



Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento  
2012

**RICARDO MIGUEL OLIVEIRA TEIXEIRA** **SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR EM AMBIENTE ESCOLAR**





**Universidade de Aveiro** Departamento de Ambiente e Ordenamento  
2012

**RICARDO MIGUEL OLIVEIRA TEIXEIRA    SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR  
EM AMBIENTE ESCOLAR**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Doutor Jorge Humberto Amorim, Estagiário de Pós-Doutoramento do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **o júri**

presidente

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda**  
professora Associada com Agregação do Departamento de Ambiente e Ordenamento da  
Universidade de Aveiro

**Doutora Ana Margarida Lobo Lourenço Costa**  
técnica Superior do Instituto do Ambiente e Desenvolvimento - IDAD

**Doutor Jorge Humberto de Melo Rosa Amorim**  
estagiário de Pós-Doutoramento do Departamento de Ambiente e Ordenamento da  
Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Foi um trabalho longo e difícil, mas que consegui terminar graças à ajuda de várias pessoas.

Ao professor Jorge Amorim, um obrigado por tudo o que fez por mim ao longo destes meses. Agradeço a sua orientação, disponibilidade, auxílio, e por todas as sugestões essenciais para que obtivesse uma melhor dissertação. Muito obrigado!

Aos professores Richard Tavares e Joana Valente, e às Engenheiras Daniela Dias, Cláudia Pimentel e Isabel Ribeiro, por toda a ajuda prestada durante as várias etapas deste trabalho.

Quero agradecer também aos investigadores/docentes do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro: Carlos Borrego, Célia Alves, Isabel Ribeiro, Joana Silva, Joana Valente, Márcio Duarte, Pedro Cascão e Teresa Nunes, pelos dados e informações fornecidos no âmbito do projeto SINPHONIE (*"Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe"*), com financiamento da Comissão Europeia através da DG Sanco.

Aos meus pais, pelo esforço e incondicional apoio durante este trajeto de muitos anos. Obrigado por dedicarem as vossas vidas à conclusão de um dos meus objetivos, e por tentarem fazer de mim uma melhor pessoa todos os dias. Obrigado pais!

Aos meus irmãos Pedro e Gabriel, obrigado por serem assim e por todas as vezes que me animaram quando eu mais precisava. Espero que tenham orgulho no vosso irmão mais velho.

Um obrigado especial a todos os meus amigos, sem vocês nada disto seria da mesma maneira. Aos melhores companheiros de casa que podia ter, Nuno, Sónia e Paulo, por todos os bons momentos passados, força, e alegria. Aos meus colegas, João, Telmo, Manel, Carla, Rita, Fátima, e Joana, pelo apoio demonstrado, amizade, e companhia. Obrigado a todos vocês por contribuírem para os melhores dias da minha vida.

**palavras-chave**

Poluição atmosférica, qualidade do ar interior, modelação da qualidade do ar, escolas, emissões.

**resumo**

A qualidade do ar interior (QAI) em salas de aula é um fator determinante na incidência e prevalência de doenças do foro respiratório dos utentes do espaço escolar (alunos, professores e funcionários), sendo particularmente relevante no caso de crianças e jovens. Com base neste problema, esta dissertação tem como principal objetivo avaliar qual a contribuição da poluição exterior para os níveis de QAI numa escola do concelho de Aveiro (Escola Básica nº 1 da Glória), recorrendo à aplicação do modelo IAQX (*Simulation Tool Kit for Indoor Air Quality and Inhalation Exposure*). Utilizaram-se como dados de entrada no modelo IAQX as concentrações exteriores de monóxido de carbono (CO) simuladas no modelo de qualidade do ar VADIS, obtendo-se dessa forma as concentrações interiores numa das salas de aulas da escola selecionada. A comparação destas com os valores medidos possibilitou, assim, aferir qual a contribuição do ar exterior para os níveis de QAI na Escola Básica nº 1 da Glória.

Os resultados obtidos nesta dissertação demonstram que as concentrações exteriores de CO têm influência nas concentrações interiores da Escola Básica nº 1 da Glória. Os valores simulados com o modelo IAQX não são totalmente concordantes com os valores medidos no interior da sala de aula, o que pode ser explicado por fatores locais, tais como o fator humano (por exemplo, a abertura de janelas), ou por fatores relacionados com o escoamento e dispersão atmosférica. No entanto, tanto os valores medidos como os valores simulados da concentração interior de CO não ultrapassam o valor máximo para edifícios escolares estipulado no Decreto-Lei nº 79/2006, de 4 de abril.

Apesar dos resultados revelarem que as concentrações interiores de CO não indicam uma má QAI na Escola Básica nº 1 da Glória, para garantir que a escola esteja a cumprir todos os padrões de uma boa QAI, é necessário analisar mais poluentes e parâmetros para além do CO.

**keywords**

Atmospheric pollution, indoor air quality, air quality modelling, schools, emissions.

**abstract**

The indoor air quality (IAQ) in classrooms is a key factor in the incidence and prevalence of respiratory diseases of the school users (students, teachers and staff), being particularly relevant for children and youth. Based on this problem, the main objective of this thesis is to evaluate the contribution of outdoor pollution to the IAQ levels in a school (*Escola Básica nº 1 da Glória*) of Aveiro town (Portugal), by applying the IAQX (Simulation Tool Kit for Indoor Air Quality and Inhalation Exposure) model. Using as input data the carbon monoxide (CO) outdoor concentrations simulated in the air quality VADIS model, the indoor concentrations in one of the classrooms of the selected school were obtained. The comparison of these with the measured values allowed the assessment of the contribution of outdoor air for IAQ levels in *Escola Básica nº 1 da Glória*.

The results obtained in this work show that CO outdoor concentrations have influence on the indoor concentrations of *Escola Básica nº 1 da Glória*. The values simulated with the IAQX model inside the school classroom are not fully consistent with the measured values, which can be explained by local factors, such as the human factor (eg. the opening of windows), or by atmospheric flow/dispersion factors. However, both measured values and simulated values of CO indoor concentration do not exceed the maximum value to school buildings stipulated in *Decreto-Lei nº 79/2006* of 4<sup>th</sup> April.

Although the results reveal that CO indoor concentrations do not indicate a poor IAQ in *Escola Básica nº 1 da Glória*, to ensure that the school is fulfilling all the standards of a good IAQ, it is necessary to analyse more pollutants and parameters in addition to CO.





# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
<b>2. QUALIDADE DO AR INTERIOR (QAI)</b>	<b>6</b>
2.1. DEFINIÇÃO	6
2.2. ESTUDOS INTERNACIONAIS E NACIONAIS DE CARACTERIZAÇÃO DA QAI EM ESCOLAS	7
2.3. FONTES DE CONTAMINAÇÃO INTERIORES E EXTERIORES	9
2.4. MEDIDAS DE CONTROLO DA QAI	10
2.5. MODELOS NUMÉRICOS PARA A ESTIMATIVA DA QAI	12
<b>3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA QAI</b>	<b>17</b>
3.1. CASO DE ESTUDO	17
3.2. METODOLOGIA	19
3.3. SIMULAÇÃO CFD DA QA EXTERIOR	20
3.4. CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	24
3.5. CONFIGURAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE EDIFÍCIOS E ÁRVORES	25
3.6. ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO	27
3.7. MODELAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE FUNDO	29
3.8. MODELAÇÃO DA QAI	31
<b>4. CAMPANHA DE MONITORIZAÇÃO</b>	<b>34</b>
4.1. TRÁFEGO RODOVIÁRIO	34
4.2. QA EXTERIOR	35
4.3. QAI	37
<b>5. TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>41</b>
5.1 EMISSÕES DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO	41
5.2. ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO	41
5.3. QA EXTERIOR	44
5.4. QAI	48
5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES SIMULADOS DE CONCENTRAÇÃO EXTERIOR E INTERIOR	52
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>54</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>56</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferentes fontes de poluição atmosférica. ....	1
Figura 2: Exemplos de poluição de ar exterior e interior.....	6
Figura 3: Metodologia de funcionamento do modelo MEXPO [Costa, 2008]. ....	15
Figura 4: Vista aérea da cidade de Aveiro (Fonte: <i>Google Maps</i> , 2011).....	17
Figura 5: O domínio de estudo, com a indicação da Escola Básica nº 1 da Glória (Fonte: <i>Google Earth</i> , 2012).....	18
Figura 6: Escola Básica nº 1 da Glória (Fonte: <a href="http://www.eb1-n1-gloria-aveiro.rcts.pt/index.htm">http://www.eb1-n1-gloria-aveiro.rcts.pt/index.htm</a> ).....	19
Figura 7: Metodologia seguida para a estimativa da QAI na Escola Básica nº 1 da Glória. ..	20
Figura 8: Estrutura de funcionamento do modelo VADIS [Borrego <i>et al.</i> , 2003b].....	21
Figura 9: Representação da malha cartográfica e de campo de ventos [Borrego <i>et al.</i> , 2002]. .....	22
Figura 10: Disposição dos obstáculos e fontes de emissão no modelo VADIS [Borrego <i>et al.</i> , 2002]. ....	23
Figura 11: Valores médios horários da velocidade e direção do vento. ....	25
Figura 12: Representação tridimensional dos edifícios (a vermelho) e árvores (a verde) no domínio de estudo. ....	26
Figura 13: Domínio de estudo definido na interface do VADIS. ....	27
Figura 14: Estrutura de funcionamento do modelo EURAD [Elbern <i>et al.</i> , 2007; Strunk <i>et al.</i> , 2010]. ....	30
Figura 15: Localização da câmara de vídeo instalada no local de estudo, e das quatro vias de tráfego analisadas (Fonte: Bing Maps, 2011).....	34
Figura 16: Evolução do número total de veículos para as quatro vias. ....	35
Figura 17: Carrinha de QA utilizada na campanha de monitorização da Escola Básica nº 1 da Glória. ....	36
Figura 18: Representação gráfica dos valores de concentração dos poluentes atmosféricos medidos na Escola Básica nº 1 da Glória. ....	36
Figura 19: Localização da sala de aula objeto de estudo, indicada com uma estrela [Ventura, 2011]. ....	38
Figura 20: Concentrações interiores de CO e CO <sub>2</sub> medidas na sala R3.....	38
Figura 21: Valores de temperatura e humidade relativa medidos na sala R3. ....	39
Figura 22: Evolução horária das emissões totais de CO para as quatro vias analisadas. ....	41
Figura 23: Campo de ventos representado no programa Surfer para a simulação relativa ao	

período das 0 - 1 horas.....	42
Figura 24: Escoamento atmosférico na Escola da Glória no período das 8 - 9 horas.....	43
Figura 25: Escoamento atmosférico na Escola da Glória no período das 15 - 16 horas.....	43
Figura 26: Escoamento atmosférico na Escola da Glória no período das 18 - 19 horas.....	44
Figura 27: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 8 - 9 horas. .....	45
Figura 28: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 15 - 16 horas.....	46
Figura 29: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 18 - 19 horas.....	47
Figura 30: Valores da concentração exterior de CO medidos e simulados no dia 11 de janeiro de 2012.....	48
Figura 31: Concentração interior de CO simulada no IAQX. ....	49
Figura 32: Valores das concentrações interiores de CO medidos e simulados no dia 11 de janeiro de 2012.....	50
Figura 33: Concentrações exteriores de CO medidas durante a campanha de monitorização na Escola da Glória no dia 10 de janeiro de 2012.....	51
Figura 34: A página principal do programa GPS. ....	64
Figura 35: A página relativa à definição da ventilação do GPS. ....	65
Figura 36: Página de introdução dos dados de entrada do modelo.....	65
Figura 37: Página de “Output” do programa GPS. ....	66
Figura 38: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 0 - 1 horas. .....	74
Figura 39: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 1 - 2 horas. .....	74
Figura 40: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 2 - 3 horas. .....	74
Figura 41: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 3 - 4 horas. .....	74
Figura 42: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 4 - 5 horas. .....	74
Figura 43: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 5 - 6 horas. .....	74
Figura 44: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 6 - 7 horas. .....	74

<b>Figura 45: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 7 - 8 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 46: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 9 - 10 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 47: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 10 - 11 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 48: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 11 - 12 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 49: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 12 - 13 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 50: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 13 - 14 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 51: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 14 - 15 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 52: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 16 - 17 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 53: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 17 - 18 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 54: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 19 - 20 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 55: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 20 - 21 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 56: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 21 - 22 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 57: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 22 - 23 horas.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 58: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 23 - 24 horas.</b>	<b>74</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores e fontes que afetam a QAI [APA, 2009]. .....	10
Tabela 2: Concentração máxima de poluentes permitida em espaços interiores (n.ºs 8 e 9 do artigo 29.º e Anexo VII, Decreto-Lei 79/2006). .....	12
Tabela 3: Caudais mínimos de ar novo por pessoa para espaços escolares (Anexo VI, Decreto-Lei 79/2006). .....	12
Tabela 4: Programas incluídos no IAQX [Guo, 2000a]. .....	31
Tabela 5: Parâmetros estatísticos relativos às concentrações exteriores de CO.....	52
Tabela 6: Parâmetros estatísticos relativos às concentrações interiores de CO. ....	53
Tabela 7: Resultados obtidos na campanha de monitorização da qualidade do ar realizada na Escola Básica nº 1 da Glória.....	67
Tabela 8: Emissões totais do tráfego rodoviário para a via 1 (Fórum → Universidade) no dia 11/01/12.....	68
Tabela 9: Emissões totais do tráfego rodoviário para a via 2 (Governo Civil) no dia 11/01/12. ....	69
Tabela 10: Emissões totais do tráfego rodoviário para a via 3 (Universidade → Fórum) no dia 11/01/12. ....	70
Tabela 11: Emissões totais do tráfego rodoviário para a via 4 (Rua Capitão Sousa Pizarro) no dia 11/01/12.....	71
Tabela 12: Resultados obtidos das concentrações exteriores de CO medidos na campanha de monitorização e simulados no VADIS e EURAD.....	72
Tabela 13: Resultados obtidos das concentrações interiores de CO medidos na sala de aula e simulados no IAQX. ....	73



## 1. Introdução

### **1.1. Enquadramento geral**

Cada pessoa inala, em média, 10 m<sup>3</sup> de ar por dia. Quando comparado com o que cada indivíduo consome de alimentos sólidos e líquidos, cerca de 2 kg, percebe-se o quanto é indispensável o ar que respiramos. De referir também o facto de que um ser humano pode sobreviver 5 semanas sem comida e 5 dias sem água, mas não consegue sobreviver sem ar durante mais de 3 minutos [Stern, 1977]. Por tudo isto, o estudo e o controlo da poluição atmosférica assumem-se como questões fundamentais, atendendo a que este é um problema a nível global, com fortes repercussões sobre o bem-estar e saúde.

A poluição atmosférica, definida como a presença na atmosfera de substâncias ou energia que exerçam uma ação nociva suscetível de pôr em risco a saúde humana, de causar danos aos recursos biológicos e aos ecossistemas, de deteriorar os bens materiais e de ameaçar ou prejudicar o valor recreativo ou outras utilizações legítimas do ambiente (Figura 1), é um grave problema que a sociedade atual enfrenta, responsável inclusive pelo aumento da mortalidade humana. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), aproximadamente três milhões de mortes por ano em todo o mundo resultam da exposição a matéria particulada presente na atmosfera [WHO, 2001].



**Figura 1:** Diferentes fontes de poluição atmosférica.

De entre os poluentes atmosféricos mais importantes refiram-se as partículas em suspensão, o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), metais pesados como o chumbo (Pb), mercúrio (Hg) ou cádmio (Cd), ozono (O<sub>3</sub>), compostos orgânicos voláteis (COVs) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A exposição a partículas, em particular, é a principal causadora de problemas de saúde na maioria das cidades. No período de 1997 a 2004, 23 a 45 % da população urbana foi exposta a concentrações de partículas com diâmetro inferior a 10 µm (PM10) no ar ambiente superiores ao valor limite definido pela União Europeia (UE) para a proteção da saúde humana [AEA, 2007]. Hoje em dia, o cenário é idêntico, sendo que são as estações de monitorização de qualidade do ar do Norte de Itália, Europa Central, Polónia e Turquia, aquelas que registam o maior número de excedências de PM10, ao contrário das estações dos países Nórdicos [AEA, 2011a].

Devido ao aumento das emissões associadas ao tráfego rodoviário e aos processos industriais, as preocupações sobre a poluição atmosférica têm sido mais direcionadas para a poluição do ambiente exterior do que para a dos ambientes interiores. No entanto, visto que a população em geral passa 80 a 90 % do tempo em ambientes interiores [AEA, 2007], nomeadamente em casa, locais de trabalho, escola, espaços públicos comerciais e de lazer, torna-se importante caracterizar e avaliar a qualidade do ar interior (QAI). A QAI afeta o bem-estar geral, devido à possível presença de diversos poluentes com diferentes causas e fontes, podendo gerar problemas respiratórios e outros efeitos de saúde relacionados, como é o caso da asma (principal doença respiratória crónica em crianças), alergias respiratórias, doença pulmonar obstrutiva crónica (DPOC), hipertensão pulmonar, apneia do sono, e até eventualmente cancro [Borrego *et al.*, 2008].

As crianças são o grupo mais suscetível de serem afetadas pela poluição do ar interior, já que, em relação aos adultos, respiram um maior volume de ar relativamente ao seu peso corporal, e, para além disso, o seu sistema imunitário está mais vulnerável a pressões ambientais. Quase 50 % das mortes por pneumonia entre as crianças com menos de cinco anos resultam das partículas inaladas em ambientes interiores [<sup>1</sup>].

A QAI em edifícios depende de vários fatores, como a emissão de poluentes por fontes existentes no interior (fumo de tabaco, uso de produtos de limpeza, materiais utilizados nos acabamentos interiores, sistemas de aquecimento e ar condicionado), a infiltração de poluentes existentes no ar exterior e a acumulação de poluentes devido a condições de ventilação deficientes [Madureira, 2005]. Os problemas da QAI em escolas

<sup>1</sup> <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/en/index.html>



podem ser ainda mais graves do que noutros tipos de edifícios, devido à maior densidade de ocupação e ao insuficiente fornecimento de ar exterior, agravada pela fraca qualidade de construção e manutenção de edifícios escolares [Pegas *et al.*, 2011].

