências para cada concelho. Após serem geradas, é necessário determinar em que centroide pertencente ao concelho ocorre o incêndio. Com essa finalidade, determinou-se para todas as freguesias a probabilidade de ocorrer um incêndio sabendo que um incêndio foi gerado no concelho a que estas pertencem. Sejam X_i , com $i = 1, 2, \dots, n^\circ$ de concelhos, uma v.a que toma valores um se houver ocorrência no concelho i e zero caso contrário e Y_j , com $j = 1, 2, \dots, n^\circ$ de freguesias do concelho i , uma v.a que toma valores um se houver ocorrência na freguesia j e zero caso contrário. Tem-se que:

$$P[Y_j = 1 | X_i = 1] = \begin{cases} 0 & , \text{ se a freguesia } j \text{ não pertence ao concelho } i \\ \frac{n^\circ \text{ total de incendios na freguesia } j}{n^\circ \text{ total de incêndios no concelho } i} & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

De maneira a determinar em que centroide da freguesia é que ocorre cada incêndio duas abordagens diferentes foram utilizadas.

Na primeira considerou-se que todos os centroides da freguesia têm iguais probabilidade de que o incêndio se localize nos mesmos. Isto é, a probabilidade de existir uma ocorrência é uniformemente distribuída pelos centroides da freguesia. Esta é a abordagem mais recorrente na literatura revista.

A segunda abordagem é baseada no facto de existir uma relação entre o número de habitantes e o número de incêndios urbanos («Spatial Modeling and Mapping of Urban Fire Occurrence in Portugal», s.d.), sendo que quanto maior for o número de habitantes maior é a probabilidade de haver um incêndio. Recorreram-se então aos dados relativos ao número de habitantes por quilómetro quadrado na região em estudo, provenientes dos censos de 2011, para associar a cada centroide um número de habitantes correspondente à área que estes representam. Uma vez determinado o número de habitantes associado a cada centroide, a probabilidade de haver uma ocorrência em cada centroide foi calculada recorrendo à formula 3.2,

$$P[Z_i = 1] = \frac{x_i}{\sum_{j=1}^{n^\circ \text{ centroides}} x_j} \quad (3.2)$$

em que Z_i , com $i = 1, 2$, nº de centroides na freguesia onde ocorre o incêndio, é uma v.a que toma valores um se o incêndio ocorreram no centroide i e zero c.c. e x_i o número de habitantes associado ao centroide i .

Os centroides determinados são utilizados como parâmetros de entrada para as possíveis localizações dos incêndios urbanos e as probabilidades calculadas são os parâmetros que permitem gerar a localização dos incêndios.

3.4.3 Tempos de viagem

Uma vez, determinados os dados necessários para gerar as ocorrências e as suas localizações é necessário determinar os tempos de viagem entre as ocorrências e os quartéis de bombeiros. Dado que não foram disponibilizados dados sobre os tempos de viagem dos bombeiros aos incêndios, outras abordagens foram utilizadas para determinar os tempos de viagem.

De modo que os tempos de viagem sejam os mais fidedignos possíveis programou-se uma função que recorrendo às *Google Maps APIs* que extrai o tempo de viagem entre duas coordenadas. Esta função foi programada recorrendo ao *Python* e os dados foram recolhidos entre a uma e as três da manhã, esta janela temporal foi escolhida de modo a que os tempos de viagem não sejam afetados pelo trânsito. As *Google Maps APIs* permitem incorporar o site *Google Maps* num site externo e sobrepor dados específicos (Wang e Xu, 2011), sendo então possível recolher informações sobre tempo e/ou distâncias de viagens semelhantes às que são dadas quando se utiliza o *Google Maps*. As *Google Maps APIs* tem a desvantagem de ser um serviço que necessita de uma licença paga, no entanto existe um período experimental que permitiu recolher os tempos de viagem entre os quartéis de bombeiros existentes e os centroides determinados anteriormente. Contudo outras possíveis localizações para os quartéis de bombeiros foram também avaliadas e como tal outro método teve de ser utilizado para determinar os tempos de viagem.

De modo a determinar os tempos de viagem para as novas localizações recorreu-se a uma regressão linear entre as distâncias euclidianas relativas às coordenadas e as respetivas distâncias reais determinadas utilizando as *Google Maps APIs*. A regressão linear foi realizada recorrendo ao software R. Obteve-se a função da equação 3.3,

$$dist = 154.58750777 \times dist_{eucl} + 0.07727834 \quad (3.3)$$

sendo $dist$ a distância real e $dist_{eucl}$ a distância euclidiana calculada a partir das coordenadas geográficas recorrendo à equação 3.4.

$$dist_{eucl} = \sqrt{(latitude_a - latitude_b)^2 + (longitude_a - longitude_b)^2} \quad (3.4)$$

Dado que estamos a trabalhar com distâncias muito próximas, a curvatura da terra não foi tida em conta neste estudo.

Para determinar cada tempo de viagem, t_v , dividiu-se a distância, $dist$, pela velocidade média, vel_{med} , equação 3.5.

$$t_v = \frac{dist}{vel_{med}} \quad (3.5)$$

Foram consideradas três velocidades médias de 30 km/h, 32,5 km/h e 35 km/h.

No capítulo 5 os resultados obtidos para cada velocidade foram comparados com os resultados que se obtiveram utilizando os tempos de viagem provenientes das *Google Maps API's*. No capítulo seguinte é apresentado o estudo de caso para o qual se implementou o presente modelo de simulação, assim como a base de dados utilizada para a aplicação da metodologia apresentada neste capítulo.

ESTUDO DE CASO

Como referido anteriormente, este trabalho tem como objetivo fornecer uma ferramenta capaz de avaliar a capacidade de resposta dos bombeiros portugueses perante incêndios urbanos. De modo a testar o modelo de simulação implementado, decidiu-se analisar e avaliar localizações dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto. O distrito do Porto foi o escolhido porque existem simultaneamente zonas com elevadas e baixas densidades populacionais além de existirem uma quantidade considerável de dados relativos a incêndios urbanos .

Como referido no capítulo 1, um incêndio está coberto se o tempo de resposta for menor que um tempo limite. No entanto, a legislação portuguesa não prevê nenhum tempo como o tempo limite para os bombeiros responderem aos incêndios urbanos. Recorrendo-se à literatura observa-se que vários autores, como Chevalier et al., 2012 e Rodriguez et al., 2021 apontam 10 minutos (2 de preparação + 8 para a viagem até ao local do incêndio) como o tempo máximo de resposta. Este tempo foi posteriormente corroborado por um ex bombeiro português. Como referido no capítulo 3, a preparação dos bombeiros não é tida em conta o tempo de preparação não será contabilizado. Estabeleceu-se então como ocorrências cobertas os incêndios urbanos em que o tempo de resposta foi menor ou igual a 8 minutos. Por sua vez, o tempo de resposta é dado pelo tempo de viagem entre o quartel e a ocorrência.

Na secção seguinte descreve-se e analisa-se a base de dados relativa aos incêndios urbanos ocorridos no distrito do Porto, assim como da base de dados com a informação da localização dos quartéis de bombeiros.

4.1 Base de dados

O distrito do Porto é o segundo distrito mais populoso de Portugal tendo 1 786 656 pessoas e uma área de 2 395 km^2 , existindo 45 quartéis de bombeiros divididos pelos 18 concelhos do distrito, como é possível observar na tabela ?? dos anexos e na figura 4.1.

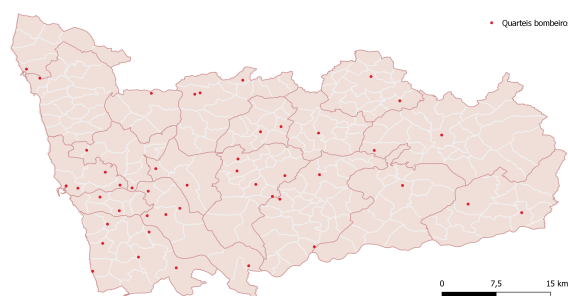


Figura 4.1: Localização dos quartéis de bombeiros no distrito do Porto.

Como seria de esperar existe uma grande disparidade na distribuição dos quartéis ao longo do distrito. A figura 4.1 mostra que existe uma grande concentração de quartéis na área envolvente ao concelho do Porto que é uma das zonas mais populosas do distrito. Contrariamente, no interior do distrito observa-se que existe uma menor concentração de quartéis de bombeiros. A nível de concelhos é de notar que Vila do Conde tem apenas um quartel e este localiza-se muito perto da fronteira do mesmo, como tal este concelho aparenta estar descoberto. Quando se analisa as localizações dos quartéis ao nível das freguesias é de realçar a existência de freguesias com dois quartéis. As localizações apresentadas dos quartéis de bombeiros foram disponibilizadas pela ANEPC (Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil).

Para a implementação do modelo de simulação analisaram-se ainda 13 541 incêndios urbanos no distrito do Porto. Os dados foram fornecidos pela ANEPC e correspondem às ocorrências entre o ano de 2012 e o ano de 2020 inclusive. A figura 4.2 mostra o número de incêndios ocorridos em cada um dos anos. É possível constatar que ao longo dos anos o número de incêndios tem vindo a aumentar. Apesar disto decidiu-se utilizar todos os anos da base de dados no estudo de modo a ter-se mais dados.

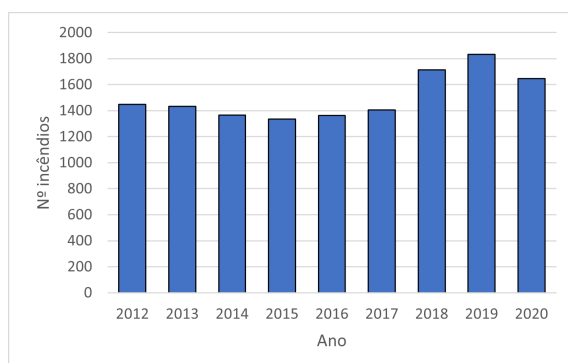


Figura 4.2: Número de incêndios registado em cada ano.

A base de dados disponibilizada tem um total de 24 variáveis. No entanto, a maioria das variáveis foram ignoradas pelo facto de não se saber exatamente o que representam ou por não serem necessárias para a implementação do modelo de simulação. Entre

estas estão variáveis como o código da ocorrência, o número da ocorrência, a família da ocorrência, o tipo de ocorrência, etc. Ficou-se com um total de 9 variáveis que podem ser divididas em 2 grupos:

- **Localização**

- Distrito
- Concelho
- Freguesia
- Latitude
- Longitude

- **Temporais**

- Data
- Ano
- DataOcorrência - Contém a data e hora do início do incêndio
- DataFechoOperacional - Contém a data e hora do fecho das operações

Ao analisar-se o número de incêndios por freguesia verificou-se que este valor é muito baixo em algumas freguesias, existindo até uma freguesia que nunca teve uma ocorrência. Decidiu-se então estudar o número de incêndios urbanos ao nível de cada concelho. A distribuição das ocorrências pelos concelhos e população de cada um são apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Percentagem total de incêndios e população de cada concelho do Porto.

Concelho	Percentagem de incêndios (%)	População
Amarante	2.44 %	56 264
Baião	0.90 %	20 522
Felgueiras	3.23 %	58 065
Gondomar	8.18 %	168 027
Lousada	1.85 %	47 387
Maia	6.80 %	135 306
Marco de Canaveses	2.54 %	53 450
Matosinhos	10.18 %	175 478
Paços de Ferreira	2.61 %	56 340
Paredes	5.23 %	86 854
Penafiel	2.88 %	72 265
Porto	15.51 %	231 828
Póvoa de Varzim	3.07 %	64 257
Santo Tirso	3.04 %	67 725
Trofa	2.45 %	38 554
Valongo	5.09 %	94 697
Vila do Conde	3.89 %	80 831
Vila Nova de Gaia	20.12 %	303 854

Pela tabela 4.1 é possível verificar que existe uma relação entre o número de incêndios em cada concelho e o a população do concelho, sendo que quanto maior é a população maior é o risco de incêndio. Esta relação é corroborada no trabalho de «Spatial Modelling and Mapping of Urban Fire Occurrence in Portugal», [s.d.](#) O único concelho que aparenta ser uma exceção a esta norma é o concelho da Trofa. No entanto, ao comparar o concelho da Trofa com o de Amarante, uma vez que ambos apresentam uma percentagem de incêndios idêntica, o segundo tem uma área de aproximadamente 301 km^2 e uma população de 56 264 enquanto o primeiro tem uma área de apenas 72 km^2 para uma população de 38 554. Apesar de este ser um fator que pode ajudar esta discrepância, neste concelho a densidade populacional não é um bom indicador para o risco de incêndios.

Como mencionado no artigo de Zhen et al., [2014](#) o número de ocorrências dos serviços de emergências podem variar ao longo do dia. Esta variação é também verificada nos incêndios urbanos no distrito do Porto, sendo que entre o meio dia e as dez da noite é a altura do dia em que existem mais ocorrências, após a dez dá-se um decréscimo até às cinco da manhã e um aumento até ao meio dia (figura 4.3). Além da variação ao longo do dia foi também possível observar uma variação ao longo dos meses do ano. Como é possível observar pela figura 4.4 os meses de inverno têm relativamente mais ocorrências que os restantes meses do ano que apresentam sensivelmente o mesmo comportamento.

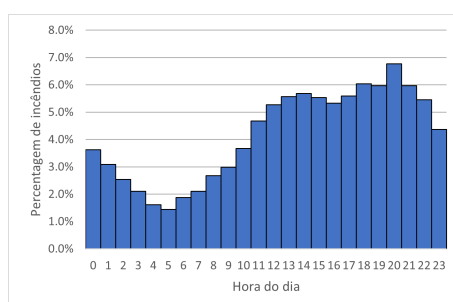


Figura 4.3: Distribuição dos incêndios por hora no distrito do Porto.

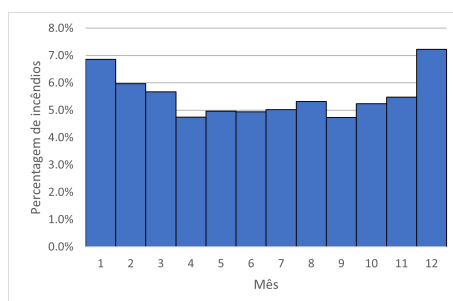


Figura 4.4: Distribuição dos incêndios por mês no distrito do Porto.

Neste trabalho optou-se por estudar os incêndios sem se considerar estas relações entre as alturas do dia e do ano com o número de ocorrências uma vez que, estas relações não se verificam em todos os concelhos. De forma a simplificar o modelo de simulação

considerou-se que todas os períodos do dia apresentam o mesmo comportamento assim como os meses do ano.

Após analisar as variáveis de latitude e longitude concluiu-se que estas não aparentam ser muito fidedignas, uma vez que é possível verificar vários casos de ocorrências que têm a mesma latitude e longitude e, no entanto, não apresentam o mesmo tipo de ocorrência. Por exemplo na freguesia de Rio Tinto existe uma localização onde ocorreram incêndios em 15 tipos diferentes de edifícios. Dado isto decidiu-se ignorar a longitude e latitude das ocorrências, sendo a localização de cada ocorrência caracterizada apenas pelo concelho e pela freguesia.

A variável DataOcorrência foi utilizada determinar uma nova variável, o tempo entre ocorrências consecutivas no mesmo concelho. Esta nova variável foi utilizada como base para gerar as ocorrências no modelo de simulação (capítulo 3.4.1). O tempo foi calculado em horas e as estatísticas como a média, o desvio padrão, o mínimo e o máximo foram calculadas para cada concelho, os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.2 .

Tabela 4.2: Estatísticas dos tempos entre ocorrências, em horas.

	Concelho	min	max	média	desvio padrão
	Amarante	0.35	882.83	223.17	200.40
	Baião	1.50	5386.87	643.38	725.00
	Felgueiras	0.10	1165.57	180.27	186.50
	Gondomar	0.08	642.40	71.26	73.48
	Lousada	0.20	1919.23	316.01	314.75
	Maia	0.01	518.98	85.43	83.87
	Marco de Canaveses	0.10	2419.80	229.83	280.28
	Matosinhos	0.05	616.90	57.22	59.52
	Paços de Ferreira	0.23	1113.82	223.82	207.86
	Paredes	0.05	775.75	111.39	113.68
	Penafiel	0.07	1986.62	202.64	235.62
	Porto	0.02	496.67	37.56	42.84
	Póvoa de Varzim	0.38	1734.58	188.36	207.63
	Santo Tirso	0.55	1237.70	191.94	200.35
	Trofa	0.17	1193.42	237.55	235.51
	Valongo	0.01	864.97	114.36	118.22
	Vila do Conde	0.13	1022.25	149.23	153.79
	Vila Nova de Gaia	0.01	333.98	28.98	30.68

Para além das estatísticas presentes na tabela 4.2, analisaram-se ainda os histogramas dos tempos entre acontecimentos de cada concelho. A figura 4.5 corresponde ao histograma do concelho de Amarante.

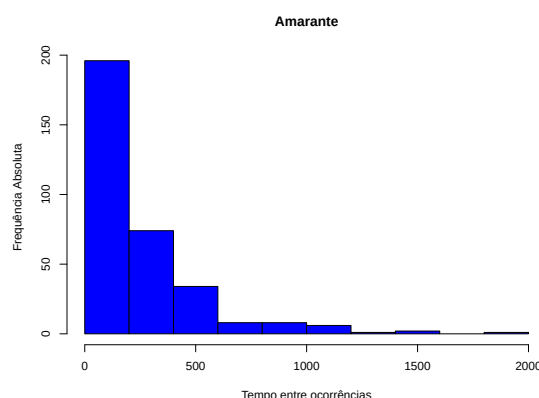


Figura 4.5: Histograma relativo ao tempos entre ocorrências sucessivas no concelho de Amarante.

Com base nos dados apresentados na tabela 4.2 e recorrendo à metodologia apresentada no capítulo 3.4.1 determinou-se que para todos os concelhos, com exceção do concelho do Porto, não existem evidências para rejeitar a hipótese H_0 a um nível de significância de 5%. Considerou-se então que os tempos entre ocorrências seguem uma distribuição exponencial. Na tabela 4.3 são mostrados os parâmetros λ utilizados na geração dos tempos entre ocorrências em cada concelho.

Tabela 4.3: Parâmetro λ da distribuição exponencial utilizado na geração dos tempos entre ocorrências em cada concelho, valor em horas.

Concelho	$\lambda = \frac{1}{\mu}$
Amarante	$\frac{1}{238.04}$
Baião	$\frac{1}{643.38}$
Felgueiras	$\frac{1}{180.27}$
Gondomar	$\frac{1}{71.26}$
Lousada	$\frac{1}{316.01}$
Maia	$\frac{1}{85.43}$
Marco de Canaveses	$\frac{1}{229.83}$
Matosinhos	$\frac{1}{57.22}$
Paços de Ferreira	$\frac{1}{223.82}$
Paredes	$\frac{1}{111.39}$
Penafiel	$\frac{1}{202.64}$
Póvoa de Varzim	$\frac{1}{188.36}$
Santo Tirso	$\frac{1}{191.94}$
Trofa	$\frac{1}{237.55}$
Valongo	$\frac{1}{114.36}$
Vila do Conde	$\frac{1}{149.23}$
Vila Nova de Gaia	$\frac{1}{28.98}$

O concelho do Porto sendo o único em que se rejeitou H_0 para todas as distribuições testadas, aplicou-se a equação 3.5 de modo a determinar a distribuição empírica relativa ao número de dias entre os incêndios urbanos.

Finalmente, aplicando a grelha determinada no capítulo 3.4.2 ao distrito do Porto com recurso ao *software* QGIS, dividiu-se o distrito em 1999 unidades geográficas representadas pelos respetivos centróides como mostra a figura 4.6.

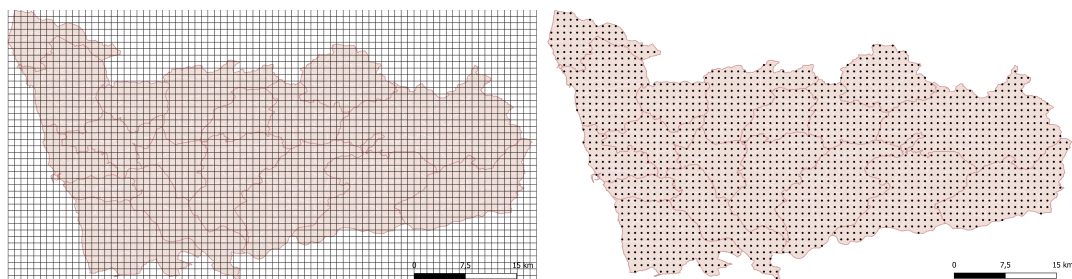


Figura 4.6: Mapas do distrito do Porto com a grelha utilizadas e os com os centróides correspondentes.

Os dados anteriormente apresentados foram utilizados como parâmetros iniciais no modelo de simulação implementado de modo a analisar as localizações dos quartéis do distrito do Porto. Os resultados das análises são apresentadas no próximo capítulo.

RESULTADOS

Neste capítulo é analisado como é que as diferentes abordagens usadas para determinar os tempos de viagem (secção 3.4.3) ou para gerar as localizações (secção 3.4.2) afetam os resultados do modelo de simulação. São também analisados resultados obtidos ao aplicar-se o modelo de simulação anteriormente descrito no capítulo 3 ao estudo de caso descrito no capítulo 4 para os vários cenários de localização dos quartéis de bombeiros e para as regras de afetação estabelecidas no secção 3.2.

O modelo de simulação foi implementado recorrendo ao *Visual Basic* 7.1 e ao *Microsoft Excel*. Sendo o computador utilizado um *hp probook* 430 g1 com um processador *Intel(R) Core(TM) i5-4300U*.

5.1 Validação do Modelo

De modo a verificar se o modelo implementado esperado (figura 3.2) e que as regras de afetação dos quartéis de bombeiros aos incêndios são cumpridas, realizou-se um conjunto de testes. Estes testes consistiram na execução do modelo de otimização com os parâmetros iniciais previamente estipulados, ou seja, os incêndios foram gerados em pontos específicos de modo a verificar se os resultados obtidos estavam em concordância com os resultados esperados.

De seguida averiguou-se se a distribuição das ocorrências geradas pelos concelhos é semelhante à distribuição de ocorrências verificada na tabela 4.2. Para tal, realizaram-se 20 simulações, cada simulação corresponde a um ano. Através da figura 5.1 verificou-se que a percentagem de ocorrências em cada concelho é semelhante à verificada na tabela 4.2. A figura 5.2 mostra a variação do número total de incêndios gerados em cada ano simulado. Dado que foram usadas as ocorrências de todos os anos presentes na base de dados, espera-se que o número de incêndios gerados pelo modelo em cada simulação seja próximo da média relativa ao número de incêndios ocorridos em cada ano. Tal facto pode ser comprovado ao comparar o *boxplot* da figura 5.2 com a figura 4.2. Na figura 5.2 observa-se que o número de incêndios gerados pelo modelo ronda os 1500 que é igual à

média anual do número de incêndios ao longo dos 9 anos.

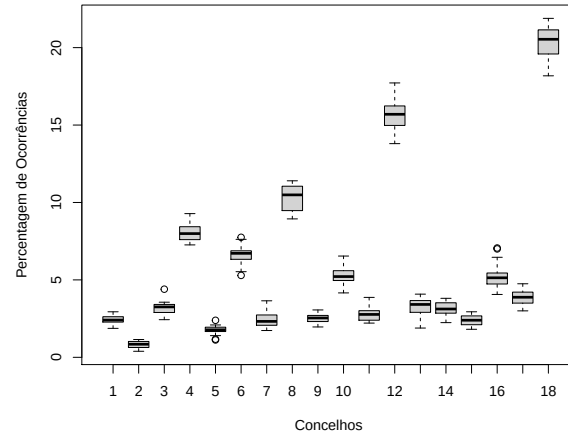


Figura 5.1: Percentagem de incêndios por concelho.

Nota: Os concelhos encontram-se ordenados por ordem alfabética sendo que o concelho 1 corresponde a Amarante, 2 a Baião, ..., 17 a Vila do Conde e o 18 a Vila Nova de Gaia.

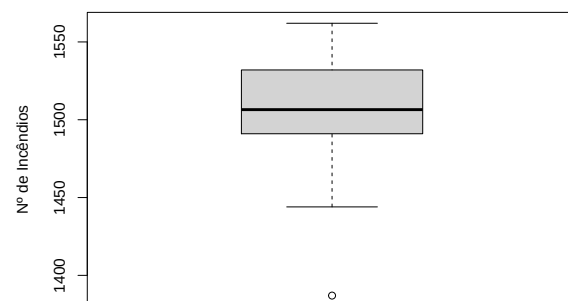


Figura 5.2: Número de incêndios gerados.

Como referido no capítulo 4, não existem informações sobre o tempo de viagem entre os bombeiros e os incêndios nem sobre se as ocorrências foram cobertas no tempo estipulado. Isto deve-se ao facto de na legislação portuguesa não existir um tempo estipulado para que os bombeiros tenham de chegar aos incêndios. Como tal, não foi possível fazer uma validação completa do modelo de maneira a perceber se os tempos de viagem inseridos são representativos da realidade ou se os resultados da cobertura resultantes do modelo de simulação são representativos da cobertura real. No entanto, uma vez que foram utilizados tempos de viagem reais, obtidos através das *Google Maps APIs*, estes permitem ter confiança de que os resultados do modelo são representativos da realidade.

Na tabela 5.1 comparam-se os valores de 10 tempos de distâncias aleatórios determinados recorrendo às *Google Maps APIs* com os valores obtidos utilizando o site do *Google Maps*, verificando-se que os valores são próximos. As diferenças entre os valores podem estar relacionadas com o facto do *Google Maps* utilizar valores arredondados para minutos de modo a determinar o tempo de viagem, enquanto as *Google Maps APIs* utilizam o tempo em segundos.

Tabela 5.1: Tempos, em minutos, obtidos através do *Google Maps* e das *Google Maps APIs*

Google Maps	Google Api
16	14.22
3	3.32
29	28.52
17	15.73
9	8.40
4	3.72
24	22.50
35	35.23
18	16.13
24	22.93

Nos subcapítulos seguintes fixou-se uma raiz no modelo de simulação e estabeleceu-se um número de anos que o modelo simula. A raiz foi fixada de modo que os valores gerados pelo modelo de simulação sejam sempre iguais. O facto de os valores serem sempre iguais é importante quando se pretende comparar as diferentes abordagens e os diferentes cenários e analisar o seu impacto. Se os valores gerados para os incêndios não forem sempre os mesmos não é possível concluir que as alterações nos resultados se devem apenas aos fatores que se estão a estudar. A raiz foi fixada utilizando a função *RND(-1)* do *Visual Basic*.

Ao analisar-se a percentagem de ocorrências cobertas em cada simulação, figura 5.3, verifica-se que valores obtidos para a percentagem de ocorrências cobertas apresentam uma variação consideravelmente alta. Nas análises feitas nos subcapítulos seguintes é importante que os valores de cobertura não apresentem uma variação tão grande, decidiu-se então que em cada simulação realizada seriam simulados vários anos. Isto permite que ao analisar a totalidade dos incêndios ao longo dos vários anos se possa observar um valor para o qual tende a percentagem de ocorrências cobertas. Foram então testados 10, 20, 50, 100, 200, 300 e 500 simulações, os valores da percentagem de incêndios cobertos e da variância da percentagem dos incêndios cobertos relativos às últimas 10 simulações foram calculados.

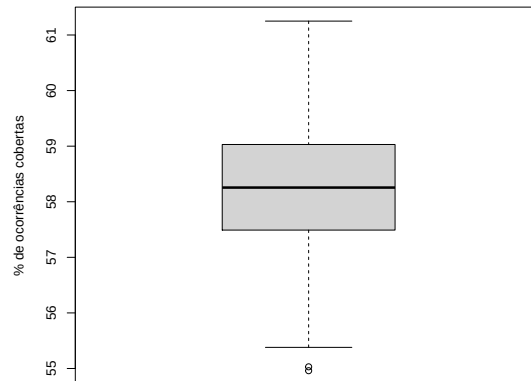


Figura 5.3: Percentagem anual de incêndios cobertos (100 simulações).

Tabela 5.2: Cobertura, variância e tempo de computação (em minutos).

Nº simulações	Cobertura obtida	Variância (10 últimas simulações)	Tempo computação
10	57.50%	0.1583	2
20	57.81%	0.0050	3
50	57.98%	0.0021	6
100	57.20%	3.68×10^{-4}	15
200	57.24%	1.22×10^{-4}	35
300	57.17%	6.38×10^{-5}	70
500	57.18%	5.87×10^{-6}	135



Figura 5.4: Percentagem total de ocorrências cobertas.

Pelos valores da tabela 5.2 e da figura 5.4 pode-se concluir que a partir dos 200 anos o valor da cobertura obtida não varia muito sendo a diferença entre o valor obtido para 200 e para os 500 anos de 0.06 %. Também é possível observar que os valores da variância se aproximam cada vez mais de 0, concluindo-se que a diferença de simulação para simulação

começa a ser residual. Posto isto, pode-se concluir que tanto os 200 anos como os 300 seriam valores aceitáveis para o número de anos a simular. No entanto, dado que para os 500 anos o tempo de simulação é aceitável, utilizaram-se os 500 anos como o número de anos para cada simulação. Valores superiores não foram considerados, uma vez que começavam a implicar tempos de simulação muito grandes.

5.2 Análise dos localizações atuais dos quartéis de bombeiros

5.2.1 Comparação entre os métodos de modelação espacial

Como referido no capítulo 3.4.2 duas abordagens diferentes foram utilizadas para gerar a localização dos incêndios. Na primeira abordagem considerou-se que as localizações que se encontram nas mesmas freguesias têm iguais probabilidades de ocorrer um incêndio, enquanto que na segunda considera-se que estas probabilidades dependem do número de habitantes de cada localização. Na figura 5.5, pode-se observar o número médio de incêndios por ano registados em cada localização quando se aplicam ambas as abordagens no modelo de simulação. Como seria de esperar a zona do concelho do Porto e respetiva área envolvente é onde se registaram mais incêndios o que está em conformidade com os dados utilizados. Esta zona é a zona do distrito onde existe uma maior concentração de quartéis de bombeiros, como se observou na figura 4.1. Ao comparar os dois mapas é de notar que quando se utiliza o método 2 existem várias localizações onde não ocorreram incêndios. Estas localizações correspondem a locais onde não vivem pessoas e como tal o método 2 considera que a probabilidade de existir um incêndio urbano é 0.

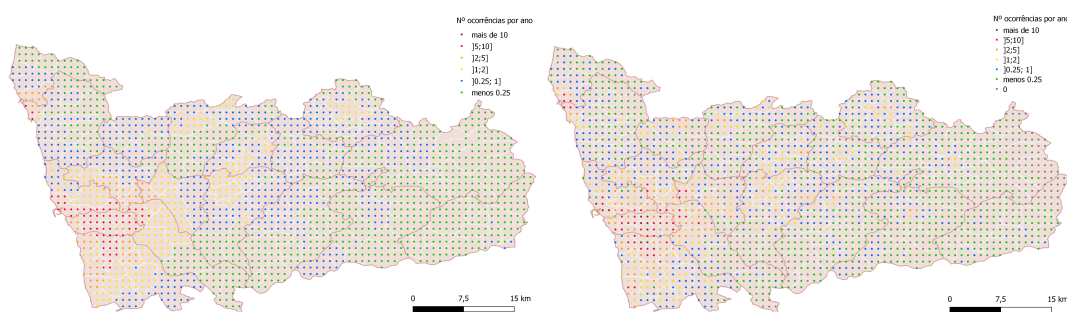


Figura 5.5: Número média de ocorrências em cada localização no distrito do Porto (1ª imagem - 1ª abordagem ; 2ª imagem - 2ª abordagem).