As crianças passam, diariamente, muitas horas nas escolas, sendo o segundo microambiente onde passam mais tempo [Borrego *et al.*, 2008]. Para além das questões de saúde, uma má QAI nas escolas influencia o desempenho escolar dos alunos. Assim, uma adequada QAI exige boas condições de arejamento e ventilação, a eficiência energética do edifício e equipamentos e, se possível, um controlo da humidade e temperatura [Borrego *et al.*, 2008].

De facto uma boa estratégia de ventilação no interior de um edifício é fundamental para garantir o equilíbrio entre o ar que entra e o ar que sai, o que influencia tanto as concentrações de poluentes no ar interior como também as necessidades energéticas do edifício. Sendo a ventilação responsável pelo transporte dos poluentes do exterior para o interior e pela diluição dos poluentes com origem no interior, é preciso ter em conta este fator, para permitir uma QAI aceitável e o mínimo de consumo de energia no interior dos edifícios [Santamouris *et al.*, 1998].

## **1.2. Objetivos e metodologia**

O presente trabalho de dissertação pretende avaliar qual a contribuição da poluição exterior para os níveis de QAI numa escola do concelho de Aveiro (Escola Básica nº 1 da Glória), recorrendo à aplicação de uma metodologia de modelação numérica da QAI.

A metodologia seguida envolveu as seguintes tarefas:

- Pesquisa de trabalhos sobre a mesma temática, e seleção de uma escola adequada ao objetivo da dissertação;
- Pesquisa e seleção de um modelo numérico de qualidade do ar (QA), de elevada resolução espacial, para aplicação ao caso de estudo;
- Recolha dos dados necessários à realização das simulações numéricas, nomeadamente, condições meteorológicas, configuração tridimensional de edifícios e árvores, e tráfego rodoviário;

- Tratamento dos dados obtidos: dados meteorológicos medidos; informação geográfica relativa à localização e configuração de edifícios e árvores com base em imagens de satélite e ficheiros SIG; dados de contagens de tráfego;
- Modelação das concentrações de fundo no domínio de estudo definido;
- Simulação numérica da qualidade do ar recorrendo ao modelo selecionado utilizando como condições fronteira e iniciais os dados recolhidos e tratados anteriormente;
- Seleção e aplicação de uma metodologia de modelação numérica de QAI que permitisse estimar os níveis de QAI com base nos campos de concentração de poluentes específicos obtidos na tarefa anterior;
- Intercomparação dos valores de concentração simulados e medidos no exterior e interior;
- Análise estatística dos resultados obtidos com os modelos utilizados.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

A dissertação está estruturada em 6 capítulos. No presente Capítulo é feita a introdução ao trabalho realizado, com um enquadramento geral ao tema, sendo apresentados os objetivos e metodologia da dissertação.

No Capítulo 2 é abordado o estado da arte ao nível da QAI em escolas, referindo-se aspetos tais como as fontes de contaminação interiores e exteriores, as medidas de controlo da QAI, e alguns modelos numéricos para a estimativa da QAI.

No Capítulo 3 é descrito o caso de estudo do trabalho, e as etapas que envolveram a simulação numérica da QAI: a simulação CFD da QA com o modelo VADIS, as condições meteorológicas, a configuração tridimensional de edifícios e árvores presentes no domínio de estudo, a estimativa das emissões de tráfego rodoviário, a modelação das concentrações de fundo com o modelo de mesoscala EURAD, e a modelação da QAI com o modelo IAQX (*Simulation Tool Kit for Indoor Air Quality and Inhalation Exposure*).

O Capítulo 4 explora a campanha de monitorização da QA realizada na Escola Básica nº 1 da Glória, nomeadamente com a apresentação dos resultados relativos ao tráfego rodoviário, à QA exterior, e à QAI.

No Capítulo 5 é apresentado o tratamento e análise dos resultados, com a

interpretação dos resultados das emissões de tráfego, das características do escoamento atmosférico, a intercomparação dos valores de concentração simulados e medidos da QA exterior e da QAI, e a validação estatística dos resultados obtidos com os modelos VADIS e IAQX.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões da dissertação.

## **2. Qualidade do ar interior (QAI)**

### ***2.1. Definição***

A poluição atmosférica tem vindo a ser mais estudada e discutida em relação ao ar ambiente exterior. No entanto, é preciso considerar que a poluição atmosférica não está limitada apenas ao exterior, visto que uma quantidade significativa de emissão de poluentes pode ocorrer em ambientes ocupacionais, em residências, escritórios ou outros edifícios públicos (Figura 2). Hoje em dia já existe uma preocupação acrescida com a poluição do ar interior, visto que as populações, sobretudo as que residem em zonas urbanas, passam aproximadamente 90% do seu tempo dentro de ambientes interiores, potenciando a exposição a concentrações de poluentes com impacto na saúde e qualidade de vida. Tal como será objeto da secção 2.2, estudos realizados sobre esta problemática mostram que os níveis de poluição do ar em espaços interiores são muitas vezes superiores aos valores observados no ar ambiente, tornando-se assim relevante caracterizar e avaliar a QAI.



**Figura 2:** Exemplos de poluição de ar exterior e interior.

A QAI engloba as características químicas, físicas e biológicas do ar interior de um local que possam afetar o conforto e saúde dos ocupantes, que traduz o grau de poluição do ar resultante da presença de substâncias poluentes que, consoante a sua composição química, a concentração na massa de ar em causa e as condições meteorológicas, podem ter maior ou menor impacte na qualidade do ar [APA, 2009].

## **2.2. Estudos internacionais e nacionais de caracterização da QAI em escolas**

A preocupação com o problema da QAI em escolas tem, recentemente, vindo a crescer, sendo alvo de estudos nos países mais desenvolvidos.

Um estudo sobre a QAI em escolas europeias realizado pelo grupo HESE (*Health Effects of Schools Environment*), revelou um número de problemas comuns em várias escolas, particularmente uma ventilação fraca e uma falta de consciência e preparação para lidar com problemas ambientais [Csobod *et al.*, 2010].

Lee e Chang (2000) realizaram um estudo em cinco escolas da cidade de Hong Kong para avaliar o cumprimento da legislação em vigor em relação a alguns poluentes, mostrando uma má QAI relativa às concentrações de PM10 e CO<sub>2</sub>, já que ultrapassaram por diversas vezes o máximo recomendável.

Estudos desenvolvidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*, US-EPA) indicam que o nível de poluição do ar no interior dos edifícios escolares pode atingir valores duas a cinco vezes (ocasionalmente cem vezes) superiores aos níveis correspondentes obtidos para o ar exterior [US-EPA, 2000].

O trabalho efetuado por Gilbert *et al.* (2005) no Canadá revelou que baixas taxas de ventilação são determinantes para os níveis de formaldeído, acetaldeído (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O) e acroleína (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O) em espaços interiores, e que o fumo do tabaco é uma fonte importante de acetaldeído e acroleína.

Alguns estudos sugeriram que uma fraca QAI pode levar a uma redução da prestação intelectual por parte dos ocupantes, reduzindo a sua capacidade de efetuar tarefas como cálculos, uso da memória e outras funções que necessitem de concentração [Mendell e Heath, 2005; Shaughnessy *et al.*, 2006].

Relativamente a estudos nacionais, é de salientar o projeto SaudAr, focalizado em quatro escolas da cidade de Viseu, duas de zonas urbanas e duas de zonas suburbanas. O objetivo principal era avaliar a qualidade do ar (interior e exterior) e a saúde das crianças das escolas selecionadas. A metodologia seguida incluiu a realização de quatro campanhas de monitorização (em janeiro e junho de 2006 e 2007), para avaliar a influência de fatores sazonais na qualidade do ar e sua relação com a exposição e a saúde, bem como a modelação atmosférica à escala regional e local, o que permitiu estabelecer relações entre a qualidade do ar observada e o estado de saúde das crianças. O trabalho experimental incidiu nos poluentes mais característicos do ar

ambiente e do interior de edifícios (partículas, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, COVs - benzeno, tolueno, xileno e formaldeído, e radão), em duas épocas distintas do ano, inverno e verão. Os resultados do estudo mostraram, de um modo geral, uma boa qualidade do ar na cidade de Viseu, apesar de haver um registo de concentrações elevadas de partículas no inverno, tendo-se também verificado que as crianças que vivem nas zonas urbanas estão mais expostas a PM<sub>10</sub>, enquanto que as que moram em zonas suburbanas estão mais expostas a O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e COVs [Borrego *et al.*, 2008].

Pegas *et al.* (2011) realizaram um estudo em várias escolas da cidade de Lisboa para avaliar as concentrações interiores e exteriores de vários poluentes e identificar as possíveis fontes e atividades que contribuíam para os níveis medidos. Os valores obtidos demonstraram que as concentrações de CO<sub>2</sub> e material microbiológico (bactérias e fungos) ultrapassaram os valores impostos pela legislação portuguesa para a QAI (Decreto-Lei nº 79/2006, de 4 de abril) e que as emissões de tráfego e as fontes interiores (alguns acabamentos arquitetónicos, revestimentos do pavimento, produtos de consumo e limpeza) são as principais origens dos poluentes analisados.

Em Aveiro, a temática da QAI em escolas também já foi alvo de estudo. No ano de 2010 foram recolhidas amostras (durante um período de duas semanas) no interior e no exterior de duas escolas básicas da cidade, com o objetivo de caracterizar química e biologicamente as partículas suspensas no ar (PM<sub>10</sub>) [Silva, 2010]. Para além de PM<sub>10</sub>, foram também analisadas amostras de CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, COVs e de microrganismos. Os resultados permitiram concluir que as concentrações de PM<sub>10</sub> no interior das salas de aula foram significativamente mais elevadas do que no exterior, como aliás se verificou igualmente para o CO<sub>2</sub>, COVs e microrganismos, indicando assim a existência de possíveis fontes emissoras no interior, para além da ressuspensão de partículas através dos movimentos dos alunos. Outra das conclusões prende-se com o facto de os poluentes estudados terem excedido por diversas vezes os valores máximos legislados.

Entre início de 2010 e Outubro de 2012, o projeto SINPHONIE – *Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe*, juntou 38 instituições de 25 diferentes países (entre os quais a Universidade de Aveiro), com o intuito de reunir informação sobre a QAI em escolas europeias e sobre o estado de saúde das crianças. Os resultados tiveram como objetivo produzir um conjunto de boas práticas e recomendações sobre a QAI nas escolas, bem como consciencializar as crianças, pais, professores e funcionários acerca da importância desta temática.

### **2.3. Fontes de contaminação interiores e exteriores**

Os poluentes encontrados no interior dos edifícios apresentam uma grande variedade de origens, que se podem dividir em fontes internas, que incluem as atividades de manutenção, renovação e remodelação de edifícios e as atividades dos seus ocupantes, bem como externas, através do contributo da poluição exterior. As principais fontes de contaminantes do ar interior são [Csobod *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2004]:

- Poluição do ar ambiente (devido ao tráfego, emissões de instalações industriais, deposição e tratamento de resíduos sólidos) que penetra no edifício através do sistema de ventilação ou ar condicionado ou por infiltração;
- Materiais de construção e mobiliários (revestimentos de paredes e chãos, tintas, e materiais de isolamento);
- Os processos que ocorrem dentro dos edifícios, tais como os processos de combustão (para aquecimento ou confeção de alimentos), ventilação e de ar condicionado (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado - AVAC), e o uso de impressoras e fotocopiadoras;
- Os ocupantes em si e as suas atividades (tabagismo, utilização de produtos de limpeza, desinfeção e pesticidas, ou a existência de animais e plantas).

De referir que, na Europa, a mais importante fonte de poluição que afeta a QAI é o fumo de tabaco [AEA, 2007; WHO, 2007].

Para além da atividade humana, certos parâmetros como a humidade, temperatura e ventilação também influenciam o ar ambiente interior. A seguir, na Tabela 1 são apresentados alguns destes fatores, bem como as suas fontes.

Tabela 1: Fatores e fontes que afetam a QAI [APA, 2009].

Fatores	Fontes
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Número de pessoas, queima de combustíveis fósseis (gás, aquecedores, etc.)
Monóxido de carbono (CO)	Emissões de veículos (garagens, entradas de ar), combustão, fumo do tabaco
Formaldeído	Madeira prensada, contraplacado não selado, isolamento com resinas, tecidos, cola, carpetes, mobiliário
Partículas	Fumo, entradas de ar, papel, isolamento de tubagens, carpetes, filtros de AVAC, ressuspensão
Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)	Fotocopiadoras e impressoras, computadores, carpetes, mobiliário, produtos de limpeza, tintas, adesivos, calafetagem, perfumes, laca, solventes
Matéria microbiana	Água estagnada em sistemas de AVAC, materiais molhados e húmidos, desumidificadores, condensadores das torres de arrefecimento ( <i>chillers</i> ), torres de refrigeração
Temperatura e valores extremos de humidade	Deficiente controlo de humidade, incapacidade do edifício de compensar situações meteorológicas extremas, número de equipamentos instalados e densidade de ocupação
Ventilação inadequada	Medidas de poupança de energia e manutenção, má conceção do projeto do sistema de AVAC, operação deficiente de funcionamento do AVAC, alteração do sistema de funcionamento do AVAC pelos ocupantes

#### 2.4. Medidas de controlo da QAI

A gestão da QAI é dificultada não só pelo grande número e variabilidade dos espaços interiores, mas também pelas complexas relações da QAI e do design dos edifícios, materiais de construção, operação e manutenção, ventilação, e comportamento dos habitantes [WHO, 2006].

Durante os últimos anos houve alterações profundas a nível técnico e socioeconómico que influenciaram o planeamento e a construção de edifícios, levando à introdução de novos processos de construção, mais rápidos e de menor custo. Devido à crise do petróleo na década de 70, as preocupações nas estruturas dos edifícios focalizaram-se mais no seu isolamento. O aumento da estanquicidade dos edifícios para poupança de energia provocou um empobrecimento da QAI, levando ao aparecimento do problema da “Síndrome do Edifício Doente” [Wood, 2003]. Associado a estas alterações, o facto de as pessoas permanecerem a maior parte do seu tempo em espaços interiores,



ajudou ao aumento de alergénios no interior destes espaços, como ácaros, fungos e baratas. Estima-se que entre 20 a 30% dos edifícios existentes expõem os seus ocupantes a condições ambientais responsáveis por desconforto, doenças e consequente diminuição de produtividade [Woods, 1991].

Em termos gerais, as medidas de controlo da QAI recomendadas pela OMS consistem na remoção, substituição ou modificação da fonte emissora, ventilação dos espaços interiores, purificação do ar e alteração comportamental [WHO, 1997]. Então, para o controlo da QAI no interior dos edifícios, as medidas preventivas a ter em conta são as seguintes:

- Utilização de produtos, materiais e equipamentos pouco poluentes (de limpeza, decoração, etc.);
- Localização correta dos sistemas de AVAC nos edifícios, longe de focos de poluição exterior;
- Proibição de fumar nos espaços interiores;
- Dimensionamento correto dos sistemas de climatização;
- Otimização das taxas de ventilação;
- Garantir o equilíbrio entre a eficiência energética, isolamento térmico e a QAI do edifício;
- Gestão adequada de atividades e ocupação dos espaços;
- Alterações nos hábitos dos ocupantes.

Estas medidas visam garantir bons níveis de QAI, que associada ao conforto térmico e à eficiência energética constituem as bases do conceito de edifício sustentável ou verde, ou seja, um edifício capaz de satisfazer as necessidades dos seus ocupantes sem prejudicar a capacidade dos sistemas ambientais de satisfazerem as necessidades das gerações futuras.

Em Portugal, a QAI é regulada pelo Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE), descrito no Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de abril, que define qual a concentração máxima de poluentes permitida em espaços interiores, bem como os valores mínimos de ventilação por pessoa ou por área, de acordo com o tipo de atividade. Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os valores máximos de poluentes e mínimos de ventilação para os edifícios escolares, de acordo com o referido decreto-lei.

**Tabela 2:** Concentração máxima de poluentes permitida em espaços interiores (n.ºs 8 e 9 do artigo 29.º e Anexo VII, Decreto-Lei 79/2006).

Parâmetros	Concentração máxima de referência
PM10	0,15 mg/m <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub>	1800 mg/m <sup>3</sup>
CO	12,5 mg/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	0,2 mg/m <sup>3</sup>
Formaldeído (H <sub>2</sub> CO)	0,1 mg/m <sup>3</sup>
COVs totais	0,6 mg/m <sup>3</sup>
Radão	400 Bq/m <sup>3</sup>
<i>Legionella</i>	100 UFC/L
Microrganismos (bactérias e fungos)	500 UFC/m <sup>3</sup>

**Tabela 3:** Caudais mínimos de ar novo por pessoa para espaços escolares (Anexo VI, Decreto-Lei 79/2006).

Tipo de atividade		Caudais mínimos de ar novo [m <sup>3</sup> /(h.ocupante)]
Escolas	Salas de aula	30
	Laboratórios	35
	Auditórios	30
	Bibliotecas	30
	Bares	35

Os valores presentes nas Tabelas 2 e 3 não têm uma referência temporal, visto estar em falta na legislação.

## 2.5. Modelos numéricos para a estimativa da QAI

Os modelos numéricos de QAI destinam-se a caracterizar, temporal e espacialmente, as concentrações de poluentes no ar interior, e deste modo inferir sobre a exposição de indivíduos ou grupos de indivíduos a determinados poluentes atmosféricos em microambientes específicos (como o trabalho, a habitação, ou o automóvel). Em termos de formulação numérica, a Equação (1) expressa matematicamente o princípio da

conservação da massa aplicado à estimativa da QAI. Tendo por base os vários fatores que afetam a QAI (já referidos nas secções anteriores), indica que a alteração da concentração de poluentes no ar interior é determinada pelas emissões de fontes internas, penetração do ar ambiente e pela ventilação do edifício (que pressupõe quer a entrada, quer a saída de poluentes, ou seja, expressa a transferência *Outdoor/Indoor*, ou simplesmente O/I) [Guo, 2002].

$$V \frac{dC}{dt} = R + p Q C_{amb} - QC \quad (1)$$

Onde:

- V – volume do edifício ou compartimento considerado;
- $\frac{dC}{dt}$  – variação temporal da concentração do poluente no ar interior;
- R – taxa de emissão do poluente por fontes interiores;
- p – fator de penetração O/I do poluente;
- Q – taxa de ventilação do edifício/compartimento;
- $C_{amb}$  – concentração do poluente no ar ambiente;
- C – concentração do poluente no ar interior.

Os modelos de balanço mássico, baseados na Equação (1), são usados para simular as concentrações médias de poluentes do ar interior em função das concentrações exteriores e das características dos edifícios, incluindo as fontes internas. Estes constituem a maioria dos modelos atualmente disponíveis, podendo ser divididos em três tipos: modelos de regressão, modelos microambientais e modelos multi-zona [Garden *et al.*, 2011].

Várias técnicas de modelação têm sido desenvolvidas para estudos da QAI. O trabalho de Chaloulakou e Mavroidis (2002) usou a formulação do balanço mássico de Hayes (1989) para simular as concentrações de CO num edifício escolar público em Atenas, Grécia. Um estudo por Dimitroulopoulou *et al.* (2006) sobre modelação da QAI em habitações no Reino Unido resultou no modelo INDAIR, que permite prever as concentrações de poluentes atmosféricos (NO<sub>2</sub>, CO, PM10 e PM2.5) em microambientes domésticos no Reino Unido, sob diferentes cenários de emissões. Montoya *et al.* (2009) utilizou vários modelos para estimar as concentrações de poluentes interiores em função das concentrações exteriores no caso de uma libertação acidental ou ataque químico envolvendo substâncias tóxicas [Adefeso *et al.*, 2011]. O modelo de exposição individual

(EMI - *Exposure Model for Individuals*) [Breen *et al.*, 2010] é um modelo com importância para os estudos de saúde da população, pois estima a concentração da matéria particulada. O EMI prevê exposições pessoais a partir de concentrações exteriores de poluentes e informações de questionários, como fontes internas e padrões de atividade - tempo. O modelo IAQX, previamente designado STKi, [Guo, 2000a] permite calcular o perfil concentração-tempo em espaços interiores, complementando esta informação com a estimativa das taxas de ventilação adequadas para melhorar a QAI. Este foi o modelo selecionado para utilizar neste estudo, pelo que será feita no Capítulo 3 uma descrição mais detalhada.

Com o intuito de desenvolver modelos mais adequados à realidade Portuguesa, foram concebidos no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, os modelos MEXPO [Costa, 2008; Costa *et al.*, 2009] e doseAr [Valente, 2011], sobre os quais importa realçar as características mais significativas.

O MEXPO [Costa, 2008; Costa *et al.*, 2009] é um modelo de exposição tridimensional de microescala a poluentes atmosféricos de curto-termo, incluindo na sua estrutura de funcionamento o modelo CFD de qualidade do ar VADIS. Este modelo utiliza a definição integrada da exposição para avaliar a exposição individual a poluentes atmosféricos em áreas urbanas, com base no conceito de microambiente, simulando também as taxas de ventilação natural e as concentrações de poluentes no interior dos edifícios. Tem como dados de entrada as emissões de tráfego (taxa de emissão e localização das fontes emissoras), características dos edifícios (volumetria, localização, área das janelas), e as condições fronteira (meteorologia e concentrações de poluentes). O esquema representativo do funcionamento do modelo MEXPO está representado na Figura 3, juntamente com os dados de entrada necessários para correr o modelo.

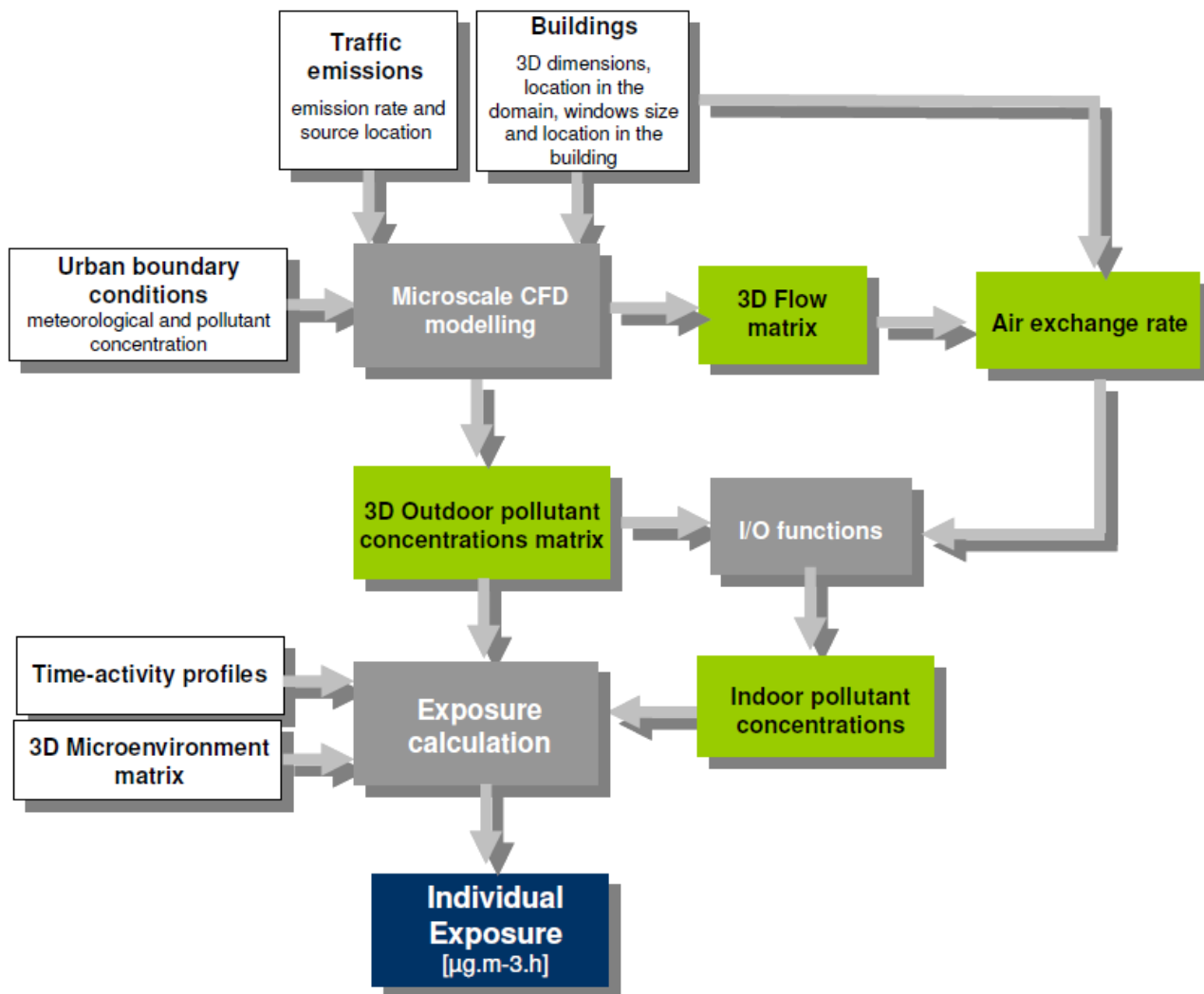


Figura 3: Metodologia de funcionamento do modelo MEXPO [Costa, 2008].

Em relação ao modelo doseAr [Valente, 2011], a sua aplicação permite o cálculo da exposição e da dose inalada individuais de um ou vários poluentes atmosféricos, podendo ser utilizado autonomamente ou com modelos de qualidade do ar (MM5/CHIMERE, por exemplo). O doseAr tem como parâmetros de entrada os perfis atividade/tempo dos indivíduos, a identificação e localização dos microambientes frequentados, e as concentrações dos poluentes para os quais se quer calcular a exposição e dose inalada.

A exposição e a dose inalada individual de cada indivíduo, para cada poluente, é calculada pelo modelo doseAr de acordo com as Equações (2) e (3), respetivamente [Hertel *et al.*, 2001; US-EPA, 1997]:

$$exp_{ij} = C_j \times t_{ij} \quad (2)$$

Sendo:

- exp – exposição;
- i – indivíduo;
- j – microambiente;
- $C_j$  – concentração do poluente no microambiente j;
- $t_{ij}$  – tempo que o indivíduo i passa no ambiente j.

$$dose_{ij} = C_j \times t_{ij} \times V_{ij} \quad (3)$$

Com:

- dose – dose inalada;
- i – indivíduo;
- j – microambiente;
- $C_j$  – concentração do poluente no microambiente j;
- $t_{ij}$  – tempo que o indivíduo i passa no ambiente j;
- $V_{ij}$  – taxa de ventilação do indivíduo i no microambiente j.

Tal como é possível verificar, os modelos de QAI necessitam de informação relativa à concentração de poluentes atmosféricos no ar ambiente. Para tal, é possível recorrer à monitorização da QA ou a modelos numéricos de QA, os quais apresentam a vantagem de permitir um melhor conhecimento da distribuição espacial dos poluentes. Dependendo do objetivo do estudo, podem ser utilizados modelos com diferentes resoluções espaciais. Segundo o relatório da Agência Europeia do Ambiente [AEA, 2011b], *“The application of models under the European Union's Air Quality Directive: A technical reference guide”*, os modelos de QA podem ser distinguidos, com base na escala espacial da aplicação, em modelos à escala local (1-1000 m), urbana (1-300 km) e regional (25-10000 km).

### 3. Simulação numérica da QAI

#### 3.1. Caso de estudo

O caso de estudo desta dissertação centra-se na cidade de Aveiro (Figura 4). Localizada no litoral Noroeste de Portugal, na região do Baixo Vouga, distando 78 km da cidade do Porto e 275 km da cidade de Lisboa, Aveiro é uma importante área industrial e comercial, e um ponto estratégico para o comércio internacional, beneficiando de várias redes de transportes, incluindo ligações rodoviárias, ferroviárias e marítimas. O município de Aveiro cobre uma área de 200 km<sup>2</sup>, tem uma população de 78.463 habitantes divididos em 14 freguesias, e um campus universitário com cerca de 15.000 alunos [Amorim *et al.*, 2010a].

O clima da cidade de Aveiro é temperado, caracterizado por verões quentes e secos e invernos frios e chuvosos. A temperatura e a precipitação cumulativa média anual são cerca de 15,5 °C e 908 mm, respetivamente. Os ventos predominantes ao longo do ano são de noroeste (NW) e sudeste (SE), de manhã, e de noroeste, à tarde. Devido à proximidade do Oceano Atlântico, esta região é influenciada por circulações de brisa marinha, com um impacto significativo sobre o padrão de transporte e dispersão de poluentes atmosféricos [Amorim *et al.*, 2010a; <sup>2</sup>].

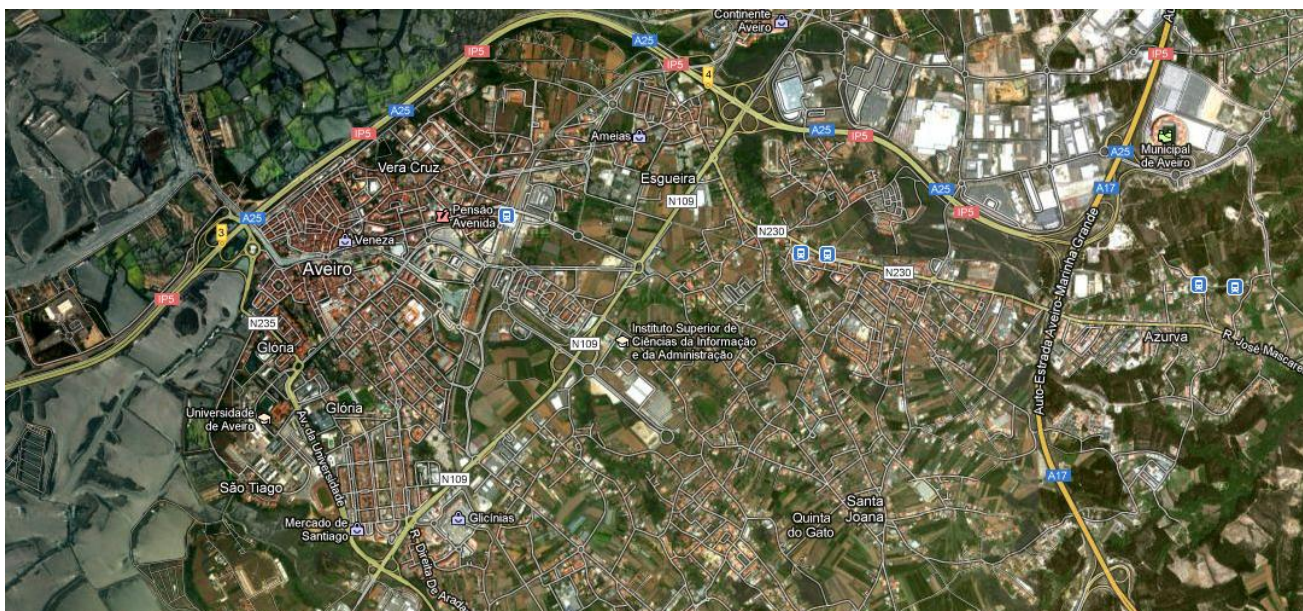
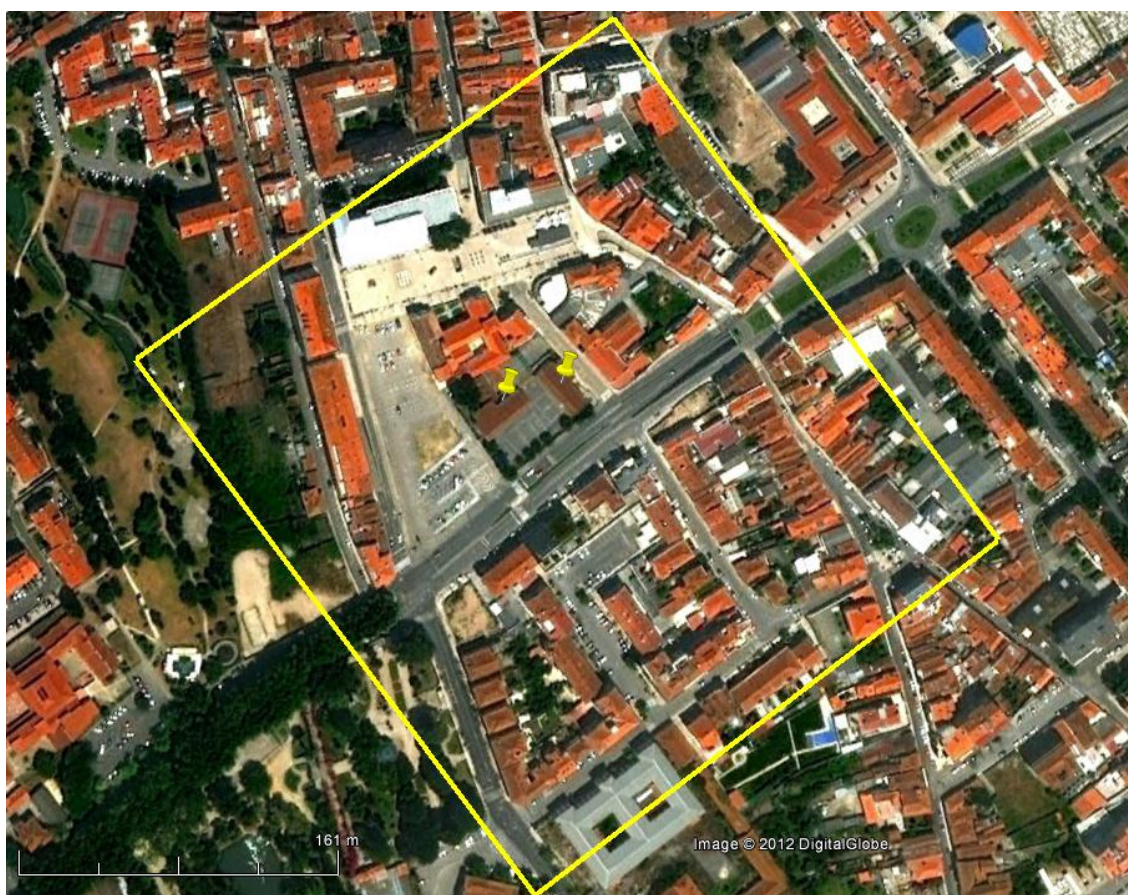


Figura 4: Vista aérea da cidade de Aveiro (Fonte: Google Maps, 2011).

<sup>2</sup> <http://pt.wikipedia.org/wiki/Aveiro>



Para efetuar este trabalho, selecionou-se uma escola no concelho de Aveiro adequada para o objetivo traçado. A escola escolhida foi a Escola Básica nº 1 da Glória, situada na rua Gustavo Ferreira Pinto Basto, na freguesia da Glória (Figura 5). Situa-se na parte sul da cidade, inserida numa das zonas mais movimentadas, pois à sua frente fica a avenida Santa Joana que é uma das vias de acesso à cidade. É ladeada a norte pelo Museu de Aveiro e Sé Catedral e a sul pelo Parque da Cidade, Hospital e Universidade. Com o objetivo de simular a QA neste estabelecimento de ensino com um modelo CFD, definiu-se uma área de 348 m x 294 m para o domínio de estudo.