De forma a garantir que as diferenças verificadas na figura anterior estão apenas relacionadas com a forma que os incêndios são distribuídos em cada freguesia, analisou-se se o número de incêndios gerados em cada concelho não se altera quando se usa o método 2 em detrimento do método 1. A tabela 5.3 mostra que tal como se pretendia este número foi igual utilizando ambos os métodos.

Tabela 5.3: Número de incêndios simulados por concelho utilizando o método 1 e 2.

Concelho	Método 1	Método 2
Amarante	18514	18514
Baião	6817	6817
Felgueiras	24412	24412
Gondomar	61381	61381
Lousada	13791	13791
Maia	51032	51032
Marco de Canaveses	18917	18917
Matosinhos	76531	76531
Paços de Ferreira	19685	19685
Paredes	39733	39733
Penafiel	21624	21624
Porto	115514	115514
Póvoa de Varzim	23424	23424
Santo Tirso	22621	22621
Trofa	18686	18686
Valongo	38625	38625
Vila do Conde	29422	29422
Vila Nova de Gaia	151200	151200

De maneira a analisar o impacto dos métodos anteriores na cobertura dos incêndios e a eficácia das localizações dos quartéis de bombeiros no combate aos incêndios urbanos, utilizaram-se as localizações atuais dos quartéis, figura 4.1, e recorreram-se às **regras atuais** para afetar os quartéis às ocorrências, ver capítulo 3.2.

Através da tabela 5.4 pode-se observar que a percentagem de incêndios cobertos em menos de 8 minutos foi de 58.16 % pelo método 1 e de 65.44% pelo método 2. No entanto, 75% das ocorrências são respondidas em menos de nove minutos e meio segundo o método 1 e aproximadamente nove minutos segundo o método 2. Ou seja, para ambos os métodos existem muitas ocorrências que apesar de não serem cobertas no tempo estipulado são respondidas num máximo de um minuto depois. No entanto verifica-se a existência de ocorrências que levaram mais de meia hora a serem atendidas, apesar destes serem casos muito esporádicos, não podem ser ignorados.

É ainda possível observar uma diminuição das estatísticas relacionadas com os tempos de cobertura no método 2. Isto deve-se de no método 2 serem geradas mais ocorrências em localizações que são mais próximas dos quartéis em detrimento de localizações mais afastadas e consequentemente os valores do tempo de cobertura média e dos quartis foi menor. Também se registou uma diminuição do valor de tempo de cobertura máximo, no entanto esta deveu-se a que a localização que originava esse tempo de viagem no método 2 não ser considerada dado que tem 0 habitantes.

Além das percentagens de ocorrências cobertas foi também analisado quais as localizações que se encontram cobertas. Através da figura 5.6 pode-se observar quais as

localizações que foram cobertas verificando-se que a maioria do distrito do Porto não está coberto, apenas 31.66 % segundo o método 1 e 35.12 % segundo o método 2. Porém, ao comparar a figura 5.5 com a figura 5.5, verifica-se que as zonas cobertas correspondem na sua maioria às zonas onde existem mais incêndios, resultando então numa percentagem de incêndios cobertos muito superior à percentagem de localizações cobertas. As localizações cobertas em ambos os métodos são iguais, uma vez que são considerados os mesmos quartéis em ambos os métodos.

Tabela 5.4: Estatísticas do tempo de cobertura em minutos de cada método e cobertura obtida.

	Min.	1º Qu.	Média	3º Qu.	Max.	% de ocorrências cobertas
Método 1	0.05	4.9	7.7	9.5	49.15	58.16 %
Método 2	0.05	4.4	7.1	8.9	34.6	65.44%

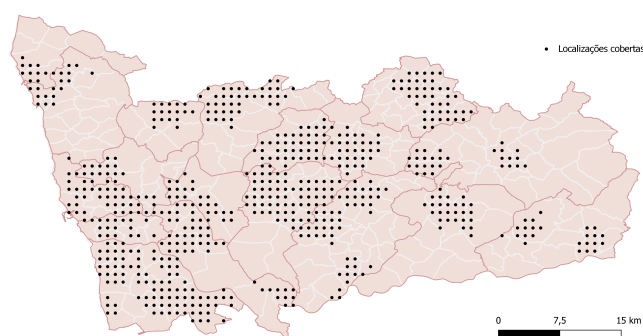


Figura 5.6: Mapa do distrito do Porto com as localizações que são cobertas.

Na tabela 5.5 é exibido para cada método o número de ocorrências que cada quartel de bombeiros respondeu assim como a percentagem de ocorrências cobertas em menos de 8 minutos.

5.2. ANÁLISE DAS LOCALIZAÇÕES ATUAIS DOS QUARTÉIS DE BOMBEIROS

Tabela 5.5: Número de ocorrências e percentagem de ocorrências cobertas de cada quartel em cada método.

Quartel	Método 1		Método 2	
	nº incêndios	% cobertos	nº incêndios	% cobertos
1	11183	22.54%	11192	35.53%
2	7331	40.70%	7322	42.27%
3	3984	17.17%	3994	33.22%
4	2833	34.91%	2823	41.59%
5	18297	48.53%	18236	55.92%
6	6115	72.28%	6176	81.88%
7	18878	68.76%	18385	77.65%
8	13836	68.78%	13933	86.94%
9	4335	39.82%	4238	75.01%
10	1969	33.52%	1816	39.98%
11	22363	81.72%	23009	82.33%
12	13791	50.90%	13791	54.59%
13	28602	38.53%	27551	32.78%
14	22430	37.55%	23481	36.58%
15	18917	36.89%	18917	46.50%
16	14293	76.17%	14293	70.15%
17	31481	63.24%	31642	87.17%
18	7963	100.00%	7802	100.00%
19	22794	66.67%	22794	68.20%
20	8722	88.17%	9244	86.91%
21	10963	75.97%	10441	76.39%
22	6216	95.35%	5793	99.24%
23	3829	59.26%	5041	47.77%
24	8731	75.15%	8812	76.61%
25	10650	74.94%	10808	81.75%
26	10307	73.93%	9279	84.59%
27	3476	27.04%	3554	27.94%
28	6771	60.23%	6566	55.99%
29	11377	51.81%	11504	63.51%
30	31894	53.84%	32165	56.11%
31	83620	55.00%	83349	58.50%
32	23424	38.68%	23424	62.42%
33	7455	63.93%	7452	68.79%
34	2786	95.80%	3502	100.00%
35	12380	54.47%	11667	64.05%
36	18686	38.39%	18686	56.56%
37	21946	77.47%	19995	88.38%
38	16679	37.50%	18630	73.27%
39	29422	52.12%	29422	51.59%
40	16327	43.05%	16348	53.74%
41	15857	60.21%	16800	61.57%
42	31658	61.67%	33597	72.98%
43	25744	54.46%	18997	53.74%
44	9702	87.14%	9132	90.69%
45	51912	73.70%	56326	83.06%

Nota: Na tabela ?? dos anexos é apresentado a que quartel corresponde cada número assim como a sua localização.

Ao analisar a tabela 5.5 é possível reforçar a ideia de que os quartéis se encontram próximos das populações, uma vez que na maioria dos quartéis a percentagem de ocorrências cobertas é maior no método 2. Apenas o quartel 23 apresenta uma diminuição significativa na percentagem, cerca de 11.5%. Pela tabela 5.5 também se pode verificar que existem vários quartéis que apresentam uma percentagem de ocorrências cobertas inferiores a 50%. Apesar de alguns apresentarem valores próximos de 50%, existem quartéis que independentemente do método apresentam percentagens muito baixas, os quartéis 1, 3, 13, 14 e 27. Posto isto, pode-se concluir que a localização destes quartéis não é a melhor sendo provavelmente possível determinar melhores localizações para estes quartéis de modo que consigam cobrir um maior número de ocorrências. Analisando o número de ocorrências a que cada quartel respondeu, verifica-se que existem quartéis que tiveram uma média inferior a 10 ocorrências respondidas por ano. A maioria destes quartéis encontram-se em

concelhos com poucas ocorrências, como é o caso do quartel 4 que está localizado em Baião. No entanto, existem outros quartéis, como o 10 e 27, que se encontram em concelhos com mais casos e, além de registarem uma média de ocorrências respondidas baixa, também apresentam uma baixa percentagem de ocorrências cobertas. Por outro lado, existem quartéis que respondem a poucas ocorrências por se encontrarem na mesma freguesia de outro quartel, como são os casos dos quartéis 9 e 34. Posto isto decidiu-se analisar o impacto resultante de retirar os quartéis 9, 10, 27 e 34. Para tal realizaram-se 4 simulações em que em cada uma se retirou um quartel. A tabela 5.6 mostra os valores obtidos das estatísticas relativas aos tempos de viagem e a percentagem de ocorrências cobertas. Na tabela 5.7 é apresentado o número de localizações cobertas pelo quartel retirado assim como o respetivo tempo médios de viagem, com e sem o quartel em análise.

Tabela 5.6: Estatísticas do tempo de cobertura, em minutos, e cobertura obtida sem os quartéis em estudo utilizando o método 2.

	Min.	1º Qu.	Média	3º Qu.	Max.	ocorrências cobertas
Sem o 9	0.05	4.4	7.12	8.9	34.6	65.02%
Sem o 10	0.05	4.4	7.13	8.9	34.6	65.34%
Sem o 27	0.05	4.4	7.14	8.9	40.97	65.31%
Sem o 34	0.05	4.4	7.11	8.9	34.6	65.44%

Tabela 5.7: Número de localizações respondidas pelos quartéis em análise e tempos médios de viagem para as localizações com e sem o quartel em análise obtidas utilizando o método 2.

Quartel	nº localizações	Tempo med. c quartel	Tempo med. s quartel
9	5	9.32	10.9
10	25	9.98	20.4
27	45	11.09	20
34	6	4.49	6.33

Pelas tabelas 5.6 e 5.7 pode-se observar que os quartéis 10 e 27 apesar de terem pouco impacto na percentagem de ocorrências cobertas, estes têm um grande impacto nos tempos de viagem para localizações que são responsáveis. Por outro lado, quando se retira o quartel 34 a diminuição da percentagem de ocorrência cobertas é praticamente inexistente e apesar de existir um ligeiro aumento no tempo médio de viagem, este mantém-se abaixo dos 8 minutos. Quando não se considera este quartel apesar do tempo de resposta ser ligeiramente superior, as ocorrências continuam a estar cobertas. Ao analisar o quartel 9, observa-se que este apesar de apresentar a maior diminuição na percentagem de ocorrências coberta, regista o menor aumento no tempo médio de viagem. Dado isto, decidiu-se analisar o impacto que retirar este quartel teve em cada localização pelo qual é responsável. Através dos resultados apresentados na tabela 5.8 verifica-se que mais de 50% das ocorrências ocorreram na localização 563 e que esta localização não se encontra coberta por apenas 4 segundos. Caso estas ocorrências sejam consideradas como

5.2. ANÁLISE DAS LOCALIZAÇÕES ATUAIS DOS QUARTÉIS DE BOMBEIROS

cobertas, ter-se-ia 65.34% das ocorrências cobertas que é um valor muito próximo do que se obtém quando se inclui o quartel 9.

Os resultados apresentados nas tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 foram simulados apenas recorrendo ao método 2, uma vez que utilizando o método 1 obter-se-ia resultados análogos.

Tabela 5.8: Número de ocorrências em cada localização e tempos de viagem para cada localização com e sem o quartel 9, utilizando o método 2.

Localização	nº ocorrências	Temp méd. de viagem c quartel	Temp méd. de viagem s quartel
580	422	13.23	13.27
563	2409	4.90	8.07
575	436	11.18	11.38
567	770	6.70	9.02
564	201	10.55	12.75

Em suma, é possível verificar que ao utilizar-se o método 2 a percentagem de ocorrências cobertas é significativamente maior, sendo de 65.44% enquanto quando se recorre ao método 1 é de 58.16%. Como foi possível verificar, esta diferença deve-se à maior probabilidade de existirem ocorrências em localizações com mais habitantes, em conjunto com o facto de os quartéis, por norma, se encontrarem mais próximos destas localizações. Além disto, no método 2 em zonas onde não existam pessoas, que na sua maioria são zonas com tempo de viagem altos, não são gerados incêndios. Também foi possível concluir que a localização de alguns quartéis aparenta não ser a mais adequada no combate aos incêndios urbanos, uma vez que apresentam uma percentagem de ocorrências cobertas muito reduzida. Verificou-se ainda que o quartel 34 não aparenta ter um grande impacto na percentagem de ocorrências cobertas nem no tempo de resposta aos incêndios urbanos. O quartel 9 apesar de aparentar ter impacto na percentagem de ocorrências cobertas, observou-se que este impacto não é assim tão expressivo como aparenta, uma vez que a maioria das ocorrências não é coberta por uma diferença de 4 segundos. Aos considerarmos estas ocorrências como cobertas obter-se-ia praticamente o mesmo número de ocorrências cobertas e apenas pequenas diferenças nos tempos de viagem nas ocorrências que não estão cobertas.

Apesar dos resultados obtidos, não é possível afirmar com certeza qual dos métodos melhor representa o que acontece na realidade, uma vez que como referido anteriormente não existem dados que nos permitam comparar com os resultados obtidos quer a nível da cobertura obtida quer a nível das localizações das ocorrências. Posto isto, decidiu-se utilizar ambos os métodos nas análises feitas relativamente às localizações atuais dos quartéis de bombeiros. Nas restantes análises apresentadas utilizou-se apenas o segundo método, uma vez que correr ambos os métodos era computacionalmente muito moroso e dadas a vantagens e desvantagens de ambos os métodos presentes na tabela 5.9 acredita-se que este é o método mais completo.

Tabela 5.9: Vantagens e desvantagens de cada método.

	Vantagens	Desvantagens
Método 1	- Fácil de utilizar - Não ignora possíveis localizações	- Considera localizações impossíveis (florestas, rios, lagos, etc) - Localizações equiprováveis
Método 2	- Localizações com diferentes probabilidades - Ignora localizações impossíveis	- Exatidão do nº de habitantes em cada localização - Ignora possíveis localizações (zonas industriais e restauração onde não existam habitações)

5.2.2 Análise do tempo limite de resposta

Como foi possível observar quando se analisou o quartel 9 algumas ocorrências podem não ser consideradas cobertas por apenas alguns segundos. Com vista a estudar estes casos, analisou-se o impacto que teria uma alteração ligeira no tempo limite de chegada ao local dos incêndios, na cobertura obtida. Consideraram-se novos tempos de 8 minutos e 10, 20 e 30 segundos. Os resultados obtidos considerando os novos tempos em cada um dos métodos são apresentados na tabela 5.10. Através desta pode-se observar que a influência varia consoante o método utilizado. No método 1 existe um aumento de cerca de 2% entre cada tempo analisado. No método 2 o aumento não é constante tendo-se verificado aumentos de cerca de 1%, 3% e 2% para os 8 minutos e 10, 20 e 30 segundos respetivamente.

Tabela 5.10: Percentagem de ocorrências cobertas para os novos tempos estabelecidos.