**Figura 5:** O domínio de estudo, com a indicação da Escola Básica nº 1 da Glória (Fonte: *Google Earth*, 2012).

Esta escola iniciou a sua atividade na década de 60 e é constituída por dois blocos, contendo, cada um deles, seis salas de aula, que se encontram distribuídas em dois pisos (Figura 6). Existem ainda quatro gabinetes, uma biblioteca, um ginásio, uma cantina e vários pequenos espaços para arrecadação. O estabelecimento está rodeado



por um espaço exterior para convívio e lazer das crianças que o frequentam, que se encontra vedado por gradeamento e que possui alguma área coberta por telheiros [3].



**Figura 6:** Escola Básica nº 1 da Glória (Fonte: <http://www.eb1-n1-gloria-aveiro.rcts.pt/index.htm>).

### **3.2. Metodologia**

A simulação numérica da QAI na Escola Básica nº 1 da Glória compreendeu a realização de várias etapas. Em primeiro lugar, obtiveram-se todos os dados necessários para a simulação da QA ambiente com o modelo CFD VADIS, ou seja, os dados meteorológicos, as coordenadas tridimensionais dos edifícios e árvores do domínio de estudo definido e as emissões do tráfego rodoviário nas vias contíguas à escola. Posteriormente, simularam-se as concentrações de fundo com o modelo EURAD e, através do modelo IAQX, fez-se a avaliação da QAI numa das salas da Escola Básica nº 1 da Glória.

No esquema da Figura 7 são apresentadas as etapas seguidas para atingir o objetivo desta dissertação.

<sup>3</sup> <http://www.eb1-n1-gloria-aveiro.rcts.pt/index2.htm>

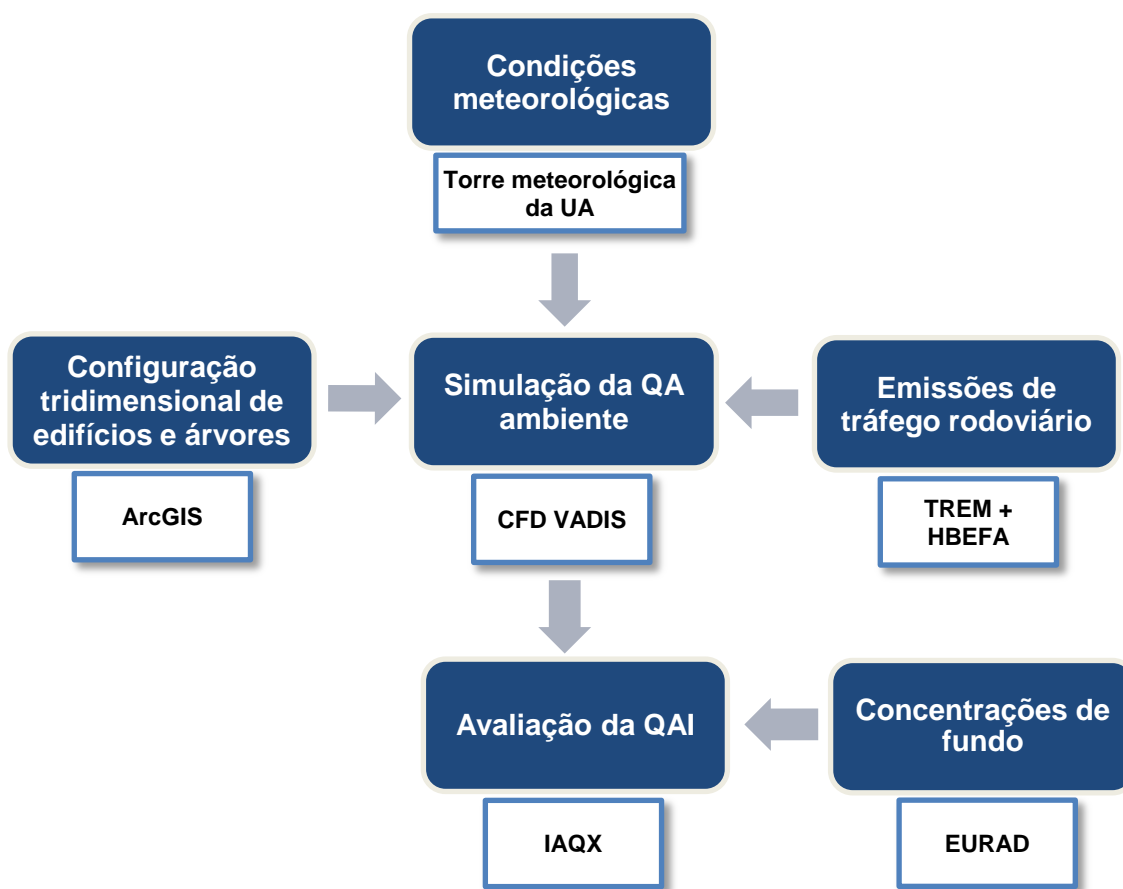


Figura 7: Metodologia seguida para a estimativa da QAI na Escola Básica nº 1 da Glória.

### 3.3. Simulação CFD da QA exterior

Com o objetivo de simular as concentrações exteriores de poluentes atmosféricos na Escola Básica nº 1 da Glória, recorreu-se a um modelo CFD de QA desenvolvido no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro: o modelo VADIS [Borrego *et al.*, 2003b]. O modelo foi validado com medições em túnel de vento e em aplicações de casos reais, demonstrando um bom desempenho no cálculo do fluxo e dispersão de poluentes em torno de obstáculos sob condições de vento variáveis.

A aplicação do VADIS a diferentes casos citadinos, cada um caracterizado por condições de entrada específicas, demonstrou a sua capacidade de prever a qualidade do ar para diferentes cenários de tráfego, confirmando a importância desta ferramenta numérica no apoio político. A interpretação dos resultados do modelo permite a obtenção de valores de referência de qualidade do ar na área simulada, que podem ser utilizados

na gestão de tráfego e no planeamento de emergências, como uma forma de melhorar a qualidade de vida dos cidadãos [Borrego *et al.*, 2003b; Tchepel *et al.*, 2010].

A variação da direção do vento associada a baixas velocidades, consideradas como condições meteorológicas críticas em termos de poluição atmosférica, são as mais difíceis de simular. Um estudo sobre a importância das situações de vento fraco revelou que, em particular no Sul da Europa, estas situações podem acontecer em mais de 50% do tempo [Borrego *et al.*, 2002]. O modelo VADIS foi desenvolvido com o objetivo de estudar a dispersão de poluentes libertados para a atmosfera, em particular sob condições atmosféricas desfavoráveis, e na presença de obstáculos.

O VADIS é um modelo de escala local que permite estimar os campos de vento e de concentração de poluentes em áreas urbanas, considerando as emissões provenientes do tráfego rodoviário e a presença de edifícios no escoamento atmosférico. É constituído por dois módulos independentes: FLOW e DISPER. Na Figura 8 estão representados os dados de entrada e saída de cada um dos módulos.

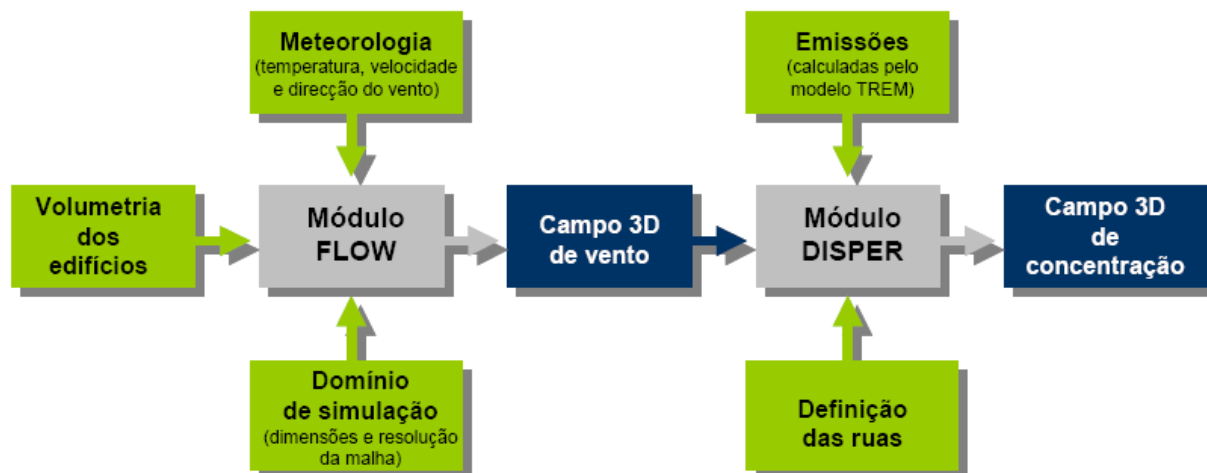


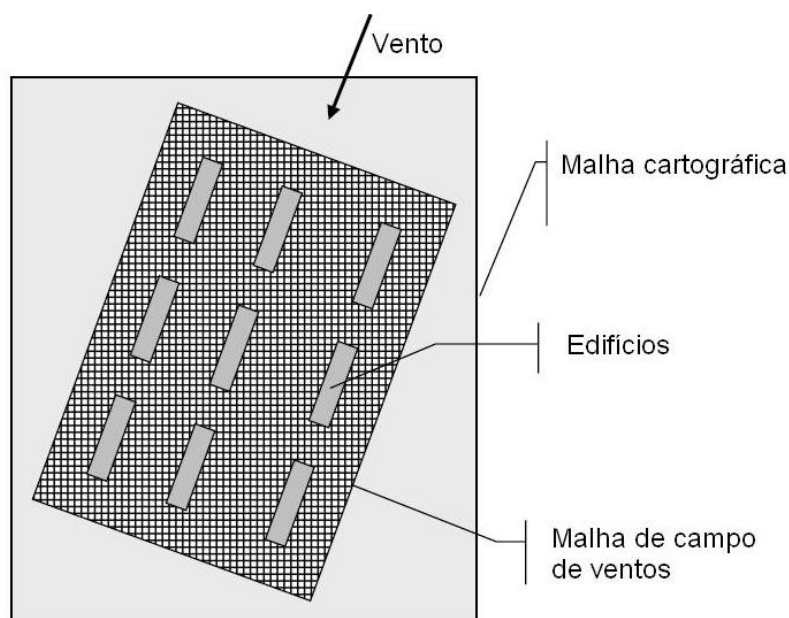
Figura 8: Estrutura de funcionamento do modelo VADIS [Borrego *et al.*, 2003b].

O módulo FLOW calcula o campo de ventos com base nas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS, no acrónimo em Inglês) para o escoamento estacionário na camada limite e em regime turbulento. O fecho do sistema de equações é feito através da aproximação k- $\epsilon$ . O campo de ventos é calculado sobre uma malha euleriana cartesiana tridimensional. Tem ainda a capacidade para determinar os campos de pressão, de turbulência e de temperatura. O módulo DISPER utiliza o campo de velocidades e a informação sobre a turbulência determinados no módulo FLOW, calculando o campo de concentração 3D de poluentes passivos através da aproximação

lagrangeana [Borrego et al., 2003b].

Os dados de entrada requeridos pelo módulo FLOW são os dados meteorológicos (temperatura, direção e velocidade do vento), e as coordenadas 3D dos edifícios e árvores. Como dados de saída, fornece os valores do campo 3D de vento. Em relação ao módulo DISPER, o campo 3D de ventos gerado pelo módulo FLOW, as emissões do tráfego, e a definição das ruas (localização e taxa de emissão) são os requisitos de entrada necessários, fornecendo o campo 3D de concentrações.

No funcionamento do VADIS são utilizadas duas malhas independentes, a cartográfica e a de campo de ventos (Figura 9). A malha cartográfica, orientada segundo os eixos cartesianos, suporta a localização e a definição dos edifícios e ruas. A malha de campo de ventos, alinhada com a direção do vento, calcula o campo de velocidades.

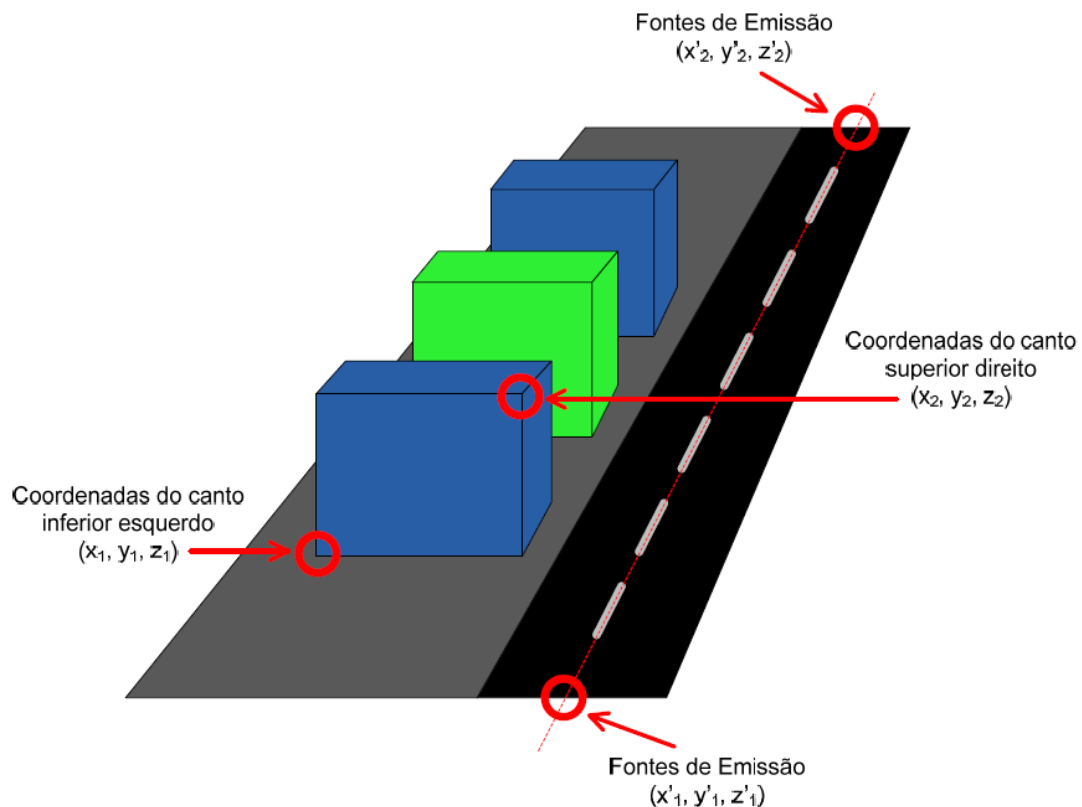


**Figura 9:** Representação da malha cartográfica e de campo de ventos  
[Borrego et al., 2002].

O fluxo é calculado considerando o conjunto de obstáculos definidos sobre uma malha regular cartesiana, a malha cartográfica, que tem a informação respeitante a posições e dimensões de obstáculos e de fontes de emissão. A malha de campo de ventos, sobreposta à malha cartográfica, está alinhada com a direção do vento [Borrego et al., 2003b].

Após referir o número de obstáculos presentes no domínio, o utilizador tem de identificar, para cada obstáculo, o tipo (i.e., edifício ou árvore), coordenadas e ângulo. Para cada um, o utilizador tem de definir as coordenadas extremas 3D (coordenadas do

canto inferior esquerdo e do canto superior direito,  $x_1, y_1, z_1$  e  $x_2, y_2, z_2$ ), como mostra a Figura 10, e o ângulo com a malha cartográfica ( $]0,90[$ ). Como o VADIS usa uma malha estruturada, os edifícios complexos têm de ser, previamente, divididos em paralelepípedos. O utilizador também deve definir a localização das fontes de emissão em linha, definindo para cada uma as coordenadas extremas 3D ( $x'_1, y'_1, z'_1$  e  $x'_2, y'_2, z'_2$ ), como indica a Figura 10.



**Figura 10:** Disposição dos obstáculos e fontes de emissão no modelo VADIS [Borrego *et al.*, 2002].

O VADIS tem a capacidade de identificar os obstáculos com sobreposição de coordenadas, o que facilita a descrição dos edifícios mais complexos.

Para o funcionamento do modelo, também é necessário definir as condições iniciais, a temperatura do ar e a velocidade e direção do vento medidos a uma altura de referência (normalmente 10 m).

### 3.4. Condições meteorológicas

Como foi referido na secção anterior, para a simulação da QA com o modelo VADIS é necessário introduzir dados de entrada referentes às condições meteorológicas, como temperatura, velocidade e direcção do vento.

A informação meteorológica foi obtida a partir das medições realizadas, a 10 m de altura, na torre meteorológica da Universidade de Aveiro, gerida pelo Departamento de Física. Os valores da velocidade e direcção do vento fornecidos estavam em médias temporais de 10 minutos, pelo que foram convertidos em médias horárias. Para isso, usaram-se as seguintes fórmulas de cálculo:

$$u = -U \times \sin(\text{Direção do vento, em radianos}) \quad (4)$$

$$v = -U \times \cos(\text{Direção do vento, em radianos}) \quad (5)$$

Sendo,

U = velocidade do vento.

$$\text{Velocidade média horária} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (6)$$

$$\text{Direção média horária} = \frac{360}{2\pi} \times \arctg(\bar{v}; \bar{u}) + 180 \quad (7)$$

Em que,

$\bar{u}$  e  $\bar{v}$  são as médias de u e v, respetivamente.

As condições meteorológicas durante o dia de simulação (11 de janeiro de 2012) estão representadas na Figura 11. Durante este período, a direcção do vento apresentou-se predominantemente de sudeste, com velocidades a variarem entre 0,2 e 2,5 m/s.

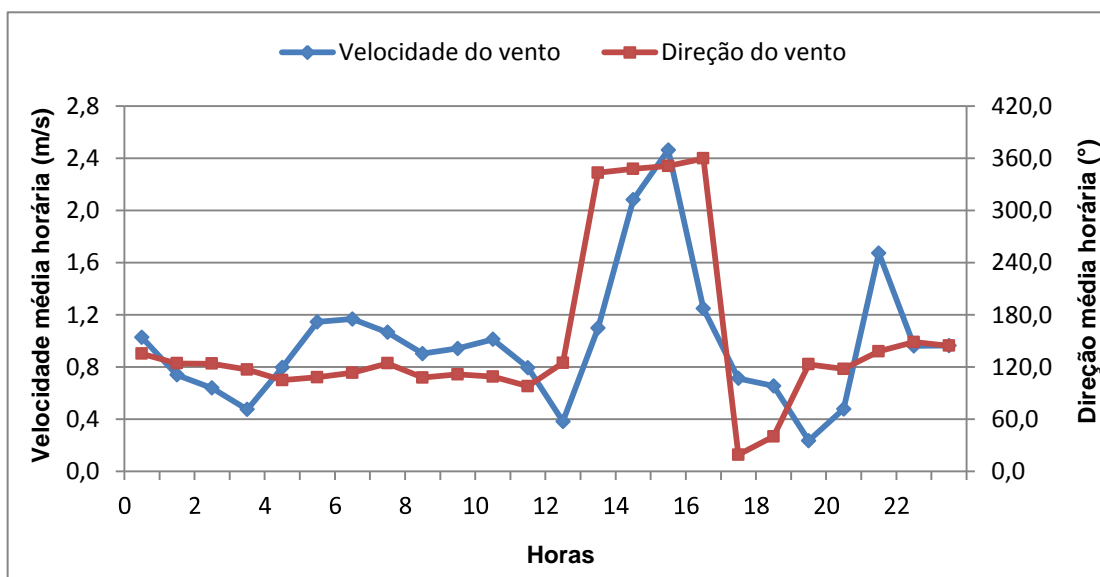


Figura 11: Valores médios horários da velocidade e direção do vento.

### 3.5. Configuração tridimensional de edifícios e árvores

A QA à escala local depende do tipo e formato dos edifícios, das vias de tráfego e das condições meteorológicas [Amorim *et al.*, 2004; Gromke *et al.*, 2008]. A elevada ocupação habitacional influencia a dispersão dos poluentes atmosféricos, provocando assim uma maior permanência dos poluentes ao nível do solo, o que contribui para a formação de *hot-spots*. Por este motivo, ruas estreitas com edifícios altos de ambos os lados tendem a acentuar o efeito da acumulação de poluentes [Vardoulakis *et al.*, 2003].

Para além disto, as árvores também são um aspeto a ter em conta na dispersão e permanência de poluentes em meios urbanos. A presença de árvores assume uma significativa importância, dado que interfere no processo de ventilação natural e, conseqüentemente, na dispersão das emissões provenientes do tráfego rodoviário. Estes efeitos variam em função da interação com as condições meteorológicas, configuração tridimensional dos edifícios, com o tipo de fontes de emissão e suas características [Amorim *et al.*, 2010b]. Em relação aos edifícios, as árvores produzem efeitos semelhantes sobre o escoamento e dispersão de poluentes em zonas urbanas, sendo que a diferença está no facto de os efeitos da vegetação variarem em função da porosidade e densidade da espécie de árvore [Gromke *et al.*, 2008].



Através do programa ArcGIS, e após a definição do domínio de estudo, apresentado na Figura 5, procedeu-se então à definição da configuração 3D dos edifícios e árvores presentes na área de estudo (Figura 12). Foi utilizado um ficheiro SIG fornecido pela Câmara Municipal de Aveiro (CMA). Tendo em conta que era necessário definir as alturas dos edifícios e árvores, recorreu-se a imagens 3D do *Bing Maps* para as estimar, considerando-se, no caso dos edifícios, uma altura média por andar de 2 m. Tanto os edifícios como as árvores foram aproximados a retângulos, devido à tipologia da malha de cálculo do modelo VADIS. Os edifícios, representados em 201 blocos, com alturas a variar de 2 até 12 m, e as árvores, definidas por 93 blocos, e alturas variáveis entre os 2 e os 12 m.



**Figura 12:** Representação tridimensional dos edifícios (a vermelho) e árvores (a verde) no domínio de estudo.

A interface gráfica do VADIS possibilitou a delimitação dos edifícios, árvores e fontes de emissão presente na Figura 13, permitindo garantir a inexistência de sobreposição entre obstáculos.



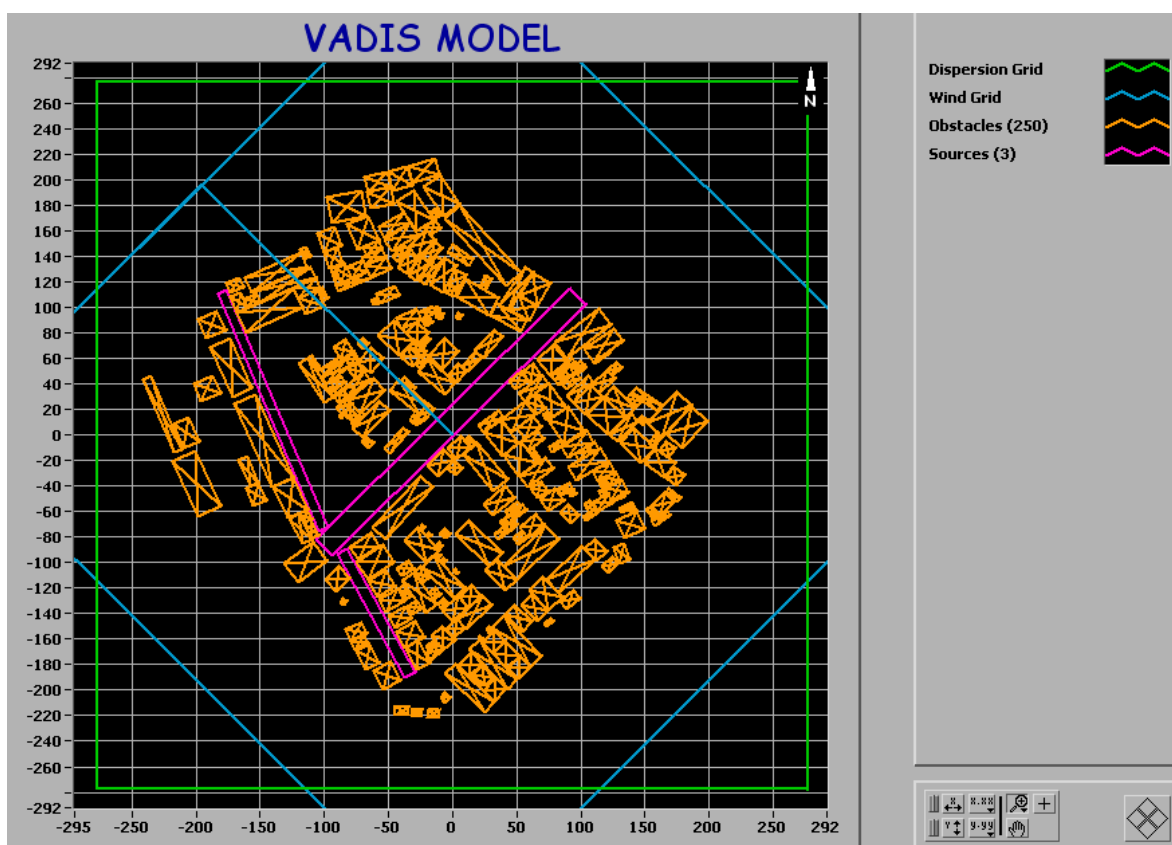


Figura 13: Domínio de estudo definido na interface do VADIS.

### 3.6. Estimativa das emissões de tráfego rodoviário

Para o cálculo das emissões do tráfego rodoviário foi utilizado o modelo TREM (*Transport Emission Model for Line Sources*) [Borrego *et al.*, 2003a], também desenvolvido no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. O modelo TREM tem como principal objetivo estimar as emissões do tráfego rodoviário com uma elevada resolução temporal e espacial, servindo de suporte à decisão na gestão da qualidade do ar.

As emissões dos veículos são descritas com base numa aproximação da velocidade média proposta pelos projetos MEET/COST319, e foi recentemente atualizado de acordo com a metodologia ARTEMIS. Esta aproximação considera vários padrões de condução de forma indireta através da velocidade média. Os fatores de emissão sugeridos pela metodologia foram obtidos a partir de dados recolhidos durante várias experiências europeias e estão baseados nas melhores correlações entre as medições de emissões e velocidade. Esta metodologia é recomendada para velocidades médias

acima dos 10 km/h e para aplicações em que a cinemática dos veículos não é relevante [Borrego *et al.*, 2003a].

Neste modelo, as estradas são consideradas como fontes em linha, onde as emissões são calculadas individualmente para cada segmento de estrada. Para facilitar o processamento dos dados espaciais e para melhorar a conversão dos dados de emissões resultantes para um formato necessário para os modelos de qualidade do ar, o TREM encontra-se associado a um Sistema de Informação Geográfica (ArcView) [Silva, 2009].

A informação de entrada requerida pelo TREM inclui basicamente dados espaciais da rede de estradas (comprimento das estradas, tipo de troços), informação estatística (distribuição por classe e categoria de veículos, propriedades do combustível), e o número total de veículos por troço. Os dados de saída do TREM correspondem às taxas de emissão (quentes, frias e evaporativas) de poluente por segmento de estrada, com uma resolução temporal idêntica à dos dados de volume de tráfego de entrada [Borrego *et al.*, 2003b].

Na estimativa efetuada consideraram-se as mesmas categorias e classes de veículos distinguidas pelo modelo. As categorias de veículos utilizadas foram os veículos ligeiros de passageiros (a gasolina, gasóleo e GPL), veículos ligeiros de mercadorias (a gasolina e gasóleo), veículos pesados de mercadorias (a gasolina e gasóleo), veículos pesados de passageiros, motociclos e novas tecnologias. O modelo distingue 350 classes de veículos, sendo cada uma identificada através do parâmetro  $k$ , que varia desde  $k1$  a  $k350$ .

No que diz respeito à caracterização da frota de veículos, foi necessário conhecer a sua distribuição pelas diferentes classes e categorias. Foi utilizada informação relativa à idade dos veículos para definir a correspondência entre a tecnologia dos veículos e os limites de emissão impostos na data de fabrico dos mesmos, resultando na distribuição dos veículos pelas diferentes classes. Para tal, foram utilizados os dados da Associação Automóvel de Portugal (ACAP) com a idade e o número de veículos do Parque Automóvel em Portugal relativos a dezembro de 2010. Através destes dados foram atribuídas diferentes percentagens de veículos aos diferentes limites de emissão.

Com os dados apresentados na *Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases* [Pereira *et al.*, 2009], conseguiu-se fazer a distribuição de veículos por categorias e por tipo de combustível. Desta maneira, obtiveram-se todos os dados de entrada necessários ao cálculo das emissões do tráfego rodoviário com o TREM.

O modelo permite a quantificação das emissões para os seguintes poluentes: CO, óxidos de azoto (dados como NO<sub>2</sub> equivalente), Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos (COVNM); CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e partículas.

Dado que o TREM está baseado no pressuposto de uma velocidade média de circulação dos veículos, e a zona em estudo ser caracterizada pela presença de semáforos nas vias de circulação contíguas à Escola Básica nº 1 da Glória, mostrou-se necessário complementar as estimativas realizadas com o cálculo das emissões dos veículos imobilizados nos semáforos. Desta forma, recorreu-se ao HBEFA, *Handbook Emission Factors for Road Transport*, [HBEFA, 1999] para se obter as emissões dos veículos para situações de *stop & go*.

### **3.7. Modelação das concentrações de fundo**

Dado que na rede de monitorização da QA (QUALAR) da região Centro nenhuma das estações de fundo realiza medições de CO (poluente em análise no trabalho) foi necessário recorrer à modelação de mesoscala através do modelo EURAD (*European Air Pollution Dispersion*).

O modelo EURAD simula os processos físicos, químicos e dinâmicos que controlam a emissão, produção, transporte e deposição de espécies atmosféricas, fornecendo as concentrações destas espécies na troposfera [Kessler *et al.*, 2001]. Desenvolvido pelo *Rhenish Institute for Environmental Research* da Universidade de Colónia [Elbern *et al.*, 2007; Strunk *et al.*, 2010], apresenta na sua estrutura o modelo meteorológico de mesoscala MM5 do *National Center for Atmospheric Research*, como mostra a Figura 14:

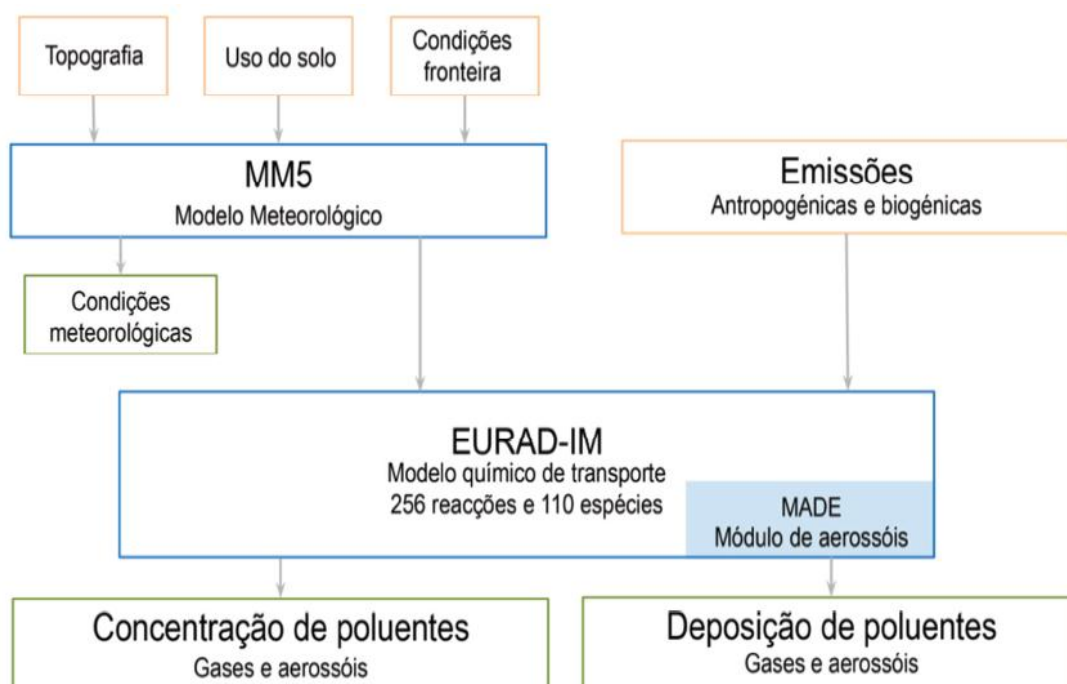


Figura 14: Estrutura de funcionamento do modelo EURAD [Elbern *et al.*, 2007; Strunk *et al.*, 2010].

Os dados de entrada do EURAD incluem a informação meteorológica fornecida pelo modelo MM5, emissões antropogénicas e biogénicas, condições fronteira, e a caracterização fisiográfica da região, topografia e uso do solo. Os resultados de saída compreendem os campos de concentração e deposição de poluentes gasosos e aerossóis.

Tem sido aplicado para a simulação de um grande número de episódios de poluição do ar, a maioria dos casos centrados no ozono e noutros foto-oxidantes. O modelo tem sido utilizado na análise das alterações de emissões como contributo para o desenvolvimento de estratégias para a redução dos níveis da poluição atmosférica na Europa [Memmesheimer *et al.*, 2002]. Para além disso, são disponibilizadas através da internet ([www.eurad.uni-koeln.de](http://www.eurad.uni-koeln.de)) previsões diárias da QA obtidas com o modelo.

Em Portugal, o modelo EURAD foi aplicado e validado pela Universidade de Aveiro [Borrego *et al.*, 2011], com o objetivo de prever a QA para três dias.

As simulações com o modelo EURAD foram referentes ao dia 11 de janeiro de 2012. Utilizaram-se as concentrações de fundo médias horárias para a célula de Aveiro, que tinha uma resolução espacial de  $5 \times 5 \text{ km}^2$ .

### 3.8. Modelação da QAI

O modelo selecionado para avaliar a QAI nas salas de aulas da Escola Básica nº 1 da Glória foi o modelo IAQX. Apesar de existirem dois modelos desenvolvidos na Universidade de Aveiro (MEXPO e doseAr), escolheu-se o IAQX pela simples razão de ter sido o primeiro modelo de QAI abordado para o trabalho. Este é um *software* de estimativa da QAI composto por cinco programas de simulação, um de propósito geral que realiza simulações multi-zona e multi-polvente, e os outros quatro para simulações com propósitos especiais, como indica a Tabela 4:

**Tabela 4:** Programas incluídos no IAQX [Guo, 2000a].

Número	Programa	Propósito	Fonte
1	GPS.EXE	Programa de simulação multi-zona e multi-polvente	Guo (1996)
2	VBX.EXE	Modelos para a previsão das emissões de COVs a partir de materiais de revestimento interior à base de solventes	Guo, <i>et al.</i> (1999)
3	SPILL.EXE	Modelos para derrames interiores de solventes	Reinke e Brosseau (1997); Drivas (1982)
4	SLAB.EXE	Modelo para as emissões de COVs de placas homogéneas de difusão controladas, tais como os revestimentos protetores de tapetes novos	Little, <i>et al.</i> (1994)
5	PM.EXE	Modelo para partículas	Nazaroff e Cass (1989)

O modelo executa a simulação da QAI, calcula o perfil de concentração-tempo, a exposição por inalação e estima as taxas de ventilação adequadas para melhorar a QAI. Os parâmetros de entrada requeridos englobam a dimensão do compartimento, as taxas de ventilação, as fontes de poluição do ar interior e os aparelhos de limpeza de ar. Como dados de saída, o IAQX fornece as concentrações de poluentes no ar interior e a exposição individual [Guo, 2000b].

Além de realizar as simulações convencionais de QAI, que calculam a concentração de poluentes e a exposição pessoal em função do tempo, o IAQX pode estimar a taxa de ventilação adequada quando certos critérios de qualidade de ar necessitam de ser satisfeitos. Esta característica é uma vantagem em relação aos outros

modelos de exposição *indoor*.