	8:10	8:20	8:30
Método 1	60.17%	62.92%	64.86%
Método 2	66.86%	69.41%	71.09%

Apesar dos aumentos verificados estes são muito pequenos e têm pouca expressão no total de incêndios urbanos cobertos em cada ano. Consequentemente apesar de um incêndio que tenha sido coberto num tempo entre os 8 minutos e os 8 minutos 10 poder ser considerado como coberto, estes representam uma percentagem muito baixa do total de incêndios verificados. Nos restantes tempos de o número de incêndios ser um bocado superior continua a ser uma percentagem muito reduzida. Tempos maiores não foram considerados, uma vez que seriam muito superiores aos 8 minutos pretendidos. Além disso, o facto de se usar pontos para representar uma área origina que exista um erro associado às zonas cobertas e, como tal, utilizar tempos maiores faria aumentar este erro. Estes erros devem-se ao facto de ser considerado o mesmo tempo de viagem para todas as zonas estabelecidas anteriormente utilizando a grelha.

5.2.3 Comparação entre as regras de afetação dos quartéis

Como referido nas secções anteriores as atuais regras de afetação dos quartéis aos incêndios podem não ser as mais eficazes, uma vez que poderá haver quartéis que se encontram mais próximos dos incêndios mas não são chamados devido às regras existentes. No entanto alterar estas regras que já estão estabelecidas pode ser complicado uma vez

que os quartéis de bombeiros não pertencem ao Estado. Como tal duas regras foram estabelecidas uma com menos alterações, a **Regra Intermédia**, e outra que se espera que seja mais eficiente, mas que implica mais alterações, a **Regra do quartel mais próximo**. A descrição de ambas as regras encontra-se no capítulo 3.2.

Com o intuito de se perceber de que modo é que estas regras impactam o tempo de resposta dos bombeiros aos incêndios urbanos, realizaram-se novas simulações utilizando as novas regras de afetação. As simulações foram realizadas para ambos os métodos de geração da localização dos incêndios. Os resultados obtidos para a percentagem de ocorrências cobertas e para as estatísticas (mínimo, 1º quartil, média, 3º quartil e máximo) relativas aos tempos de viagem obtidos são apresentados na tabela 5.11 para a **Regra Intermédia** e na tabela 5.12 para a **Regra do quartel mais próximo**.

Tabela 5.11: Estatísticas do tempo de cobertura em minutos e cobertura obtida (**Regra Intermédia**).

	Min.	1º Qu.	Média	3º Qu.	Max.	% de ocorrências cobertas
Método 1	0.05	4.86	7.60	9.30	49.15	61.61%
Método 2	0.05	4.38	6.99	8.75	34.6	69.06%

Tabela 5.12: Estatísticas do tempo de cobertura em minutos e cobertura obtida (**Regra do quartel mais próximo**).

	Min.	1º Qu.	Média	3º Qu.	Max.	% de ocorrências cobertas
Método 1	0.05	4.73	7.10	8.80	49.15	67.8 %
Método 2	0.05	4.33	6.56	8.18	34.6	74.21%

Como se esperava, ao aplicar as novas regras de afetação, obtiveram-se menores tempos de resposta e, como tal, uma melhor cobertura. Ao utilizar-se a **Regra do quartel mais próximo** deu-se uma melhoria de cerca de 9 % na percentagem de ocorrências cobertas. Ao aplicar-se a **Regra Intermédia** também se verificou um aumento, no entanto este foi significativamente menor sendo de apenas 3.5%. Independentemente do método utilizado, os aumentos relativo às **Regras atuais** são praticamente iguais, logo pode-se concluir que o impacto das regras de afetação não depende dos métodos de geração das localizações utilizados.

Pela figura 5.7 verifica-se que a área coberta não se alterou muito com a utilização das novas regras e esta continua a ser muito inferior a percentagem de ocorrências cobertas. Ao usarmos a **Regra do quartel mais próximo** obtém-se uma área coberta ligeiramente superior à verificada anteriormente, registando um aumento de cerca de 5%. Por outro, lado quando se recorre a **Regra Intermédia** a diferença é praticamente nula.

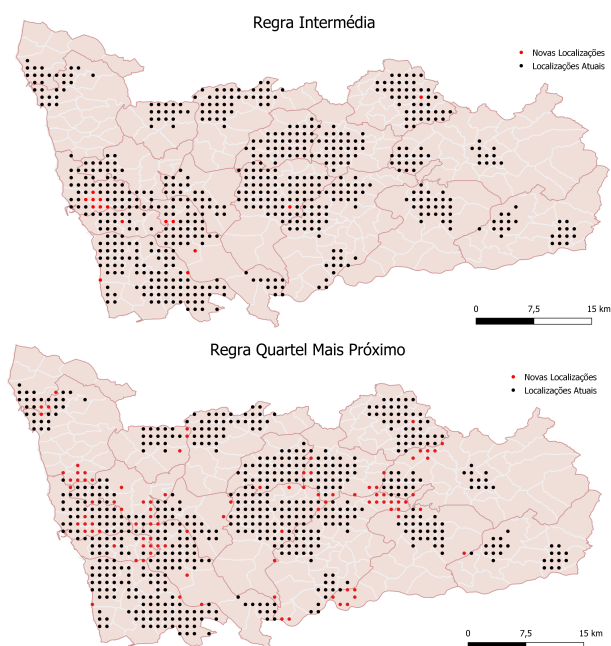


Figura 5.7: Mapa do distrito do Porto com as localizações que são cobertas utilizando as novas regras comparativamente às atuais.

O impacto que as novas regras têm em cada quartel é mostrado na tabela 5.13. É possível observar que, comparativamente à tabela 5.5, não existem muitas alterações na percentagem de ocorrências cobertas quando aplicada a **Regra Intermédia**. O mesmo não se verifica quando se aplica a **Regra do quartel mais próximo** em que em todos os quartéis se registaram alterações na percentagem de ocorrências cobertas, assim como no número de ocorrências que cada quartel atendeu. Estas alterações resultaram numa menor quantidade de quartéis com percentagem de incêndios cobertos muito baixas. Apenas os quartéis 3 e 27 apresentam valores inferiores a 40% em ambos os métodos, enquanto os quartéis 4 e 10 apresentam valores inferiores a 40 % apenas quando aplicado o método 1.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que é possível aumentar significativamente a eficiência dos quartéis de bombeiros nos combates aos incêndios urbanos se as atuais regras de afetação forem alteradas e aplicada a **Regra do quartel mais próximo**. Por outro lado a **Regra Intermédia** resulta em um aumento ligeiro na percentagem de ocorrências cobertas. No entanto, para aplicar esta regra seria apenas necessário mudar ligeiramente as jurisdição de metade dos quartéis enquanto que para aplicar a outra regra ter-se-ia de alterar a jurisdição de todos os quartéis.

Tabela 5.13: Número de ocorrências e percentagem de ocorrências cobertas de cada quartel em cada método utilizando a novas regras.

Quartel	Regra Intermédia				Regra do quartel mais próximo			
	Método 1		Método 2		Método 1		Método 2	
	nº incêndios	% cobertos	nº incêndios	% cobertos	nº incêndios	% cobertos	nº incêndios	% cobertos
1	11183	22.54%	11192	35.53%	9229	27.32%	9626	41.30%
2	7331	40.70%	7322	42.27%	8129	60.79%	8149	64.39%
3	3920	17.45%	3994	33.22%	4253	17.61%	3980	34.22%
4	2897	34.14%	2823	41.59%	2971	33.29%	2864	40.99%
5	17125	51.85%	17420	58.54%	15775	56.29%	16114	63.29%
6	7287	68.57%	6992	76.52%	11638	52.32%	11189	63.63%
7	23257	63.24%	20202	80.06%	24352	58.94%	19414	81.94%
8	13421	93.80%	14799	97.31%	13421	93.80%	14799	97.31%
9	3458	49.91%	3816	83.31%	8756	80.22%	7628	91.65%
10	1969	33.52%	1816	39.98%	2158	38.79%	2043	44.54%
11	19276	94.81%	20748	91.31%	33210	96.99%	34079	94.71%
12	13791	50.90%	13791	54.59%	11785	55.39%	11574	61.34%
13	28602	38.53%	27551	32.78%	19648	51.91%	19592	54.26%
14	22430	37.55%	23481	36.58%	12538	91.97%	14098	91.22%
15	18917	36.89%	18917	46.50%	14566	47.91%	14349	61.30%
16	7525	100.00%	7128	100.00%	26536	64.31%	24412	54.77%
17	31481	63.24%	31642	87.17%	30755	65.22%	31494	87.83%
18	21483	100.00%	20825	100.00%	21158	89.55%	20264	91.61%
19	16042	100.00%	16936	100.00%	13479	100.00%	12789	100.00%
20	8722	88.17%	9244	86.91%	11195	77.81%	11489	77.72%
21	10963	75.97%	10441	76.39%	9769	79.13%	9013	85.29%
22	7484	90.62%	6344	98.80%	7333	92.49%	6301	99.48%
23	3445	65.86%	4796	50.21%	3496	76.06%	4566	58.61%
24	9342	76.77%	9425	78.13%	13239	64.97%	12435	67.28%
25	9766	76.90%	10502	81.52%	8199	86.12%	9789	84.42%
26	9696	72.29%	8666	83.50%	9085	79.63%	9891	76.02%
27	3476	27.04%	3554	27.94%	6773	26.64%	7363	27.29%
28	6771	60.23%	6566	55.99%	6611	56.80%	6794	51.13%
29	11377	51.81%	11504	63.51%	11812	67.30%	10962	79.96%
30	17244	57.31%	13072	67.09%	21387	46.21%	16581	52.89%
31	98270	61.71%	102442	66.23%	84143	76.33%	91277	79.05%
32	23424	38.68%	23424	62.42%	7356	65.51%	11813	81.97%
33	7455	63.93%	7452	68.79%	7148	66.68%	7174	71.45%
34	2786	95.80%	3502	100.00%	4277	84.29%	4105	87.94%
35	12380	54.47%	11667	64.05%	11308	59.63%	9993	74.78%
36	18686	38.39%	18686	56.56%	17214	41.67%	19019	55.57%
37	21946	77.47%	19995	88.38%	27837	75.06%	27503	81.05%
38	16679	37.50%	18630	73.27%	15645	48.07%	17888	78.39%
39	29422	52.12%	29422	51.59%	38872	63.41%	34230	63.10%
40	16967	48.32%	17458	55.54%	16967	48.32%	17458	55.54%
41	15241	62.64%	16560	62.46%	15241	62.64%	16560	62.46%
42	33369	58.51%	34476	71.12%	33369	58.51%	34476	71.12%
43	23393	59.93%	17008	60.02%	23393	59.93%	17008	60.02%
44	10318	87.90%	9372	90.93%	11313	80.69%	10253	83.83%
45	51912	73.70%	56326	83.06%	44590	82.64%	49531	88.90%

5.3 Impacto da regressão linear

Como referido anteriormente no capítulo 3.4.3, não foi possível utilizar as *Google Maps API's* para determinar os tempos de viagem entre as novas localizações e os locais dos incêndios. Como tal, recorreu-se à regressão linear para relacionar a distância euclidiana com a distância real, ver capítulo 3.4.3. Calculadas as distâncias, foi necessário determinar a velocidade média a utilizar de modo a obter-se os tempos de viagem pretendidos. Uma vez que não existem dados sobre a velocidades, na base de dados disponibilizada, realizaram-se várias simulações com diferentes velocidades. Os resultados obtidos através destas simulações foram comparados com os resultados apresentados anteriormente de modo a determinar que velocidade se ajusta melhor. Em primeiro lugar testou-se 30 km/h dado que foi a velocidade utilizada no modelo de simulação, no entanto como mostra a tabela 5.14, esta apresenta uma percentagem de ocorrências cobertas inferior à pretendida. Testou-se então 35 km/h, que resulta, no entanto, numa percentagem superior

à pretendida. Sendo que o valor pretendido se encontra entre os valores utilizados, 30 e 35 km/h foi testado uma velocidade de 32.5 km/h, obtendo-se então um valor muito perto do valor determinado nas secções anteriores. Nos testes realizados foi utilizado o método 2 em conjunto com as **Regras Atuais** para a afetação dos quartéis às ocorrências, como tal pretendia-se obter um valor de ocorrências cobertas perto dos 65%.

Tabela 5.14: Estatísticas do tempo de cobertura em minutos e percentagem de ocorrências cobertas.

Vel	Mín.	1º Qu.	Média	3º Qu.	Max.	% de ocorrências cobertas
30 km/h	0.24	3.53	8.13	10.5	55.15	60.74%
32.5 km/h	0.23	3.26	7.5	9.7	50.82	64.99%
35 km/h	0.21	3.03	6.97	9	47.2	68.55%

Comparando os valores obtidos na tabela 5.14 com os valores da tabela 5.4, observa-se que relativamente às estatísticas relativas ao tempo de viagem a velocidade de 35 km/h é a que origina melhores valores. No entanto a cobertura é superior à que se obteve utilizando os tempos de viagem reais. Tal como referido anteriormente, a velocidade de 32.5 km/h apresenta uma cobertura mais semelhante à pretendida, estas diferem em menos de 0.5%. Dado que neste trabalho tem como principal objetivo analisar os incêndios cobertos consoante as localizações dos quartéis, estabeleceu-se 32.5 km/h como a velocidade a utilizar nas análises às novas localizações.

Estabelecida a velocidade média a utilizar, analisou-se o impacto que esta tem em cada quartel e na localizações que estão cobertas. Este impacto pode ser avaliado através da tabela 5.15 e da figura 5.8. A tabela 5.15 mostra o número de ocorrências atendidas e a percentagem de ocorrências cobertas em cada quartel usando os novos tempos. A figura 5.8 mostra as localizações cobertas e não cobertas no distrito do Porto.

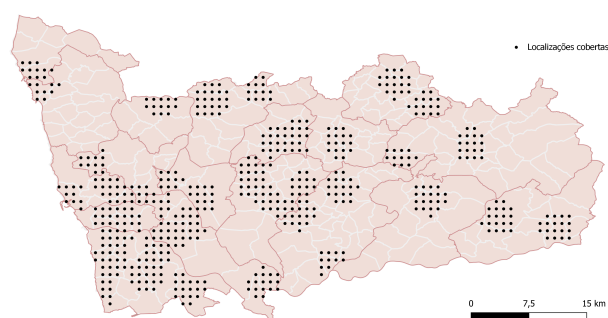


Figura 5.8: Mapa do distrito do Porto com as localizações que são cobertas.

Tabela 5.15: Número de ocorrências e percentagem de ocorrências cobertas de cada quartel.

Quartel	nº incêndios	% cobertos
1	12622	44.56%
2	5892	47.22%
3	3996	39.79%
4	2821	53.67%
5	18816	47.50%
6	5596	70.41%
7	17254	71.40%
8	13037	80.95%
9	5777	100.00%
10	2010	43.58%
11	23303	90.75%
12	13791	36.63%
13	17874	42.07%
14	33158	34.28%
15	18917	41.57%
16	14430	69.48%
17	31470	76.02%
18	7837	78.00%
19	22794	68.20%
20	7926	87.71%
21	11759	57.04%
22	7031	69.58%
23	2708	73.52%
24	8766	77.01%
25	10854	61.77%
26	10374	68.41%
27	3804	23.48%
28	6118	49.46%
29	11702	57.16%
30	73154	71.47%
31	42360	78.53%
32	23424	62.85%
33	7120	61.40%
34	6638	69.43%
35	8863	72.21%
36	18686	54.66%
37	19862	89.46%
38	18763	63.03%
39	29422	48.69%
40	17268	65.38%
41	19894	63.70%
42	26048	67.08%
43	18997	92.90%
44	9935	50.84%
45	59058	68.73%

Apesar de ao se utilizar uma velocidade de 32.5 km/h ter-se mantido a mesma percentagem de ocorrências cobertas, verificou-se através da figura 5.8 que utilizando a regressão linear para determinar os tempos de viagem se obteve uma menor cobertura, 31.17%. Verificou-se ainda que as localizações cobertas se alteram ligeiramente, existindo um total de 471 localizações cobertas em comum com as apresentadas na figura 5.6. Pela tabela 5.15 pode-se verificar que os valores determinados utilizando este método são consideravelmente diferentes dos determinados anteriormente na tabela 5.5.

As diferenças verificadas podem estar relacionadas com o facto de a regressão linear não ser a mais adequada, uma vez que os resíduos não seguem uma distribuição normal ou pelo facto de se assumir para todas as viagens a mesma velocidade média. No entanto, uma vez que estas diferenças não foram significativas ao ponto de alterarem a cobertura total das ocorrências, e uma vez que os métodos anteriores não foram devidamente validados devido a inexistência de dados, recorreu-se à função obtida pela regressão linear e a uma velocidade média de 32.5 km/h para analisar as novas localizações dos quartéis de bombeiros.

5.4 Análise de novas localizações utilizando Modelos de otimização

Como é possível observar pelos resultados apresentados nos capítulos anteriores, com as localizações atuais dos quartéis não é possível obter uma percentagem de ocorrências cobertas superior a 65.44 % utilizando as **Regras atuais** e mesmo utilizando novas regras de afetação a percentagem obtida foi no máximo de 74.21%. Dado isto, foi realizado um trabalho, em paralelo com este, onde se determinaram novas localizações para os quartéis de bombeiros com recurso a modelos de otimização, com o objetivo de maximizar a cobertura em caso de incêndios urbanos. Este capítulo tem como objetivo utilizar o modelo de simulação implementado para analisar as novas localizações obtidas pelos modelos de otimização de modo a fornecer informações para que este possa ser ajustado.

Dois modelos de otimização foram utilizados para determinar as localizações. O primeiro modelo de otimização tem como objetivo minimizar o número de quartéis necessários de modo que pelo menos 90% dos incêndios estejam cobertos. O segundo modelo de otimização surge na sequência dos resultados obtidos através do primeiro modelo, e pretende maximizar o número de incêndios cobertos dado um número específico de quartéis, que provém do primeiro modelo de otimização. No restante trabalho o primeiro modelo foi denotado como modelo de minimização e o segundo como modelo de maximização.

Ao contrário do que foi feito neste trabalho em que se utilizou uma grelha para dividir o distrito do Porto, no trabalho onde os modelos de otimização foram implementados o distrito do Porto foi dividido por freguesias. Cada freguesia é representada por um ponto correspondente. Os pontos utilizados estão representados no mapa da figura 5.5. Cada ponto é definido pelo seu concelho, freguesia e coordenadas geográficas além de estar associado a um número como mostra a tabela I.1 dos anexos. As distâncias entre cada freguesia foram determinadas utilizando as *Google Maps Apis* e foi estabelecida uma velocidade média de 30 km/h para determinar o tempo de viagem entre as freguesias. As localizações dos pontos utilizados para representar cada freguesia foram também utilizadas como as possíveis localizações dos quartéis nos modelos de otimização.

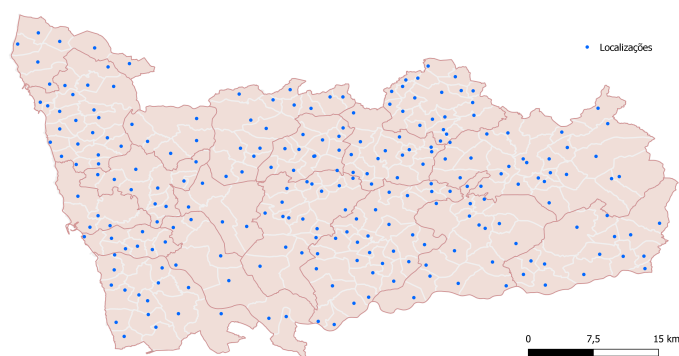


Figura 5.9: Mapa com as localizações utilizadas nos modelos de otimização.

5.4.1 Modelo de minimização

Como referido anteriormente, o modelo de minimização tem como objetivo determinar o número mínimo de quartéis e as suas localizações de modo a garantir uma percentagem de ocorrências cobertas de pelo menos 90%. Foram então considerados quatro cenários no trabalho realizado sobre os modelos de otimização:

- O primeiro cenário considera o caso de não existir qualquer quartéis;
- No segundo cenário são considerados todos os quartéis já existentes e pretende-se determinar as localizações em que é necessário construir quartéis para que se obtenha a percentagem de ocorrências cobertas pretendida;
- O cenário 3 é um aprimoramento do cenário 2 uma vez que este com base nos resultados obtidos pelo cenário 2 verifica quais os quartéis que se podem excluir de modo a manter uma cobertura de 90%;
- Por fim, no cenário 4 além das novas localizações as atuais localizações dos quartéis de bombeiros foram consideradas como possíveis localizações. No entanto é dada prioridade à "construção" de quartéis nas localizações onde já existam.

As localizações provenientes do modelo de minimização para cada cenário são apresentadas na figura 5.10. As novas localizações estão marcadas a azul enquanto as localizações atuais dos quartéis estão marcadas a vermelho. As tabelas I.2 I.3 I.4 e I.5 dos anexos contêm as localizações provenientes do modelo de minimização para cada cenário.

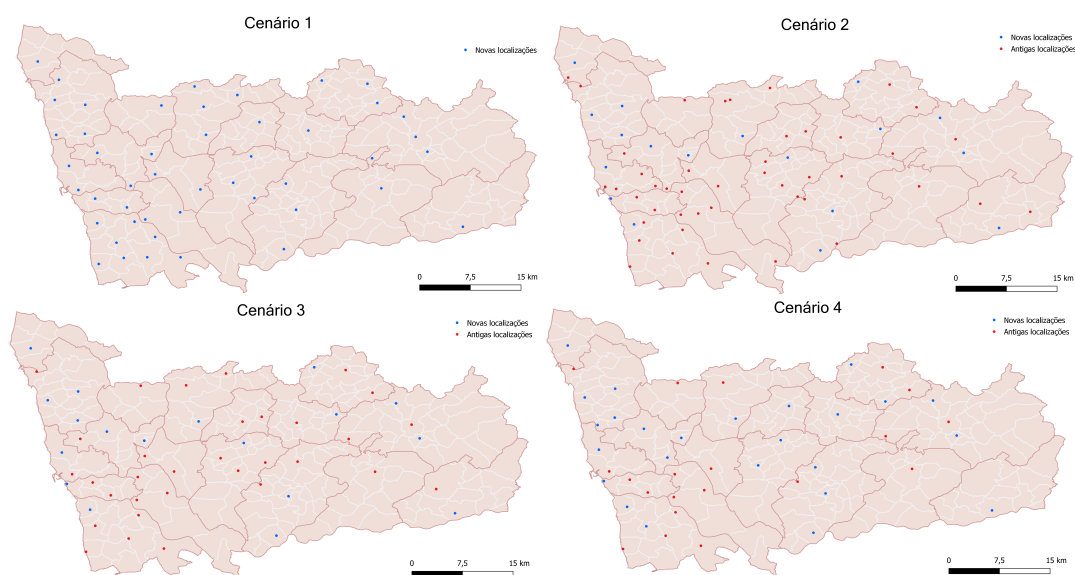


Figura 5.10: Mapa das novas localizações determinadas pelo modelo de minimização para cada cenário.

5.4.2 Modelo de maximização

Com base nos resultados obtidos ao se utilizar o modelo de minimização, recorreu-se então ao modelo de maximização para determinar a cobertura máxima para cada cenário apresentado sem aumentar o número de quartéis anteriormente determinados. A figura 5.11 mostra as localizações determinadas utilizando o modelo de maximização. Tal como nos modelos de minimização, nas tabelas I.6, I.7, I.8 e I.9 dos anexos estão presentes as localizações provenientes do modelo para cada cenário.

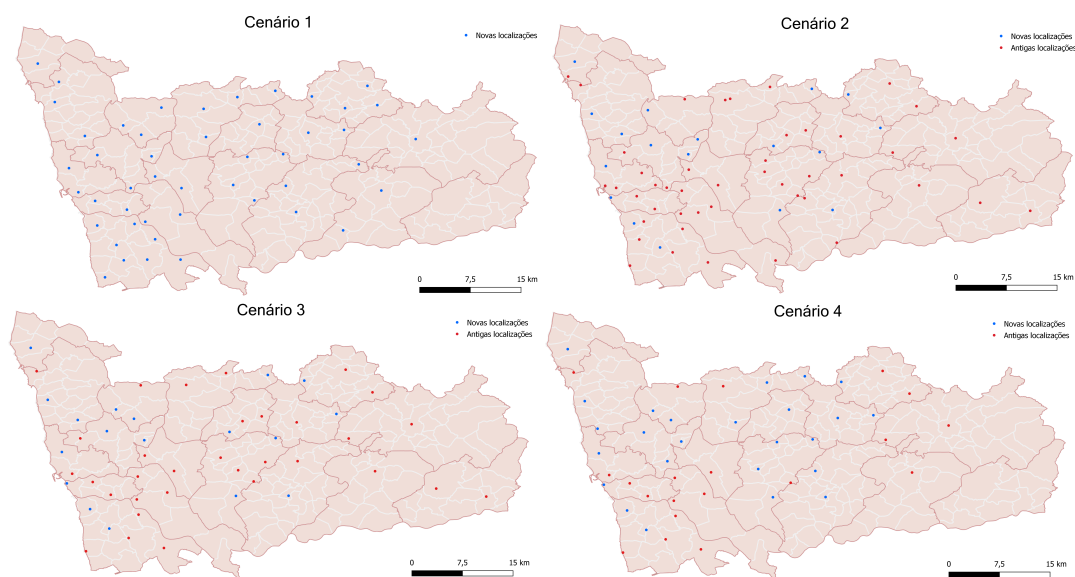


Figura 5.11: Mapa das novas localizações determinadas pelo modelo de maximização para cada cenário.

As novas localizações para os quartéis de bombeiros foram utilizadas no modelo de simulação utilizando o método 2 para a geração das ocorrências e as regras atuais para a afetação dos quartéis. A tabela 5.16 mostra os resultados atingidos para a percentagem de incêndios cobertos para cada cenário em cada um dos modelos. Pela mesma verifica-se que independentemente do cenário e do modelo o número de ocorrências cobertas está muito longe dos 90% que se pretendia obter. Além disso as percentagens obtidas foram na sua maioria menores ou iguais às obtidas com as localizações atuais isto mesmo utilizando um número de quartéis superior ou igual aos atuais 45 quartéis de bombeiros. O único cenário em que se obteve resultados melhores foi utilizando as localizações provenientes do cenário 2. Contudo é de notar que neste cenário são utilizados todos os 45 quartéis e ainda 18 novos quartéis, no entanto, a percentagem de ocorrências cobertas aumentou apenas 5 % comparativamente à obtida usando apenas os 45 quartéis atuais. Ou seja, apesar de terem sido introduzidos um total de 18 novos quartéis apenas verificou-se um aumento muito ligeiro na cobertura. Além do mais, ao comparar os resultados obtidos pelos dois modelos é possível verificar que apenas nos cenários 1 e 4 se deu um ligeiro aumento do número de ocorrências cobertas quando se utilizaram os resultados do modelo de maximização, ao invés dos resultados do modelo de minimização. Pelo contrário nos

cenários 2 e 3 verificou-se uma ligeira diminuição.

Tabela 5.16: Percentagem de ocorrências cobertas para cada cenário em cada modelo.

Modelo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Minimização	59.86%	70.78%	60.23%	53.28%
Maximização	60.84%	70.52%	57.85%	54.97%

Em seguida são apresentados os fatores que podem ter conduzido a que os resultados obtidos sejam diferentes dos pretendidos. Os fatores foram divididos em dois tipos: os fatores relacionados com o modelo de simulação e os fatores relacionados com o modelo de otimização.

- **Fatores relacionados com o modelo de simulação**

Como vimos anteriormente no capítulo 5.1, o modelo não foi devidamente validado e como tal não é possível afirmar com certeza que os resultados da cobertura obtida correspondem a cobertura real. No entanto seria de esperar que o número de ocorrências cobertas utilizando as localizações provenientes dos modelos de otimização fossem muito superiores aos obtidos utilizando as localizações atuais o que não se verifica com exceção do cenário 2 que utiliza todos os quartéis.

Outro fator que pode impactar na diferença entre os resultados obtidos e os esperados é o facto de o modelo de otimização utilizar as *Google Maps Apis* para determinar as distâncias entre os pontos, enquanto no modelo de simulação recorremos à equação 3.3 determinada com recurso a uma regressão linear, que como referido no capítulo 5.3, poderá não ser a mais adequada.

- **Fatores relacionados com o modelo de otimização**

Como foi anteriormente referido no estudo quando se utilizaram os modelos de otimização, o distrito do Porto foi dividido em freguesias e estas são representadas apenas por um ponto, resultando que o modelo considere que todas as ocorrências que ocorrem numa freguesia estejam cobertas se o tempo de viagem para estes pontos for menor do que oito minutos. No entanto, quando se utiliza o modelo de simulação é possível verificar que este pressuposto não é verdadeiro. Através da figura 5.6 verifica-se que segundo o modelo de simulação existem freguesias que têm zonas cobertas e descobertas, ou seja não é suficiente uma localização da freguesia estar coberta para que toda a freguesia esteja coberta. Outro possível problema é que as localizações consideradas em cada freguesia não correspondem ao centro das mesmas, como é possível ver na figura 5.9. Isto faz com que existam locais nas freguesias que são muito distantes da localização que está a representar a freguesia e, mais uma vez, estes pontos apesar de os modelos de otimização considerarem que estas localizações estão cobertas, o mesmo não se verifica quando se recorre ao modelo de simulação.

Uma possível solução para estes problemas seria utilizar uma grelha como a utilizada neste trabalho. Outra solução poderia passar pela introdução de mais possíveis localizações em cada freguesia.

Um outro fator que pode originar as diferenças entre os resultados obtidos pelo dois modelos é o facto de nos modelos de otimização não se teve em conta que existem regras de afetação dos quartéis aos incêndios. Como tal, os modelos de otimização consideram que não existem restrições entre as localizações dos quartéis e das ocorrências é então o quartel mais perto que responde à ocorrência. Isto é, foi utilizada a **regra do quartel mais próximo** nos modelos de otimização. De modo a entender que impacto é que tem este fator nos resultados, realizaram-se novas simulações para as localizações obtidas através dos modelos de minimização e maximização utilizando desta vez a mesma regra de afetação dos quartéis que é utilizada nos modelos de otimização. Na figura 5.12 compara-se as percentagens das ocorrências cobertas obtidas em ambos os modelos. Contrariamente ao verificado anteriormente a percentagem de ocorrências cobertas aumentou em todos os cenários quando se utilizaram as localizações provenientes do modelo de maximização. No entanto a percentagem de ocorrências cobertas continua a não ser muito superior à obtida anteriormente quando usadas as mesmas regras de afetação e com exceção do cenário 2 estas estão distantes dos 90% pretendidos. Contudo em alguns dos cenários é evidente o impacto que este fator tem na percentagem de ocorrências cobertas, sendo que se verificaram diferenças de 20% nas percentagens obtidas utilizando as diferentes regras de afetação dos bombeiros. Como tal deveriam ser acrescentadas restrições aos modelos de otimização de modo que as regras de afetação sejam respeitadas pelos mesmos.