Como referido anteriormente, o modelo IAQX executa cinco programas de simulação. Para o caso de estudo, achou-se mais conveniente a utilização do programa GPS.EXE, pois trata-se de um modelo multi-zona e multi-polvente, de propósito geral.

Com o IAQX são necessárias quatro etapas para realizar uma simulação de QAI: definir o modelo de QAI, compilar o modelo, executar a simulação e analisar os resultados. A simulação iniciou-se pela definição do modelo de QAI a utilizar. A primeira coisa a fazer foi definir o número de compartimentos (“*air zones*”) a considerar, bem como o nome e volume de cada zona (Figura 34 em Anexo), até um máximo de 10 zonas. Como o presente trabalho incidiu sobre uma sala de aula, apenas foi preciso definir um compartimento.

Seguidamente, definiu-se a taxa de ventilação da sala de aula, considerando-se um valor de 42 m<sup>3</sup>/h (Figura 35 em Anexo), já que foi esta a taxa de ventilação medida pelo grupo de trabalho do projeto SINPHONIE no interior de uma das salas de aulas da Escola Básica nº 1 da Glória.

No passo seguinte foi adicionado o modelo de fonte de emissão que mais se adequava à situação. Como se pretendia utilizar as concentrações dos poluentes exteriores para se obter as concentrações interiores, usou-se o modelo *Ambient air as a time-varying source* (Ar ambiente como fonte variável de tempo) na simulação de QAI, dado pela seguinte equação:

$$E_i(t) = Q_{0,i} \times f \times C(t) \quad (8)$$

Sendo:

- $E_i(t)$  – Taxa de infiltração do polvente para a zona  $i$ , mg/h;
- $Q_{0,i}$  – Taxa de ventilação do exterior para a zona  $i$ , m<sup>3</sup>/h;
- $f$  – Fator de penetração do polvente ( $0 < f \leq 1$ ), adimensional;
- $C(t)$  – Concentração exterior do polvente, mg/m<sup>3</sup>.

Em relação ao fator de penetração, que mede a capacidade de infiltração de um polvente num edifício, assumiu-se um valor de 1. Como é aceite que em edifícios com ventilação natural, a estrutura do edifício não apresenta uma barreira a poluentes não reativos [Thatcher e Layton, 1995], e tendo em conta que o CO é um gás com uma baixa reatividade no interior de edifícios, considerou-se a utilização do valor de 1 para o fator de penetração do CO [US-EPA, 1991].

O último passo da definição do modelo de QAI compreendeu a especificação das condições da simulação, nomeadamente o período de simulação e o número de pontos nos resultados de saída, e dos dados de entrada (Figura 36 em Anexo). O período de simulação definido foi de 24 horas, compreendendo 24 simulações horárias. Depois, apenas teve que se introduzir os dados de entrada: as concentrações exteriores dos poluentes simulados no VADIS junto às janelas da sala de aula em estudo, e os fatores de penetração.

A etapa seguinte foi a compilação do modelo. Aqui o programa compila o nosso modelo, detetando erros nos dados de entrada, e caso não haja nenhuns, lendo todos os parâmetros.

Com tudo operacional, procedeu-se à simulação propriamente dita. Dependendo da complexidade do nosso modelo, da duração do período de simulação, e da velocidade do nosso computador, o tempo necessário para completar uma simulação pode variar muito, desde alguns segundos a alguns minutos.

Os resultados de saída obtidos são apresentados na página “*Output*” do IAQX (Figura 37 em Anexo).

## **4. Campanha de monitorização**

Durante o período de 9 a 13 de janeiro de 2012, foi realizada uma campanha de monitorização da qualidade do ar no local de estudo. Nessa semana cumpriram-se medições no exterior e interior da Escola Básica nº 1 da Glória, com o intuito de, posteriormente, serem comparados os valores medidos com os valores simulados da concentração de poluentes.

### ***4.1. Tráfego rodoviário***

Para proceder ao cálculo das emissões do tráfego rodoviário através do TREM, o primeiro passo a realizar foi a contagem do número de veículos. A contagem foi feita manualmente e à posteriori, através da visualização do registo vídeo, adquirido com uma câmara instalada sobre a carrinha de QA (ver Figura 17), do tráfego local. A contagem foi feita com distinção de veículos (ligeiros, pesados e motociclos), por hora e para as quatro vias adjacentes à Escola da Glória (Figura 15), a Avenida de Santa Joana (sentido Fórum → Universidade, via 1 e Universidade → Fórum, via 3), a rua do Governo Civil (sentido Governo Civil → Fórum, via 2) e a rua Capitão Sousa Pizarro (sentido Mário Sacramento → Fórum, via 4).



**Figura 15:** Localização da câmara de vídeo instalada no local de estudo, e das quatro vias de tráfego analisadas (Fonte: Bing Maps, 2011).



O gráfico apresentado na Figura 16 mostra o perfil diário do número total de veículos para cada uma das quatro vias, no dia 11 de janeiro de 2012. A dinâmica de tráfego apresenta três picos: às 9, 14 e às 18 horas, que correspondem aos períodos de maior circulação de tráfego automóvel, as vulgarmente chamadas horas de ponta. Para além disso, há o facto indissociável da presença da escola, contribuindo para o aumento do número de veículos aquando do início das aulas, hora de almoço e do final das aulas.

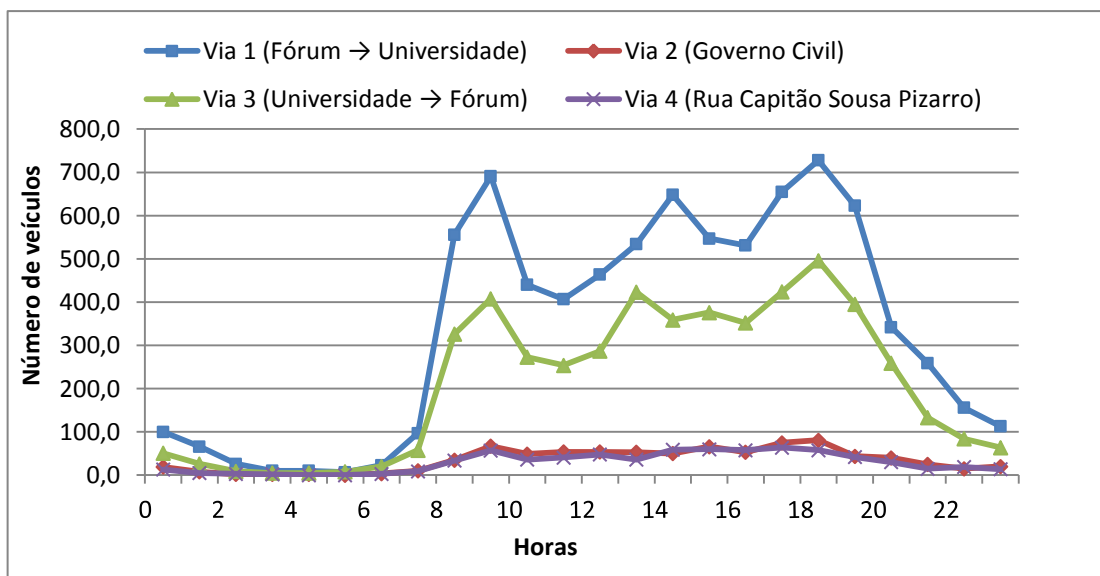


Figura 16: Evolução do número total de veículos para as quatro vias.

#### 4.2. QA exterior

As medições realizadas no exterior da Escola Básica nº 1 da Glória foram conduzidas pelo grupo de trabalho do projeto SINPHONIE. A carrinha de monitorização da QA estava localizada no interior do recreio da escola (Figura 17), a cerca de 5 m da Avenida de Santa Joana.



Figura 17: Carrinha de QA utilizada na campanha de monitorização da Escola Básica nº 1 da Glória.

Para avaliar a qualidade do ar na Escola Básica nº 1 da Glória foram então analisados os seguintes poluentes atmosféricos: CO, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, e PM10. Os resultados apresentados a seguir são relativos apenas ao dia 11 de janeiro de 2012, já que este foi o dia escolhido para avaliar a QAI da Escola Básica nº 1 da Glória.

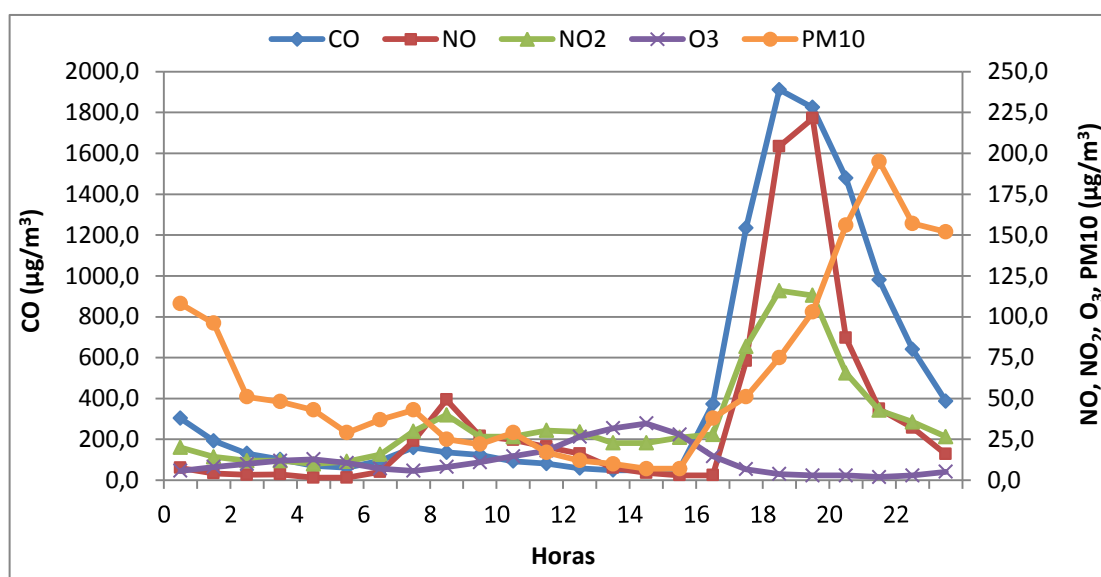


Figura 18: Representação gráfica dos valores de concentração dos poluentes atmosféricos medidos na Escola Básica nº 1 da Glória.

Pela análise da Figura 18 e da Tabela 7 em Anexo, o poluente que obteve os maiores registos de concentração nesta campanha foi o CO, o que era expectável. Tanto para o CO, como para o NO e NO<sub>2</sub>, os seus valores máximos aconteceram entre as 18 e as 19 horas. Estes poluentes estão diretamente relacionados com as emissões do tráfego

automóvel, mas intercomparando os valores de QA monitorizados no exterior com as contagens de tráfego presentes na Figura 16, percebe-se que os primeiros não acompanham a dinâmica de tráfego evidenciada, pois apenas se mantém evidente o pico das 18 horas. Os resultados da QA exterior, embora mostrem um pico matinal, não apresentam os picos das 9 e das 14 horas, e a explicação para isso poderá estar relacionado com as condições meteorológicas (Figura 11). Às 9 horas, apesar de existirem valores elevados de tráfego, do vento ter direção sudeste ( $111,6^\circ$ ), o que favorece o transporte de poluentes para o local da campanha, já que a Avenida de Santa Joana se encontra a sudeste da Escola da Glória, e da velocidade do vento ser de apenas  $0,9$  m/s, que é uma velocidade de vento fraca, o que não promove a dispersão dos poluentes, não é observado um pico de concentração tão notório como no caso das 18 horas. Já em relação ao período das 14 horas, o facto de o vento soprar de noroeste ( $347,9^\circ$ ) influenciou, sem dúvida, os valores medidos durante a campanha de monitorização.

Por outro lado, o  $O_3$  é mais observado nos períodos de maior radiação solar, ou seja, entre as 12 e as 15 horas. Relativamente aos valores da concentração de  $PM_{10}$ , verifica-se que o seu máximo acontece às 21 horas, contribuindo para isso o facto deste poluente poder estar associado aos processos de combustão doméstica.

Comparando os valores monitorizados com os valores limite para a proteção da saúde humana estabelecidos no Decreto-Lei nº 102/2010 de 23 de setembro relativos à QA ambiente, verifica-se que os poluentes medidos estão de acordo com a legislação, apesar de no caso do CO e das  $PM_{10}$  não se poder comparar diretamente, uma vez que a referência temporal usada não coincide com a utilizada no Decreto-Lei nº 102/2010.

### **4.3. QAI**

As medições realizadas no interior da Escola Básica nº 1 da Glória foram dirigidas pelo grupo de trabalho do projeto SINPHONIE. Realizaram-se medições em três salas, incidindo nos poluentes CO e  $CO_2$  e nos parâmetros temperatura e humidade relativa.

A sala selecionada para avaliar a QAI foi a sala de aula número 3 (sala R3), pois apenas nesta se realizaram medições no interior da escola no dia 11 de janeiro. A sala está localizada no rés-do-chão do pátio interior da escola, tal como indicado na Figura 19.



Figura 19: Localização da sala de aula objeto de estudo, indicada com uma estrela [Ventura, 2011].

Nas Figuras 20 e 21, são apresentados os resultados das medições efetuadas, primeiro das concentrações interiores de CO e CO<sub>2</sub>, e depois dos valores da temperatura e humidade relativa registados na sala R3:

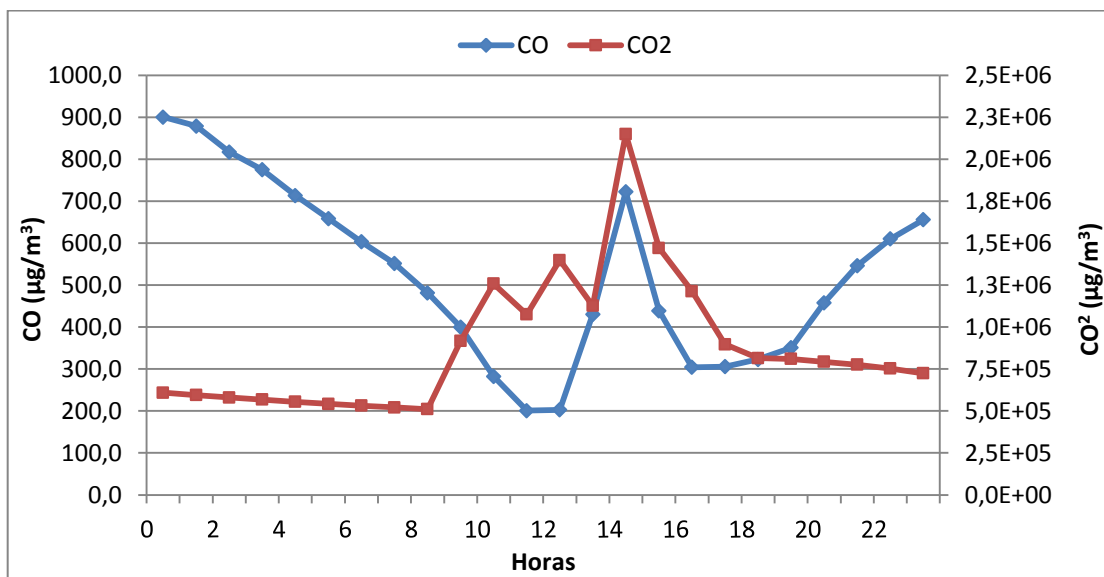


Figura 20: Concentrações interiores de CO e CO<sub>2</sub> medidas na sala R3.

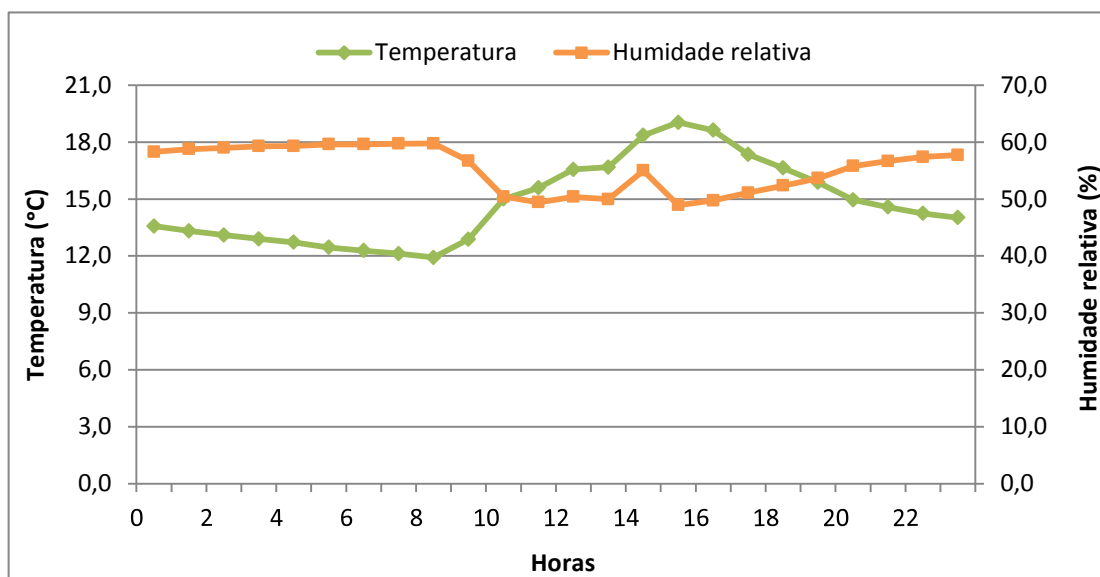


Figura 21: Valores de temperatura e humidade relativa medidos na sala R3.