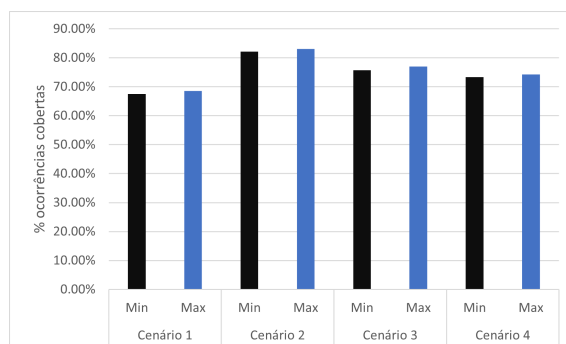


Figura 5.12: Percentagem de incêndios cobertos em cada cenário para os modelos de minimização e maximização utilizando a Regra do quartel mais próximo

Com base nos resultados obtidos e nas análises feitas pode-se afirmar que os modelos de otimização não providenciam localizações melhores do que as atuais localizações. Como tal estes modelos precisam de ser revistos de modo a conseguirem proporcionar melhores localizações para os quartéis de bombeiros.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, implementou-se um modelo de simulação que permitiu modelar o processo de funcionamento dos quartéis de bombeiros quando ocorre um incêndio urbano. Através deste modelo analisaram-se as atuais localizações dos quartéis do distrito do Porto. Como seria de esperar dado que não existiu nenhum estudo para a construção destes quartéis, verificou-se que as atuais localizações encontram-se longe de ser as ideais.

Com as atuais localizações estimou-se que apenas 65% dos incêndios sejam cobertos em pelo menos 8 minutos, o tempo máximo de resposta aceitável considerado neste trabalho. Apesar desta percentagem de ocorrências cobertas determinou-se que em mais de 65% do distrito não é possível atender as ocorrências no tempo estipulado, existindo mesmo algumas localizações em que o tempo de resposta estimado é superior a meia hora. No entanto, as zonas onde há mais ocorrências encontram-se na sua maioria cobertas. Conclui-se ainda que existem quartéis que podiam ser fechados, uma vez que estes têm um impacto muito pequeno na cobertura das ocorrências. Verificou-se também a necessidade de alterar as localizações de certos quartéis, uma vez que apresentam uma percentagem de incêndios cobertos reduzida e como tal é de esperar que existam melhores localizações para estes quartéis. Além destas análises às localizações verificou-se ainda que alterando as regras de alocação dos quartéis aos incêndios é possível melhorar significativamente a percentagem de ocorrências cobertas.

Uma vez que as atuais localizações dos quartéis não se mostraram as mais eficientes para cobrir os incêndios no tempo estipulado, novas localizações foram determinadas num estudo paralelo a este com recurso a modelos de otimização. Quatro diferentes cenários foram considerados para dois modelos de otimização. Com recurso ao modelo de simulação, analisaram-se os resultados utilizando as novas localizações. Constatou-se que em 3 dos 4 cenários utilizados obteve-se uma cobertura menor do que a verificada com as atuais localizações. Apenas em um cenário se verificou um aumento da cobertura, no entanto neste cenário são considerados todas as atuais localizações dos quartéis e ainda 18 novas localizações, sendo consideradas um número excessivo de quartéis. Com base nestes resultados constatou-se que a utilização dos atuais modelos de otimização sozinhos mostraram-se incapazes de providenciar localizações satisfatórias para os quartéis de

bombeiros, uma vez que os resultados verificados através da simulação se encontram muito longe dos pretendidos.

Por sua vez, no modelo de simulação foram analisados dois diferentes métodos para a geração dos incêndios. No primeiro método considera-se que em todas as zonas das freguesias a probabilidade de haver uma ocorrência é a mesma. Enquanto no segundo método a probabilidade de cada zona depende da população residente na mesma. Ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens. No entanto pelo facto de no segundo método se excluir as zonas onde não vivem pessoas que por norma correspondem a zonas onde não existem edifícios, e de o número de habitantes estar diretamente relacionado com o número de incêndios, acredita-se que este modele melhor a realidade. Analisou-se ainda as diferenças que se verificam na cobertura utilizando as distâncias euclidianas e uma regressão linear para determinar os tempos de viagem comparativamente a utilizar os tempos de viagens determinados utilizando as *Google Maps APIs*. Verificou-se que apesar de se ter mantido a mesma percentagem de incêndios cobertos, existem grandes diferenças entre a cobertura verificada em cada quartel. Concluindo-se que as abordagens levam à obtenção de diferentes resultados. No entanto dado que os tempos de viagens obtidos utilizando as *Google Maps APIs* são os mesmos que se obtêm utilizando o *Google Maps*, uma das ferramentas de GPS mais precisas, crê-se que a utilização deste método seja a mais adequada. Apesar das considerações feitas aos diferentes métodos não é possível afirmar quais destes métodos são os mais adequados, uma vez que não existem dados que nos permitem comparar os resultados obtidos utilizando os diferentes métodos com a percentagem de ocorrências cobertas que se verifica na realidade.

Em futuros trabalhos que sejam extensões deste, seria importante obter-se dados que permitam validar completamente o modelo de simulação apresentado, além de verificar quais dos métodos apresentados são os mais adequados. Mostra-se também importante a utilização dos tempos de viagens determinados utilizando as *Google Maps APIs* ou outro método que permita obter resultados idênticos aos que se obtêm utilizando as mesmas.

Seria também interessante estender este estudo a outros tipos de atividades dos bombeiros. Uma vez que para determinar as localizações ideais para os quartéis de bombeiros é importante considerar os outros serviços de emergência prestados pelos mesmos, tais como o transporte de emergência médica ou incêndios industriais.

Por fim, como foi possível observar, utilizando os modelos de otimização apresentados não se conseguiu determinar novas localizações que permitam aumentar o número de ocorrências cobertas. Com vista a esse objetivo pode-se recorrer a um modelo de simulação-otimização semelhante aos apresentados na revisão da literatura. Este poderia consistir em usar os dados obtidos relativos à percentagem de ocorrências que cada quartel cobre através do modelo de simulação, para determinar quais os quartéis que precisam de ser realocados e quais os que não precisam. As novas localizações, por sua vez, serão determinadas utilizando o modelo de maximização e posteriormente avaliadas novamente com recurso ao modelo de simulação. Este processo seria repetido até que se obtenha a cobertura pretendida.

BIBLIOGRAFIA

- Aringhieri, R. (2007, novembro). Ambulance location through optimization and simulation: the case of Milano urban area. (Ver pp. 4–7).
- Asgary, A., Ghaffari, A., & Levy, J. (2010). Spatial and temporal analyses of structural fire incidents and their causes: A case of Toronto, Canada. *Fire Safety Journal*, 45, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.10.002> (ver p. 6)
- Banks, J., Carson, J., Nelson, B., & Nicol, D. (2014). *Discrete-Event System Simulation: Pearson New International Edition*. Pearson Education. <https://books.google.pt/books?id=JiWpBwAAQBAJ>. (Ver p. 9)
- Castro, C. F. d., & Abrantes, J. M. B. (2005). *Combate a Incêndios Urbanos e Industriais* (2nd ed, Vol. 10). Escola Nacional de Bombeiros. (Ver p. 1).
- Chevalier, P., Thomas, I., Geraets, D., Goetghebeur, E., Janssens, O., Peeters, D., & Plastria, F. (2012). Locating fire stations: An integrated approach for Belgium. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(2), 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2012.02.003> (ver pp. 1, 15, 16, 19)
- Corder, G. W., & Foreman, D. I. (2009, junho). *Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach* (1^a ed.). John Wiley & Sons. (Ver p. 14).
- Enayati, S., Mayorga, M. E., Rajagopalan, H. K., & Saydam, C. (2018). Real-time ambulance redeployment approach to improve service coverage with fair and restricted workload for EMS providers. *Omega*, 79, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.08.001> (ver pp. 4, 6)
- Hendrick, T. E., Plane, D. R., Monarchi, D. E., Tomasides, C., Heiss, F. W., & Walker, W. (1975). *An Analysis of the Deployment of Fire-Fighting Resources in Denver, Colorado*. RAND Corporation. (Ver pp. 3, 4).
- Karatas, M., Razi, N., & Gunal, M. M. (2017). An ILP and simulation model to optimize search and rescue helicopter operations. *Journal of the Operational Research Society*, 68, 1335–1351. <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0154-7> (ver pp. 5–8)
- Lourenço, J. M. (2021). *The NOVAthesis L^AT_EX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. <https://github.com/joamlourenco/novathesis/raw/master/template.pdf>. (Ver p. ii)

- McCormack, R., & Coates, G. (2015). A simulation model to enable the optimization of ambulance fleet allocation and base station location for increased patient survival. *European Journal of Operational Research*, 247, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.040> (ver pp. 6, 7)
- Parzen, E. (1999). *Stochastic Processes*. Society for Industrial; Applied Mathematics. <https://books.google.pt/books?id=mwW-iODttSQC>. (Ver p. 14)
- Rodriguez, S. A., la Fuente, R. A. D., & Aguayo, M. M. (2021). A simulation-optimization approach for the facility location and vehicle assignment problem for firefighters using a loosely coupled spatio-temporal arrival process. *Computers Industrial Engineering*, 157, 107242. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107242> (ver pp. 5, 6, 8, 15, 19)
- Savas, E. S. (1969). Simulation and Cost-Effectiveness Analysis of New York's Emergency Ambulance Service. *Management Science*, 15, B-608–B-627. <https://doi.org/10.1287/mnsc.15.12.B608> (ver pp. 3, 4)
- Silva, P. M. S., & Pinto, L. R. Emergency medical systems analysis by simulation and optimization. Em: IEEE, 2010-12, 2422–2432. ISBN: 978-1-4244-9866-6. <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5678938> (ver pp. 5–8).
- Spatial Modeling and Mapping of Urban Fire Occurrence in Portugal. (s.d.) (ver pp. 16, 22).
- Wang, F., & Xu, Y. (2011). Estimating O–D travel time matrix by Google Maps API: implementation, advantages, and implications. *Annals of GIS*, 17, 199–209. <https://doi.org/10.1080/19475683.2011.625977> (ver p. 17)
- Zhen, L., Wang, K., Hu, H., & Chang, D. (2014). A simulation optimization framework for ambulance deployment and relocation problems. *Computers and Industrial Engineering*, 72, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.03.008> (ver pp. 4, 6, 22)
- Zhou, Z., & Matteson, D. S. (2015). Predicting Ambulance Demand: a Spatio-Temporal Kernel Approach. *Proceedings of the 21th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2015-August*, 2297–2303. <http://arxiv.org/abs/1507.00364> (ver p. 7)

TABELAS

Tabela I.1: Localizações utilizadas nos modelos de otimização

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
1	Amarante	Aboadela, Sanche e Várzea	41.2781141	-7.9879678
2	Amarante	Amarante (São Gonçalo), Madalena, Cepelos e Gatão	41.2746398	-8.0874448
3	Amarante	Ansiães	41.2505318	-7.9562064
4	Amarante	Bustelo, Carneiro e Carvalho de Rei	41.2696357	-8.0826488
5	Amarante	Candemil	41.2477458	-7.9667489
6	Amarante	Figueiró (Santiago e Santa Cristina)	41.297162	-8.187498
7	Amarante	Fregim	41.2643962	-8.1070351
8	Amarante	Freixo de Cima e de Baixo	41.308643	-8.1371354
9	Amarante	Fridão	41.3111865	-8.034718
10	Amarante	Gondar	41.2534661	-8.0282989
11	Amarante	Gouveia (São Simão)	41.2147452	-8.051974
12	Amarante	Jazente	41.2438414	-8.0585203
13	Amarante	Lomba	41.2486425	-8.0668172
14	Amarante	Louredo	41.2543276	-8.1175741
15	Amarante	Lufrei	41.2746389	-8.051974
16	Amarante	Mancelos	41.27583	-8.1587744
17	Amarante	Olo e Canadelo	41.3227203	-7.9719689
18	Amarante	Padronelo	41.255816	-8.0503229
19	Amarante	Rebordelo	41.3437573	-7.985203
20	Amarante	Salvador do Monte	41.2401683	-8.0942354
21	Amarante	Telões	41.3100705	-8.1083421
22	Amarante	Travanca	41.2745674	-8.193961
23	Amarante	Vila Caiz	41.2373584	-8.1451618
24	Amarante	Vila Chã do Marão	41.2901939	-8.027199
25	Amarante	Vila Garcia, Aboim e Chapa	41.2696357	-8.0826488
26	Amarante	Vila Meã	41.2489266	-8.1735357
27	Baião	Ancede e Ribadouro	41.1025689	-8.0572191
28	Baião	Baião (Santa Leocádia) e Mesquinhata	41.1170923	-8.0871254
29	Baião	Campelo e Ovil	41.18149	-8.0140239
30	Baião	Frende	41.1250501	-7.9211223
31	Baião	Gestaço	41.1711605	-7.9406514
32	Baião	Gove	41.1313226	-8.0582561
33	Baião	Grilo	41.1355284	-8.0768261
34	Baião	Loivos da Ribeira e Tresouras	41.1420406	-7.9225276
35	Baião	Loivos do Monte	41.1974185	-7.972723
36	Baião	Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas	41.1170422	-8.0046437
37	Baião	Santa Marinha do Zêzere	41.1417802	-7.9508489
38	Baião	Teixeira e Teixeira	41.186878	-7.9011868
39	Baião	Valadares	41.1445971	-7.9829411
40	Baião	Viariz	41.168751	-7.9626627
41	Felgueiras	Aião	41.2990125	-8.2004395
42	Felgueiras	Airões	41.3145112	-8.1964206
43	Felgueiras	Friande	41.3678203	-8.1721205
44	Felgueiras	Idães	41.3395549	-8.2519171
45	Felgueiras	Jugueiros	41.4012723	-8.2173165
46	Felgueiras	Macieira da Lixa e Caramos	41.3515114	-8.1564959
47	Felgueiras	Margaride (Santa Eulália), Várzea, Lagares, Varziela e Moure	41.3654043	-8.1987555