Analisando os valores presentes na Figura 20, verifica-se que as concentrações interiores de CO vão descendo gradualmente ao início do dia, havendo uma inversão da tendência às 11 horas, que conduz depois a um pico às 14 horas. A partir daí os valores de CO diminuem até às 16 horas, começando a aumentar ao longo do resto do dia. Comparando com os dados da concentração exterior de CO (ver Figura 18), não existe uma semelhança evidente, como se comprova pelo decréscimo das concentrações interiores de CO ao início do dia. Este comportamento noturno da QAI será analisado mais à frente, na secção 5.4. Quanto ao CO<sub>2</sub>, os valores registados na sala R3 começam a aumentar na altura do início das aulas, por volta das 9 horas, apresentando um máximo às 14 horas, e baixando depois ao longo da tarde. Tendo em conta que as aulas acabam às 15h30, o mais expectável era que as concentrações de CO<sub>2</sub> só diminuíssem a partir dessa altura, na medida em que o CO<sub>2</sub> relaciona-se com a taxa de ocupação da sala de aula, o que não se verifica. O facto dos valores de CO<sub>2</sub> começarem a diminuir a partir das 14 horas pode ter tido origem, por exemplo, na abertura de uma janela, o que explica a diminuição da temperatura (ver Figura 21), o que levava mais facilmente à entrada de CO vindo do exterior, ou seja, deveríamos ter um aumento de CO. No entanto, as concentrações interiores de CO também baixam neste período. Se se analisar as concentrações exteriores de CO (ver Figura 18), verifica-se que, não às 14 horas mas sim às 15 horas, os valores começam a aumentar. Então se a janela tivesse sido aberta, por consequente as concentrações *indoor* de CO deveriam ter começado a aumentar. O

ocorrido pode indiciar uma abertura rápida das janelas, durante 15-30 minutos, antes das concentrações *outdoor* terem começado a aumentar, que não foi suficiente para o CO ter entrado na sala, mas fez com que o CO<sub>2</sub> diminuísse significativamente.

Tendo em conta os critérios de QAI estabelecidos no Decreto-Lei nº 79/2006 (Tabela 2), verifica-se que as concentrações interiores de CO e CO<sub>2</sub> encontram-se dentro dos valores máximos permitidos, com exceção do pico de concentração de CO<sub>2</sub> registado às 14 horas.

No que diz respeito à Figura 21, os padrões de variação da temperatura e humidade relativa são normais, na medida em que se pode verificar a dependência da temperatura e humidade relativa com a ocupação da sala de aula, variando estes dois parâmetros durante o período de aulas.

## 5. Tratamento e análise de resultados

### 5.1 Emissões de tráfego rodoviário

Os resultados obtidos (ver Tabelas 8 a 11 em Anexo) são referentes às emissões a quente dos veículos em cada via analisada, na mesma base temporal (horária) dos dados das contagens de tráfego, em termos dos poluentes CO, CO<sub>2</sub>, PM, NO<sub>x</sub>, e COVs.

Os dados das emissões rodoviárias obtidos com o TREM e com o HBEFA estão diretamente relacionados com o aumento ou diminuição do número de veículos em cada via, apresentando três máximos coincidentes com os do perfil de tráfego rodoviário apresentado na Figura 16. Como exemplo disso, é mostrado a seguir na Figura 22 o gráfico com a variação horária das emissões totais de CO para as quatro vias estudadas:

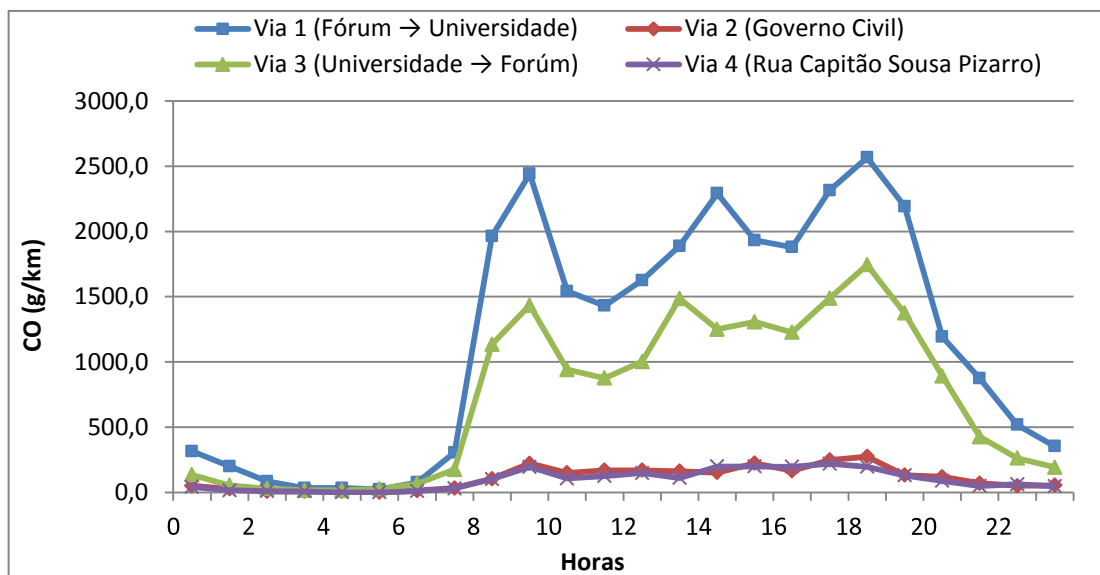
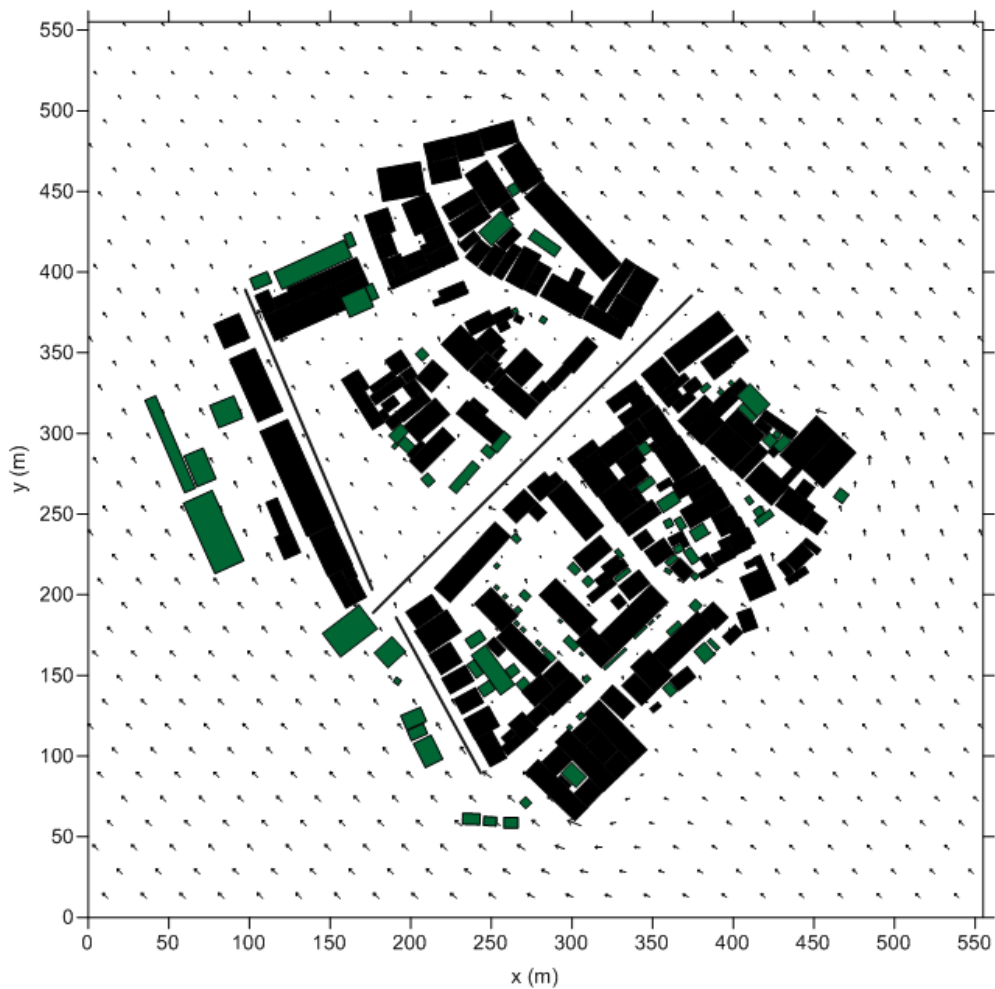


Figura 22: Evolução horária das emissões totais de CO para as quatro vias analisadas.

### 5.2. Escoamento atmosférico

Os primeiros *outputs* que se obtiveram com a aplicação do modelo VADIS foram os campos de ventos, através do módulo FLOW. As simulações foram feitas numa base temporal horária. Para cada hora, foi necessário definir a velocidade e a direção do vento, as coordenadas 3D dos edifícios e árvores, e as dimensões do domínio (comprimento, largura e altura), tal como referido na secção 3.3. As simulações deram origem aos campos de ventos. Na Figura 23 está representado o campo de ventos respeitante ao

período das 0 à 1 horas.



**Figura 23:** Campo de ventos representado no programa Surfer para a simulação relativa ao período das 0 - 1 horas.

A seguir será feita uma análise ao escoamento atmosférico observado sobre a Escola Básica nº 1 da Glória, para três períodos do dia 11 de janeiro de 2012 com direções do vento distintas. Para tal, os campos de ventos das Figuras 24, 25 e 26 referem-se às seguintes direções de vento: sudeste no período das 8 - 9 horas, norte para as 15 - 16 horas e nordeste no período das 18 - 19 horas.



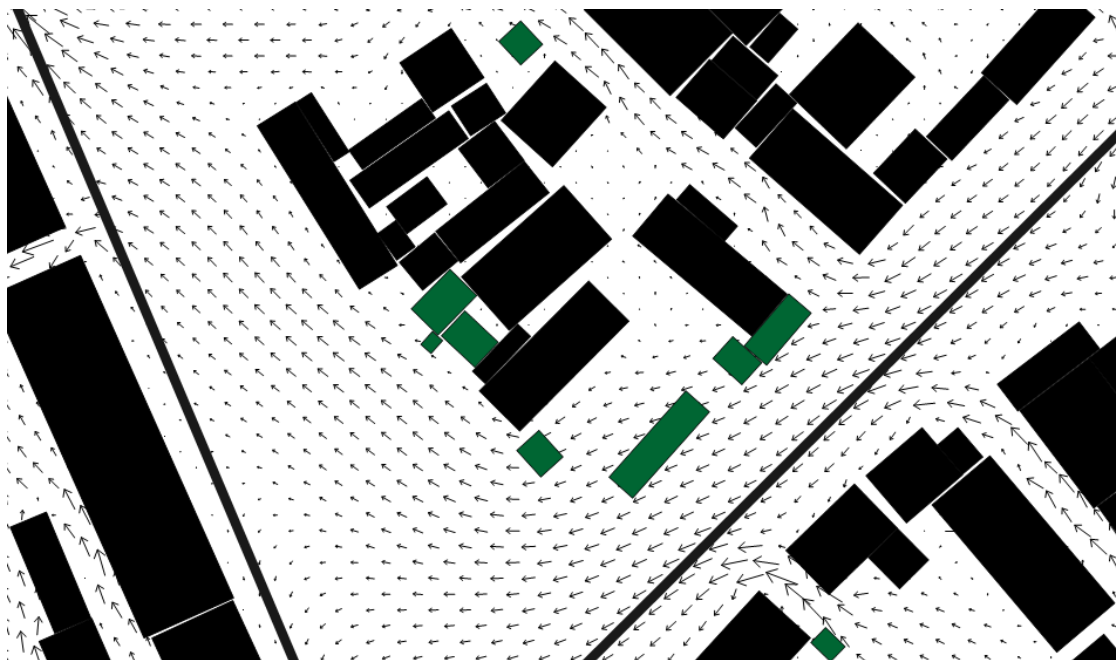


Figura 24: Escoamento atmosférico na Escola da Glória no período das 8 - 9 horas.

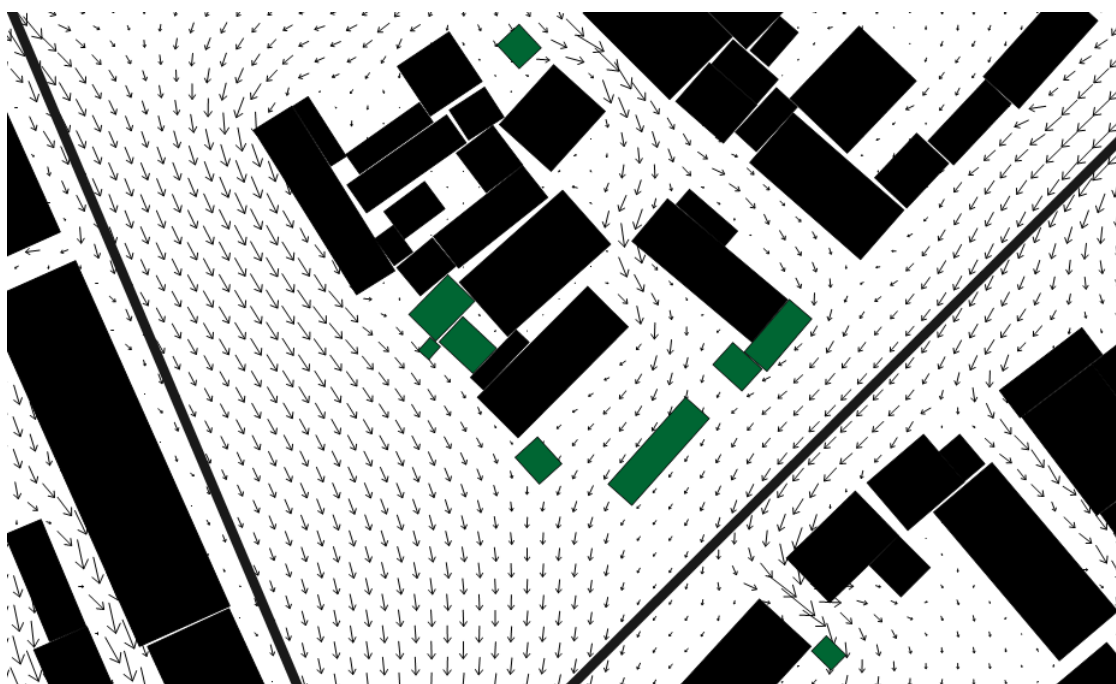


Figura 25: Escoamento atmosférico na Escola da Glória no período das 15 - 16 horas.

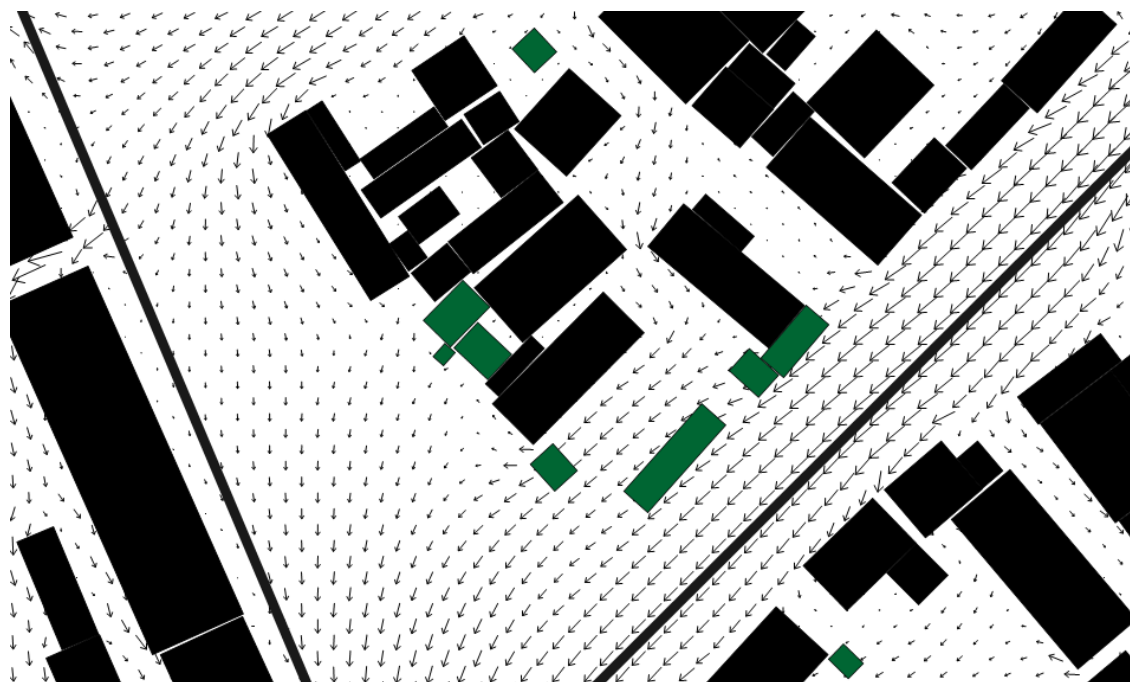


Figura 26: Escoamento atmosférico na Escola da Glória no período das 18 - 19 horas.

Nas três situações mostradas, observa-se que a presença das árvores (a verde) no recinto da Escola da Glória atenua a velocidade do vento, o que indica que estes elementos urbanos influenciam o escoamento atmosférico. Para além disso, há a registar que na escola, bem como nos edifícios adjacentes, existe recirculação do escoamento, o que favorece a acumulação de poluentes atmosféricos, nos designados *hot-spots*.

### 5.3. QA exterior

Os campos de ventos obtidos com o FLOW, juntamente com a definição das vias consideradas e as respetivas emissões de tráfego rodoviário, permitiu iniciar as simulações com o módulo DISPER, obtendo-se assim os campos de concentração de CO no domínio de estudo.

Os valores de concentração de CO simulados no VADIS foram representados no programa Surfer, de maneira a perceber quais os *hot-spots* da área definida. Como exemplos, apresentar-se-ão a seguir as representações no Surfer das simulações realizadas para os períodos das 8 - 9 horas, 15 - 16 horas, e das 18 - 19 horas. Os restantes períodos estão nas Figuras 38 a 58 em Anexo.