ANEXO I. TABELAS

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
48	Felgueiras	Pedreira, Rande e Sernande	41.3287634	-8.2114357
49	Felgueiras	Penacova	41.3734712	-8.2522038
50	Felgueiras	Pinheiro	41.3674441	-8.1558425
51	Felgueiras	Pombeiro de Ribavizela	41.3848047	-8.2314213
52	Felgueiras	Refontoura	41.3319016	-8.1944169
53	Felgueiras	Regilde	41.3666753	-8.2671528
54	Felgueiras	Revinhade	41.3492474	-8.2696272
55	Felgueiras	Sendim	41.3867221	-8.1801768
56	Felgueiras	Torrados e Sousa	41.357847	-8.235547
57	Felgueiras	Unhão e Lordelo	41.3203583	-8.2285694
58	Felgueiras	Vila Cova da Lixa e Borba de Godim	41.3341055	-8.154742
59	Felgueiras	Vila Fria e Vizela (São Jorge)	41.3822863	-8.2477626
60	Felgueiras	Vila Verde e Santão	41.3084073	-8.1921189
61	Gondomar	Baguim do Monte (Rio Tinto)	41.1918929	-8.5411684
62	Gondomar	Fânzeres e São Pedro da Cova	41.1424361	-8.5007116
63	Gondomar	Foz do Sousa e Covelo	41.1086629	-8.4895988
64	Gondomar	Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim	41.1298751	-8.561866
65	Gondomar	Lomba	41.0596486	-8.4112032
66	Gondomar	Melres e Medas	41.0572803	-8.434873
67	Gondomar	Rio Tinto	41.1811059	-8.565452
68	Lousada	Aveleda	41.2798303	-8.2523757
69	Lousada	Caíde de Rei	41.2674492	-8.2243252
70	Lousada	Cernadelo e Lousada (São Miguel e Santa Margarida)	41.3046343	-8.2564694
71	Lousada	Cristelos, Boim e Ordem	41.275059	-8.2857642
72	Lousada	Figueiras e Covas	41.2805425	-8.3223352
73	Lousada	Lodares	41.2403904	-8.2946613
74	Lousada	Lustosa e Barrosas (Santo Estêvão)	41.3374338	-8.3191966
75	Lousada	Macieira	41.287216	-8.243039
76	Lousada	Meinedo	41.2489628	-8.2593785
77	Lousada	Nespereira e Casais	41.2544327	-8.3006322
78	Lousada	Nevogilde	41.2561888	-8.3197563
79	Lousada	Silvares, Pias, Nogueira e Alvarenga	41.2857875	-8.2758227
80	Lousada	Sousela	41.2980824	-8.3098466
81	Lousada	Torno	41.2906434	-8.2132079
82	Lousada	Vilar do Torno e Alentém	41.2844393	-8.2124808
83	Maia	Águas Santas	41.2098544	-8.5753202
84	Maia	Castêlo da Maia	41.2604484	-8.6166617
85	Maia	Cidade da Maia	41.232647	-8.6229403
86	Maia	Folgosa	41.2706372	-8.5343766
87	Maia	Milheirós	41.2132809	-8.5902666
88	Maia	Moreira	41.2466065	-8.6460217
89	Maia	Nogueira e Silva Escura	41.2349088	-8.5867315
90	Maia	Pedrouços	41.1888	-8.5874796
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
92	Maia	Vila Nova da Telha	41.2531913	-8.668614
93	Marco De Canaveses	Alpendorada, Várzea e Torrão	41.0854364	-8.2368445
94	Marco De Canaveses	Avessadas e Rosém	41.1493996	-8.1813176
95	Marco De Canaveses	Banho e Carvalhosa	41.2371977	-8.1638851
96	Marco De Canaveses	Bem Viver	41.1147763	-8.214782
97	Marco De Canaveses	Constance	41.2136706	-8.1597664
98	Marco De Canaveses	Marco	41.1799366	-8.139383
99	Marco De Canaveses	Paredes de Viadores e Manhuncelos	41.1340216	-8.1294055
100	Marco De Canaveses	Penha Longa e Paços de Gaiolo	41.1016086	-8.1106931
101	Marco De Canaveses	Sande e São Lourenço do Douro	41.1048771	-8.1762214
102	Marco De Canaveses	Santo Isidoro e Livração	41.2197154	-8.1405892
103	Marco De Canaveses	Soalhães	41.1592403	-8.0973163
104	Marco De Canaveses	Sobretâmega	41.1966745	-8.1608675
105	Marco De Canaveses	Tabuado	41.1864561	-8.1200049
106	Marco De Canaveses	Várzea, Aliviada e Folhada	41.1845043	-8.1477551
107	Marco De Canaveses	Vila Boa de Quires e Maureles	41.2139071	-8.20617
108	Marco De Canaveses	Vila Boa do Bispo	41.1298235	-8.2201345
109	Matosinhos	Custóias, Leça do Balio e Guifões	41.1971825	-8.6682332
110	Matosinhos	Matosinhos e Leça da Palmeira	41.1815056	-8.6793127
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
112	Matosinhos	São Mamede de Infesta e Senhora da Hora	41.183583	-8.6518083
113	Paços De Ferreira	Carvalhosa	41.300547	-8.3615865
114	Paços De Ferreira	Eiriz	41.3078862	-8.3882723

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
115	Paços De Ferreira	Ferreira	41.2785916	-8.3721381
116	Paços De Ferreira	Figueiró	41.3054441	-8.3391094
117	Paços De Ferreira	Frazão Arreigada	41.2590478	-8.4011018
118	Paços De Ferreira	Freamunde	41.2865608	-8.338962
119	Paços De Ferreira	Meixomil	41.2875505	-8.3937532
120	Paços De Ferreira	Paços de Ferreira	41.2782034	-8.3734136
121	Paços De Ferreira	Penamaior	41.2886374	-8.4129396
122	Paços De Ferreira	Raimonda	41.3168616	-8.3334851
123	Paços De Ferreira	Sanfins Lamoso Codessos	41.2782034	-8.3734136
124	Paços De Ferreira	Seroa	41.2631768	-8.4318669
125	Paredes	Aguiar de Sousa	41.1282869	-8.4469525
126	Paredes	Astromil	41.1961503	-8.4156809
127	Paredes	Baltar	41.1926727	-8.3884721
128	Paredes	Beire	41.248222	-8.319987
129	Paredes	Cete	41.1794441	-8.3690199
130	Paredes	Cristelo	41.2305679	-8.3628916
131	Paredes	Duas Igrejas	41.2404309	-8.3760958
132	Paredes	Gandra	41.2007707	-8.4400543
133	Paredes	Lordelo	41.2343167	-8.4102508
134	Paredes	Louredo	41.2380863	-8.3386238
135	Paredes	Parada de Todeia	41.167279	-8.3704583
136	Paredes	Paredes	41.2051674	-8.3303867
137	Paredes	Rebordosa	41.2156589	-8.4168006
138	Paredes	Recarei	41.1542951	-8.411886
139	Paredes	Sobreira	41.1465489	-8.3898193
140	Paredes	Sobrosa	41.2588812	-8.3415949
141	Paredes	Vandoma	41.1942458	-8.4076441
142	Paredes	Vilela	41.2434724	-8.3827917
143	Penafiel	Abraão	41.1577476	-8.2222555
144	Penafiel	Boelhe	41.134519	-8.2437191
145	Penafiel	Bustelo	41.2291633	-8.2705298
146	Penafiel	Cabeça Santa	41.13206	-8.2796774
147	Penafiel	Canelas	41.0777839	-8.3186665
148	Penafiel	Capela	41.1015646	-8.3480146
149	Penafiel	Castelões	41.2304298	-8.1873578
150	Penafiel	Croca	41.2245967	-8.2455673
151	Penafiel	Duas Igrejas	41.1852972	-8.2708034
152	Penafiel	Eja	41.0860541	-8.2985774
153	Penafiel	Fonte Arcada	41.14532	-8.3683889
154	Penafiel	Galegos	41.1610064	-8.3138849
155	Penafiel	Guilhufe e Urrô	41.192759	-8.3152595
156	Penafiel	Irivo	41.1751145	-8.3282181
157	Penafiel	Lagares e Figueira	41.1248165	-8.3700068
158	Penafiel	Luzim e Vila Cova	41.1710421	-8.2384523
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
160	Penafiel	Paço de Sousa	41.1663369	-8.3437242
161	Penafiel	Penafiel	41.2052808	-8.2891305
162	Penafiel	Perozelo	41.1488366	-8.2646283
163	Penafiel	Rans	41.1695408	-8.2994514
164	Penafiel	Recezinhos (São Mamede)	41.2407727	-8.2130958
165	Penafiel	Recezinhos (São Martinho)	41.2302178	-8.2123661
166	Penafiel	Rio de Moinhos	41.1078917	-8.2643193
167	Penafiel	Rio Mau	41.0530542	-8.3674684
168	Penafiel	Sebolido	41.048798	-8.3456322
169	Penafiel	Termas de São Vicente	41.1193531	-8.2928977
170	Penafiel	Valpedre	41.1360951	-8.3143192
171	Porto	Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	41.1685583	-8.6870055
172	Porto	Bonfim	41.1510153	-8.5940618
173	Porto	Campanhã	41.1613679	-8.5763932
174	Porto	Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória	41.1555894	-8.6144229
175	Porto	Lordelo do Ouro e Massarelos	41.1520861	-8.6307489
176	Porto	Paranhos	41.1753841	-8.607517
177	Porto	Ramalde	41.1663721	-8.6498773
178	Póvoa De Varzim	Aguçadoura e Navais	41.4312668	-8.7780304
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
180	Póvoa De Varzim	Balazar	41.4046018	-8.6253698
181	Póvoa De Varzim	Estela	41.4465283	-8.7498232

ANEXO I. TABELAS

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
182	Póvoa De Varzim	Laundos	41.4348539	-8.7205877
183	Póvoa De Varzim	Póvoa de Varzim, Beiriz e Argivai	41.3766361	-8.734351
184	Póvoa De Varzim	Rates	41.426006	-8.6728939
185	Santo Tirso	Agrela	41.2569258	-8.4715699
186	Santo Tirso	Água Longa	41.2508051	-8.4933473
187	Santo Tirso	Areias, Sequeiró, Lama e Palmeira	41.3630652	-8.4754513
188	Santo Tirso	Aves	41.3690522	-8.4058137
189	Santo Tirso	Carreira e Refojos de Riba de Ave	41.2892584	-8.4469945
190	Santo Tirso	Lamelas e Guimarei	41.2891704	-8.4736806
191	Santo Tirso	Monte Córdova	41.3161926	-8.4385171
192	Santo Tirso	Negrelos (São Tomé)	41.348127	-8.4003255
193	Santo Tirso	Rebordões	41.3551886	-8.4291568
194	Santo Tirso	Reguenga	41.2783338	-8.4553816
195	Santo Tirso	Roriz	41.3435561	-8.3773116
196	Santo Tirso	Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães	41.3275597	-8.4595557
197	Santo Tirso	Vila Nova do Campo	41.3591465	-8.3512865
198	Santo Tirso	Vilarinho	41.3591622	-8.3337408
199	Trofa	Alvarelhos e Guidões	41.321772	-8.6219172
200	Trofa	Bougado (São Martinho e Santiago)	41.3297055	-8.5336013
201	Trofa	Coronado (São Romão e São Mamede)	41.282184	-8.56904
202	Trofa	Covelas	41.2996544	-8.5336525
203	Trofa	Muro	41.2985251	-8.6006338
204	Valongo	Alfena	41.2414762	-8.5256062
205	Valongo	Campo e Sobrado	41.1825535	-8.4652022
206	Valongo	Ermesinde	41.2090826	-8.544636
207	Valongo	Valongo	41.1887594	-8.498352
208	Vila Do Conde	Árvore	41.3394498	-8.7206765
209	Vila Do Conde	Aveleda	41.2670365	-8.698078
210	Vila Do Conde	Azurara	41.347023	-8.7370252
211	Vila Do Conde	Bagunte, Ferreiró, Outeiro Maior e Parada	41.3735012	-8.6469224
212	Vila Do Conde	Fajozes	41.3271067	-8.6985716
213	Vila Do Conde	Fornelo e Vairão	41.3309144	-8.6671787
214	Vila Do Conde	Gião	41.310449	-8.6755759
215	Vila Do Conde	Guilhabreu	41.2919387	-8.6366816
216	Vila Do Conde	Junqueira	41.3752101	-8.6822958
217	Vila Do Conde	Labruge	41.2781543	-8.718171
218	Vila Do Conde	Macieira da Maia	41.3414277	-8.673811
219	Vila Do Conde	Malta e Canidelo	41.3034417	-8.6555135
220	Vila Do Conde	Mindelo	41.3154764	-8.7205877
221	Vila Do Conde	Modivas	41.2949456	-8.69582
222	Vila Do Conde	Retorta e Tougues	41.3623483	-8.7026628
223	Vila Do Conde	Rio Mau e Arcos	41.4000946	-8.6545583
224	Vila Do Conde	Touguinha e Touguinhó	41.3747311	-8.71346
225	Vila Do Conde	Vila Chã	41.2974213	-8.7334683
226	Vila Do Conde	Vila do Conde	41.3519329	-8.7471423
227	Vila Do Conde	Vilar de Pinheiro	41.2678482	-8.6675703
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
229	Vila Nova De Gaia	Arcozelo	41.0517695	-8.6435589
230	Vila Nova De Gaia	Avintes	41.0991885	-8.544636
231	Vila Nova De Gaia	Canelas	41.0811868	-8.6005274
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724
233	Vila Nova De Gaia	Grijó e Sermonde	41.0451491	-8.5891921
234	Vila Nova De Gaia	Gulpilhares e Valadares	41.0957523	-8.6314929
235	Vila Nova De Gaia	Madalena	41.102569	-8.6501117
236	Vila Nova De Gaia	Mafamude e Vilar do Paraíso	41.0891434	-8.6123939
237	Vila Nova De Gaia	Oliveira do Douro	41.126008	-8.5807051
238	Vila Nova De Gaia	Pedroso e Seixezelo	41.0635619	-8.5584366
239	Vila Nova De Gaia	Sandim, Olival, Lever e Crestuma	41.0635417	-8.5000342
240	Vila Nova De Gaia	Santa Marinha e São Pedro da Afurada	41.1437534	-8.6455855
241	Vila Nova De Gaia	São Félix da Marinha	41.0325798	-8.6325611
242	Vila Nova De Gaia	Serzedo e Perosinho	41.0624007	-8.5996056
243	Vila Nova De Gaia	Vilar de Andorinho	41.1055643	-8.5858466

Tabela I.2: Localizações provenientes do modelo de minimização para o 1º cenário.

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
2	Amarante	Amarante (São Gonçalo), Madalena, Cepelos e Gatão	41.2746398	-8.0874448
13	Amarante	Lomba	41.2486425	-8.0668172
21	Amarante	Telões	41.3100705	-8.1083421
36	Baião	Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas	41.1170422	-8.0046437
43	Felgueiras	Friande	41.3678203	-8.1721205
49	Felgueiras	Penacova	41.3734712	-8.2522038
58	Felgueiras	Vila Cova da Lixa e Borba de Godim	41.3341055	-8.154742
62	Gondomar	Fânzeres e São Pedro da Cova	41.1424361	-8.5007116
64	Gondomar	Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim	41.1298751	-8.561866
79	Lousada	Silvares, Pias, Nogueira e Alvarenga	41.2857875	-8.2758227
88	Maia	Moreira	41.2466065	-8.6460217
90	Maia	Pedrouços	41.1888	-8.5874796
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
95	Marco De Canaveses	Banho e Carvalhosa	41.2371977	-8.1638851
106	Marco De Canaveses	Várzea, Aliviada e Folhada	41.1845043	-8.1477551
110	Matosinhos	Matosinhos e Leça da Palmeira	41.1815056	-8.6793127
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
113	Paços De Ferreira	Carvalhosa	41.300547	-8.3615865
131	Paredes	Duas Igrejas	41.2404309	-8.3760958
135	Paredes	Parada de Todeia	41.167279	-8.3704583
141	Paredes	Vândoma	41.1942458	-8.4076441
147	Penafiel	Canelas	41.0777839	-8.3186665
155	Penafiel	Guilhufe e Urrô	41.192759	-8.3152595
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
172	Porto	Bonfim	41.1510153	-8.5940618
177	Porto	Ramalde	41.1663721	-8.6498773
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
187	Santo Tirso	Areias, Sequeiró, Lama e Palmeira	41.3630652	-8.4754513
192	Santo Tirso	Negrelos (São Tomé)	41.348127	-8.4003255
194	Santo Tirso	Reguenga	41.2783338	-8.4553816
196	Santo Tirso	Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães	41.3275597	-8.4595557
200	Trofa	Bougado (São Martinho e Santiago)	41.3297055	-8.5336013
205	Valongo	Campo e Sobrado	41.1825535	-8.4652022
206	Valongo	Ermesinde	41.2090826	-8.544636
208	Vila Do Conde	Árvore	41.3394498	-8.7206765
213	Vila Do Conde	Fornelo e Vairão	41.3309144	-8.6671787
217	Vila Do Conde	Labruge	41.2781543	-8.718171
224	Vila Do Conde	Touguinha e Touguinhó	41.3747311	-8.71346
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
229	Vila Nova De Gaia	Arcozelo	41.0517695	-8.6435589
230	Vila Nova De Gaia	Avintes	41.0991885	-8.544636
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724
236	Vila Nova De Gaia	Mafamude e Vilar do Paraíso	41.0891434	-8.6123939
237	Vila Nova De Gaia	Oliveira do Douro	41.126008	-8.5807051
238	Vila Nova De Gaia	Pedroso e Seixezelo	41.0635619	-8.5584366
239	Vila Nova De Gaia	Sandim, Olival, Lever e Crestuma	41.0635417	-8.5000342
242	Vila Nova De Gaia	Serzedo e Perosinho	41.0624007	-8.5996056

ANEXO I. TABELAS

Tabela I.3: Localizações provenientes do modelo de minimização para o 2º cenário.

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
13	Amarante	Lomba	41.2486425	-8.0668172
21	Amarante	Telões	41.3100705	-8.1083421
36	Baião	Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas	41.1170422	-8.0046437
49	Felgueiras	Penacova	41.3734712	-8.2522038
81	Lousada	Torno	41.2906434	-8.2132079
84	Maia	Castêlo da Maia	41.2604484	-8.6166617
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
131	Paredes	Duas Igrejas	41.2404309	-8.3760958
147	Penafiel	Canelas	41.0777839	-8.3186665
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
171	Porto	Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	41.1685583	-8.6870055
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
194	Santo Tirso	Reguenga	41.2783338	-8.4553816
213	Vila Do Conde	Fornelo e Vairão	41.3309144	-8.6671787
220	Vila Do Conde	Mindelo	41.3154764	-8.7205877
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724

Tabela I.4: Localizações provenientes do modelo de minimização para o 3º cenário.

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
13	Amarante	Lomba	41.2486425	-8.0668172
21	Amarante	Telões	41.3100705	-8.1083421
36	Baião	Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas	41.1170422	-8.0046437
49	Felgueiras	Penacova	41.3734712	-8.2522038
81	Lousada	Torno	41.2906434	-8.2132079
84	Maia	Castêlo da Maia	41.2604484	-8.6166617
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
131	Paredes	Duas Igrejas	41.2404309	-8.3760958
147	Penafiel	Canelas	41.0777839	-8.3186665
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
171	Porto	Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	41.1685583	-8.6870055
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
194	Santo Tirso	Reguenga	41.2783338	-8.4553816
213	Vila Do Conde	Fornelo e Vairão	41.3309144	-8.6671787
220	Vila Do Conde	Mindelo	41.3154764	-8.7205877
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724
quarteis	1 2 3 5 6 7 9 11	12 13 15 18 20 21 22 25 26 28 29 30 31 33 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44		

Tabela I.5: Localizações provenientes do modelo de minimização para o 4º cenário.

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
13	Amarante	Lomba	41.2486425	-8.0668172
21	Amarante	Telões	41.3100705	-8.1083421
36	Baião	Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas	41.1170422	-8.0046437
49	Felgueiras	Penacova	41.3734712	-8.2522038
60	Felgueiras	Vila Verde e Santão	41.3084073	-8.1921189
79	Lousada	Silvares, Pias, Nogueira e Alvarenga	41.2857875	-8.2758227
83	Maia	Águas Santas	41.2098544	-8.5753202
84	Maia	Castêlo da Maia	41.2604484	-8.6166617
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
113	Paços De Ferreira	Carvalhosa	41.300547	-8.3615865
126	Paredes	Astromil	41.1961503	-8.4156809
131	Paredes	Duas Igrejas	41.2404309	-8.3760958
147	Penafiel	Canelas	41.0777839	-8.3186665
155	Penafiel	Guilhufe e Urrô	41.192759	-8.3152595
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
171	Porto	Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	41.1685583	-8.6870055
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
194	Santo Tirso	Reguenga	41.2783338	-8.4553816
209	Vila Do Conde	Aveleda	41.2670365	-8.698078
213	Vila Do Conde	Fornelo e Vairão	41.3309144	-8.6671787
220	Vila Do Conde	Mindelo	41.3154764	-8.7205877
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724
236	Vila Nova De Gaia	Mafamude e Vilar do Paraíso	41.0891434	-8.6123939
quarteis	1 2 5 6 7 9 11	15 18 20 28 29 30 31 35 36 38 39 40 41 43 44		

Tabela I.6: Localizações provenientes do modelo de mmaximização para o 1º cenário.

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
2	Amarante	Amarante (São Gonçalo), Madalena, Cepelos e Gatão	41.2746398	-8.0874448
43	Felgueiras	Friande	41.3678203	-8.1721205
48	Felgueiras	Pedreira, Rande e Sernande	41.3287634	-8.2114357
54	Felgueiras	Revinhade	41.3492474	-8.2696272
58	Felgueiras	Vila Cova da Lixa e Borba de Godim	41.3341055	-8.154742
62	Gondomar	Fânzeres e São Pedro da Cova	41.1424361	-8.5007116
64	Gondomar	Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim	41.1298751	-8.561866
79	Lousada	Silvares, Pias, Nogueira e Alvarenga	41.2857875	-8.2758227
81	Lousada	Torno	41.2906434	-8.2132079
88	Maia	Moreira	41.2466065	-8.6460217
90	Maia	Pedrouços	41.1888	-8.5874796
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
96	Marco De Canaveses	Bem Viver	41.1147763	-8.214782
106	Marco De Canaveses	Várzea, Aliviada e Folhada	41.1845043	-8.1477551
110	Matosinhos	Matosinhos e Leça da Palmeira	41.1815056	-8.6793127
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
113	Paços De Ferreira	Carvalhosa	41.300547	-8.3615865
128	Paredes	Beire	41.248222	-8.319987
135	Paredes	Parada de Todeia	41.167279	-8.3704583
141	Paredes	Vandoma	41.1942458	-8.4076441
142	Paredes	Vilela	41.2434724	-8.3827917
149	Penafiel	Castelões	41.2304298	-8.1873578
155	Penafiel	Guilhufe e Urrô	41.192759	-8.3152595
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
172	Porto	Bonfim	41.1510153	-8.5940618
177	Porto	Ramalde	41.1663721	-8.6498773
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
192	Santo Tirso	Negrelas (São Tomé)	41.348127	-8.4003255
194	Santo Tirso	Reguenga	41.2783338	-8.4553816
196	Santo Tirso	Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães	41.3275597	-8.4595557
198	Santo Tirso	Vilarinho	41.3591622	-8.3337408
200	Trofa	Bougado (São Martinho e Santiago)	41.3297055	-8.5336013
201	Trofa	Coronado (São Romão e São Mamede)	41.282184	-8.56904
203	Trofa	Muro	41.2985251	-8.6006338
206	Valongo	Ermesinde	41.2090826	-8.544636
207	Valongo	Valongo	41.1887594	-8.498352
208	Vila Do Conde	Árvore	41.3394498	-8.7206765
224	Vila Do Conde	Touguinha e Touguinhó	41.3747311	-8.71346
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
230	Vila Nova De Gaia	Avintes	41.0991885	-8.544636
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724
236	Vila Nova De Gaia	Mafamude e Vilar do Paraíso	41.0891434	-8.6123939
237	Vila Nova De Gaia	Oliveira do Douro	41.126008	-8.5807051
238	Vila Nova De Gaia	Pedroso e Seixezelo	41.0635619	-8.5584366
239	Vila Nova De Gaia	Sandim, Olival, Lever e Crestuma	41.0635417	-8.5000342
241	Vila Nova De Gaia	São Félix da Marinha	41.0325798	-8.6325611
242	Vila Nova De Gaia	Serzedo e Perosinho	41.0624007	-8.5996056

Tabela I.7: Localizações provenientes do modelo de mmaximização para o 2º cenário.

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
54	Felgueiras	Revinhade	41.3492474	-8.2696272
81	Lousada	Torno	41.2906434	-8.2132079
84	Maia	Castêlo da Maia	41.2604484	-8.6166617
86	Maia	Folgosa	41.2706372	-8.5343766
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
117	Paços De Ferreira	Frazão Arreigada	41.2590478	-8.4011018
128	Paredes	Beire	41.248222	-8.319987
139	Paredes	Sobreira	41.1465489	-8.3898193
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
171	Porto	Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	41.1685583	-8.6870055
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
198	Santo Tirso	Vilarinho	41.3591622	-8.3337408
199	Trofa	Alvarelhos e Guidões	41.321772	-8.6219172
220	Vila Do Conde	Mindelo	41.3154764	-8.7205877
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
231	Vila Nova De Gaia	Canelas	41.0811868	-8.6005274
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724

ANEXO I. TABELAS

Tabela I.8: Localizações provenientes do modelo de mmaximização para o 2º cenário.

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
54	Felgueiras	Revinhade	41.3492474	-8.2696272
81	Lousada	Torno	41.2906434	-8.2132079
84	Maia	Castêlo da Maia	41.2604484	-8.6166617
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
117	Paços De Ferreira	Frazão Arreigada	41.2590478	-8.4011018
128	Paredes	Beire	41.248222	-8.319987
139	Paredes	Sobreira	41.1465489	-8.3898193
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
171	Porto	Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	41.1685583	-8.6870055
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
198	Santo Tirso	Vilarinho	41.3591622	-8.3337408
201	Trofa	Coronado (São Romão e São Mamede)	41.282184	-8.56904
203	Trofa	Muro	41.2985251	-8.6006338
220	Vila Do Conde	Mindelo	41.3154764	-8.7205877
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724
236	Vila Nova De Gaia	Mafamude e Vilar do Paraíso	41.0891434	-8.6123939
quarteis	1 2 3 4 5 6 7 9 11 12 13 15 18 20 21 22 23 25 26 29 30 31 33 35 36 37 38 39 40 41 42 44			

Tabela I.9: Localizações provenientes do modelo de mmaximização para o 2º cenário.

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
54	Felgueiras	Revinhade	41.3492474	-8.2696272
79	Lousada	Silvares, Pias, Nogueira e Alvarenga	41.2857875	-8.2758227
81	Lousada	Torno	41.2906434	-8.2132079
83	Maia	Águas Santas	41.2098544	-8.5753202
84	Maia	Castêlo da Maia	41.2604484	-8.6166617
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
113	Paços De Ferreira	Carvalhosa	41.300547	-8.3615865
126	Paredes	Astromil	41.1961503	-8.4156809
128	Paredes	Beire	41.248222	-8.319987
139	Paredes	Sobreira	41.1465489	-8.3898193
142	Paredes	Vilela	41.2434724	-8.3827917
155	Penafiel	Guilhufe e Urrô	41.192759	-8.3152595
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
171	Porto	Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	41.1685583	-8.6870055
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
192	Santo Tirso	Negrelas (São Tomé)	41.348127	-8.4003255
194	Santo Tirso	Reguenga	41.2783338	-8.4553816
198	Santo Tirso	Vilarinho	41.3591622	-8.3337408
201	Trofa	Coronado (São Romão e São Mamede)	41.282184	-8.56904
203	Trofa	Muro	41.2985251	-8.6006338
209	Vila Do Conde	Aveleda	41.2670365	-8.698078
220	Vila Do Conde	Mindelo	41.3154764	-8.7205877
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724
236	Vila Nova De Gaia	Mafamude e Vilar do Paraíso	41.0891434	-8.6123939
quarteis	1 2 5 6 7 9 11 15 18 23 25 26 29 30 31 35 36 38 39 40 41 42 44			

Tabela I.10: Quarteis de bombeiros existentes no distrito do Porto.

	Concelho	Freguesia	Corpo de Bombeiro	Latitude	Longitude
1	Amarante	Amarante (São Gonçalo), Madalena, Cepelos e Gatão	B.V. de Amaranite	41.2726405	-8.0810041
2	Amarante	Vila Meã	B.V. de Vila Meã	41.2474566	-8.1915627
3	Baião	Campelo e Ovil	B.V. de Baião	41.1594556	-8.0377394
4	Baião	Santa Marinha do Zêzere	B.V. de Santa Marinha do Zêzere	41.1454161	-7.9497635
5	Felgueiras	Margaride (Santa Eulália), Várzea, Lagares, Varziela e Moure	B.V. de Felgueiras	41.3685037	-8.1969282
6	Felgueiras	Vila Cova da Lixa e Borba de Godim	B.V. de Lixa	41.3286529	-8.1497421
7	Gondomar	Fânzeres e São Pedro da Cova	B.V. de São Pedro da Cova	41.1525367	-8.5104852
8	Gondomar	Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim	B.V. de Gondomar	41.1423721	-8.5334083
9	Gondomar	Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim	B.V. de Valbom	41.1403709	-8.5640344
10	Gondomar	Melres e Medas	B.V. de Melres	41.0583523	-8.397511
11	Gondomar	Rio Tinto	B.V. da Areosa-Rio Tinto	41.1806033	-8.5623244
12	Lousada	Cristelos, Boim e Ordem	B.V. de Lousada	41.2759187	-8.2830167
13	Maia	Moreira	B.V. de Moreira da Maia	41.2477	-8.6633832
14	Maia	Pedrouços	B.V. de Pedrouços	41.1859319	-8.5888116
15	Marco de Canaveses	Marco	B.V. de Marco de Canaveses	41.1900059	-8.1452247
16	Matosinhos	Custóias, Leça do Balio e Guifões	B.V. de Leça do Balio	41.2117215	-8.6327541
17	Matosinhos	Matosinhos e Leça da Palmeira	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1892886	-8.6970007
18	Matosinhos	Matosinhos e Leça da Palmeira	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1855637	-8.6776617
19	Matosinhos	São Mamede de Infesta e Senhora da Hora	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1905622	-8.6086531
20	Paços de Ferreira	Freamunde	B.V. de Matosinhos-Leça	41.2864321	-8.3444821
21	Paços de Ferreira	Paços de Ferreira	B.V. de Matosinhos-Leça	41.2780124	-8.3781798
22	Paredes	Baltar	B.V. de Matosinhos-Leça	41.191724	-8.38586
23	Paredes	Cete	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1719997	-8.3586216
24	Paredes	Lordelo	B.V. de Matosinhos-Leça	41.2334278	-8.4151241
25	Paredes	Paredes	B.V. de Matosinhos-Leça	41.2060959	-8.3381918
26	Paredes	Rebordosa	B.V. de Matosinhos-Leça	41.2137797	-8.416711
27	Penafiel	Elja	B.V. de Matosinhos-Leça	41.0895552	-8.2899279
28	Penafiel	Paço de Sousa	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1675345	-8.3464587
29	Penafiel	Penafiel	B.V. de Matosinhos-Leça	41.2076697	-8.2814092
30	Porto	Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1485369	-8.6098052
31	Porto	Ramalde	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1710001	-8.6415182
32	Póvoa de Varzim	Póvoa de Varzim, Beiriz e Argivai	B.V. de Matosinhos-Leça	41.3806709	-8.7620567
33	Santo Tirso	Aves	B.V. de Matosinhos-Leça	41.3625044	-8.4072879
34	Santo Tirso	Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães	B.V. de Matosinhos-Leça	41.3395373	-8.4859652
35	Santo Tirso	Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães	B.V. de Matosinhos-Leça	41.3417093	-8.4772584
36	Trofa	Bougado (São Martinho e Santiago)	B.V. de Matosinhos-Leça	41.3410142	-8.5571659
37	Valongo	Ermesinde	B.V. de Matosinhos-Leça	41.2174902	-8.5500425
38	Valongo	Valongo	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1903761	-8.4985568
39	Vila do Conde	Vila do Conde	B.V. de Matosinhos-Leça	41.36581	-8.740107
40	Vila Nova de Gaia	Arcozelo	B.V. de Matosinhos-Leça	41.0493078	-8.6533707
41	Vila Nova de Gaia	Avintes	B.V. de Matosinhos-Leça	41.113642	-8.5609893
42	Vila Nova de Gaia	Carvalhosa	B.V. de Matosinhos-Leça	41.072573	-8.578421
43	Vila Nova de Gaia	Culpihares e Valadares	B.V. de Matosinhos-Leça	41.0950829	-8.6370527
44	Vila Nova de Gaia	Sandim, Olival, Lever e Crestuma	B.V. de Matosinhos-Leça	41.0549738	-8.5163822
45	Vila Nova de Gaia	Santa Marinha e São Pedro da Afurada	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1266056	-8.6291083