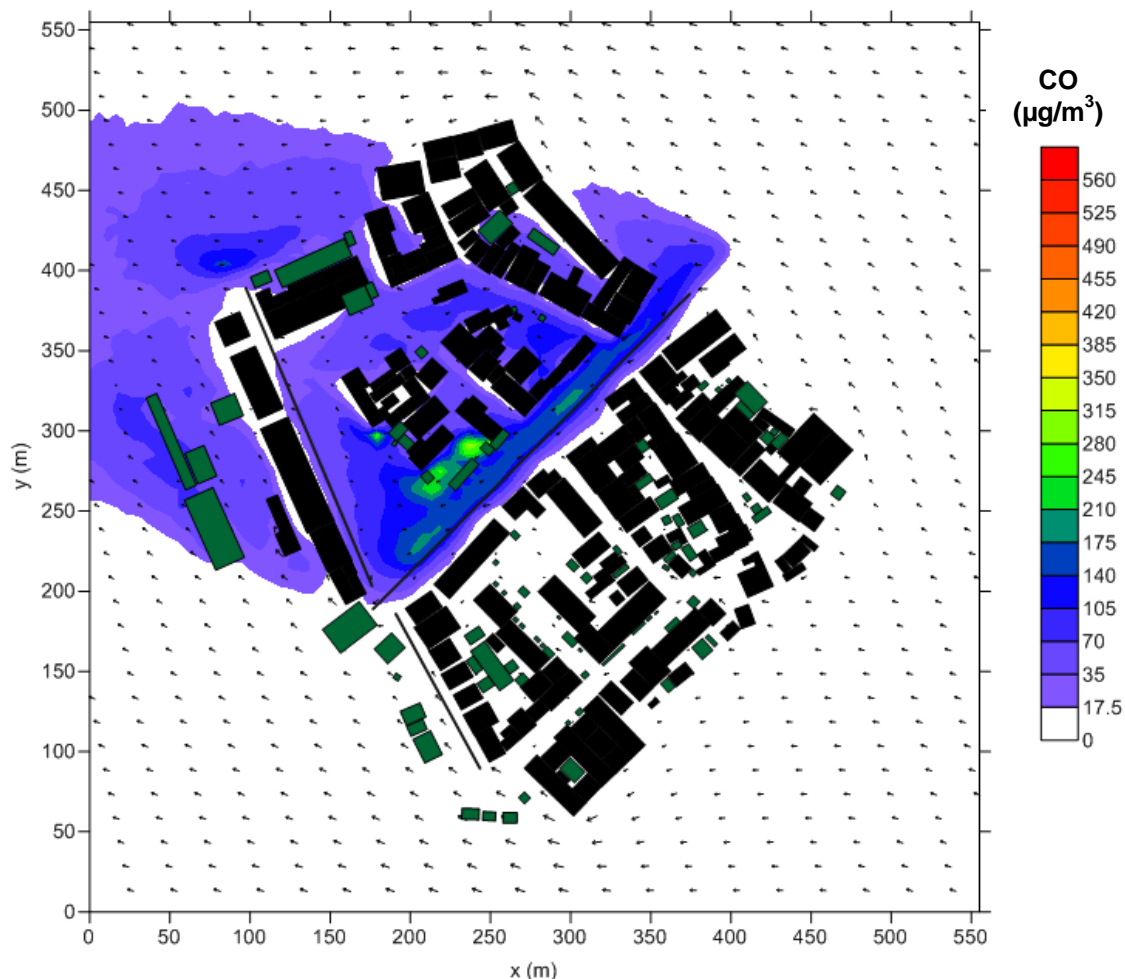


Figura 27: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 8 - 9 horas.

O campo de concentrações obtido para o período das 8 às 9 horas (Figura 27) mostra a influência da Avenida de Santa Joana para os valores da concentração exterior de CO na Escola da Glória. Devido ao vento ter direção sudeste, o poluente é arrastado para a zona do recreio da escola, levando à formação de *hot-spots*. O facto de haver recirculação de ventos nesse local, resultante quer da configuração dos edifícios quer da presença de árvores (já analisada na Figura 24), favorece a acumulação de CO. Analisando as concentrações exteriores de CO simuladas, verifica-se que neste período os resultados obtidos não ultrapassaram o valor limite para a proteção da saúde humana imposto no Decreto-Lei nº 102/2010 para o CO ( $10 \text{ mg/m}^3 = 10000 \text{ µg/m}^3$ ).

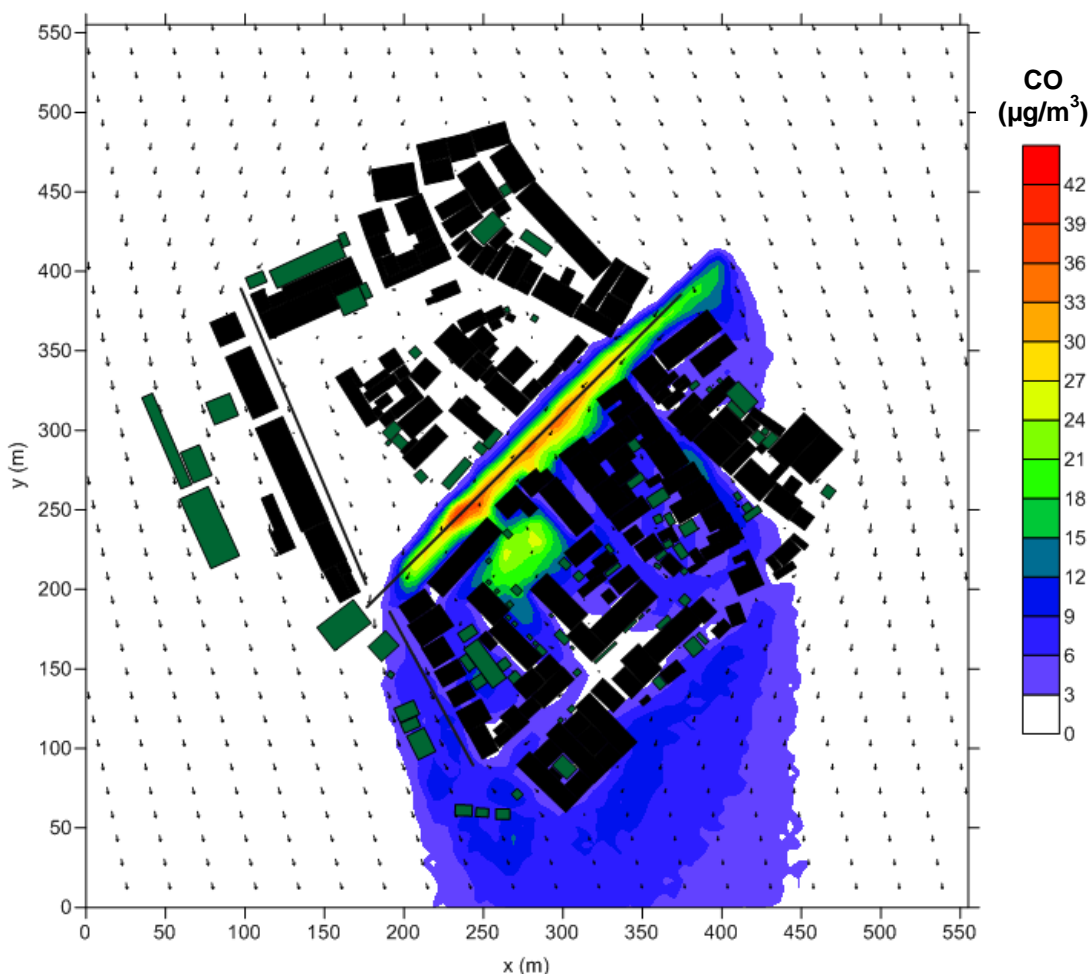
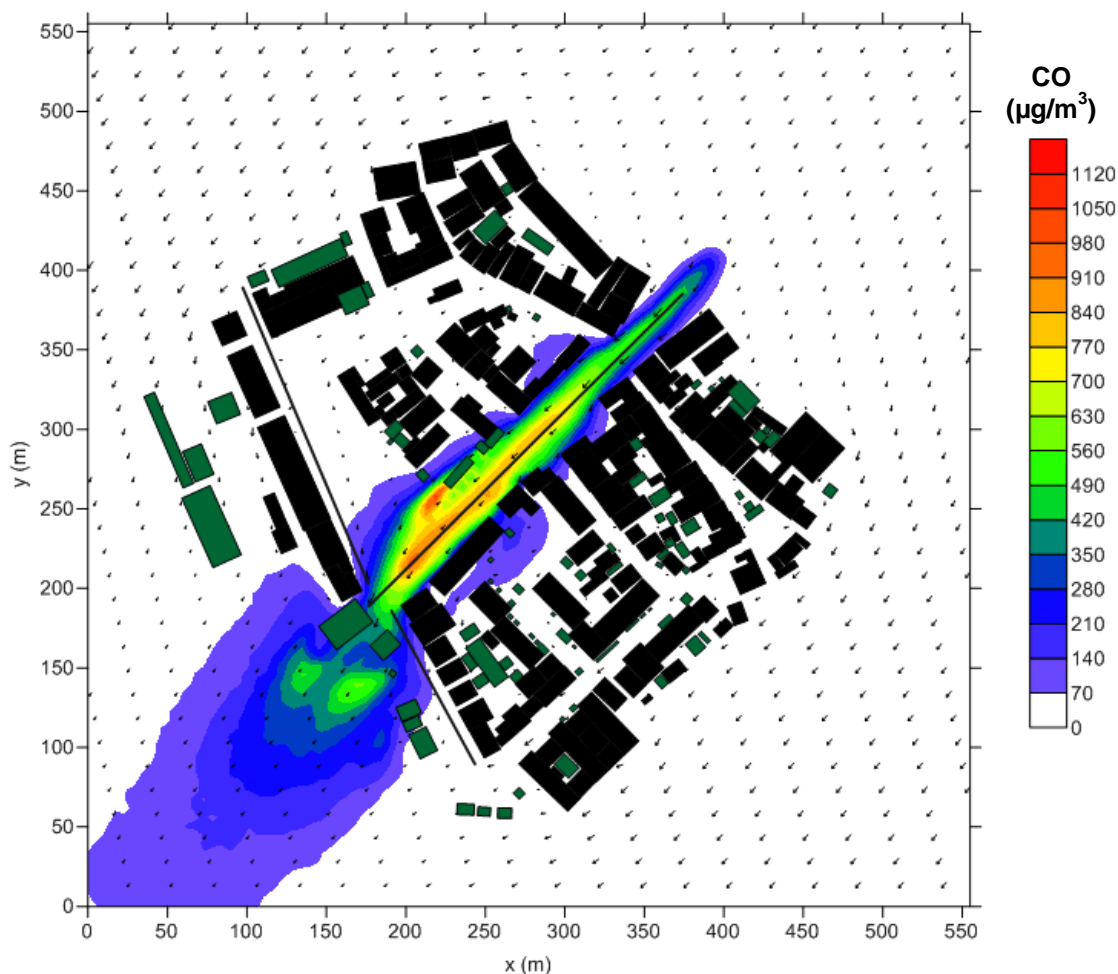


Figura 28: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 15 - 16 horas.

Para a simulação representada na Figura 28, observa-se a ausência de *hot-spots* sobre a Escola da Glória, como resultado do vento norte. Os valores mais elevados de concentração de CO verificam-se ao longo da Avenida de Santa Joana, a principal fonte emissora do domínio de estudo. Aqui, tal como no período das 8 às 9 horas, as concentrações exteriores simuladas no VADIS não excederam os valores máximos impostos na legislação.



**Figura 29:** Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 18 - 19 horas.

Em relação à representação no Surfer da simulação realizada para o período das 18 - 19 horas (Figura 29), a direção do vento neste caso levou à dispersão de CO para sudoeste do domínio. A QA exterior na Escola da Glória é afetada pelas emissões do tráfego rodoviário da Avenida de Santa Joana, com valores de concentração na ordem dos 1000  $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$ . Apesar de parecer um valor alto, quando comparado com o valor limite presente no Decreto-Lei nº 102/2010 (10000  $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$ ), constata-se que se encontra bem dentro dos parâmetros aceitáveis.

Seguindo o plano de tarefas delineado para o trabalho desenvolvido, comparar-se-ão na Figura 30 os valores de concentração simulados no VADIS e os medidos no exterior da Escola Básica nº 1 da Glória (valores na Tabela 12 em Anexo).

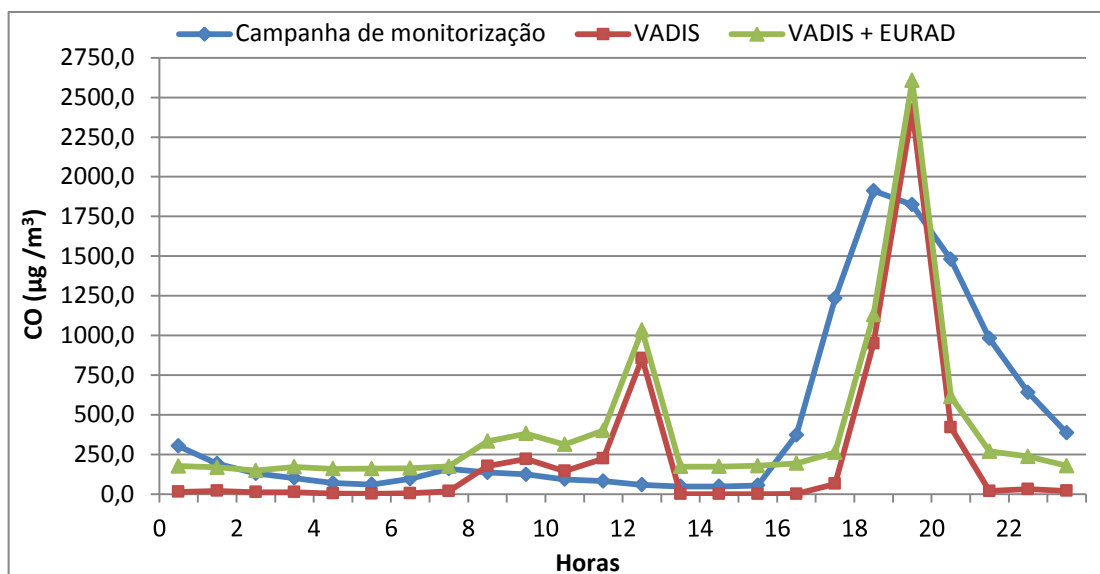


Figura 30: Valores da concentração exterior de CO medidos e simulados no dia 11 de janeiro de 2012.

Os valores obtidos com o modelo VADIS encontram-se relativamente próximos dos valores medidos durante a campanha de monitorização, à exceção da simulação entre as 12 e as 13 horas, que ultrapassou em muito o valor monitorizado. O período onde se observam os maiores picos de concentração de CO é durante as 18 - 20 horas, o que está de acordo com o máximo registado no perfil diário do tráfego rodoviário junto à Escola da Glória, mostrado na Figura 16.

No gráfico da Figura 30, também se representou a soma dos valores simulados no VADIS com as concentrações de fundo fornecidas pelo modelo EURAD, para perceber qual o efeito da consideração das concentrações de fundo sobre as simulações. Com a contribuição das concentrações de fundo, obtém-se uma maior concordância com os valores medidos, tal como será comprovado estatisticamente na secção 5.5.

#### 5.4. QAI

A estimativa com o modelo IAQX da concentração interior de CO na sala em estudo (ver secção 4.3) originou a representação gráfica da Figura 31.



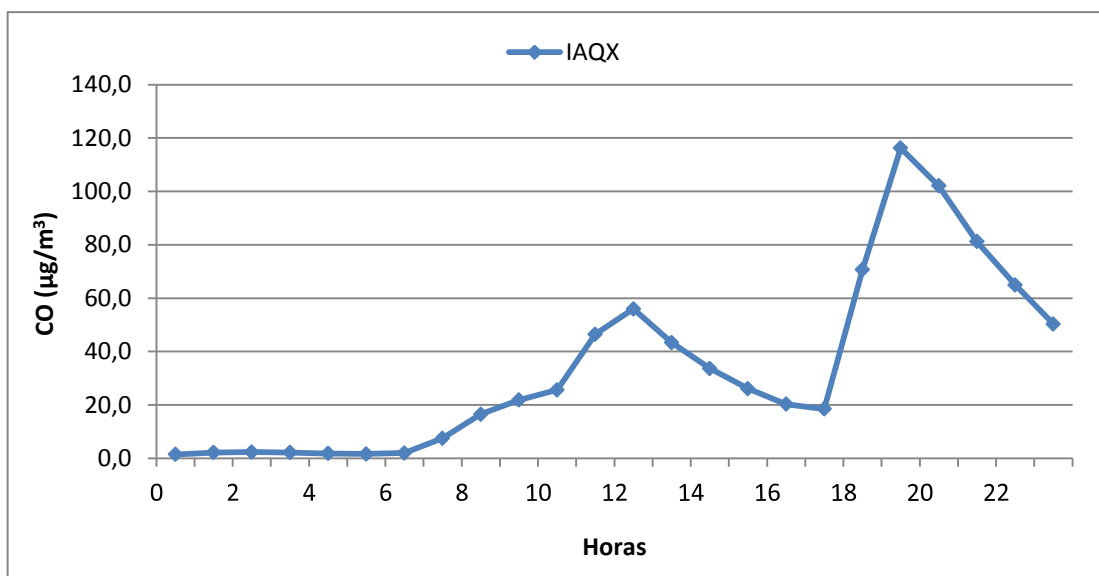


Figura 31: Concentração interior de CO simulada no IAQX.

Interpretando os resultados, constata-se que a simulação das concentrações interiores de CO na sala de aula 3 da Escola Básica nº 1 da Glória seguiram uma tendência razoável. No início do dia têm valores constantemente baixos, começando progressivamente a subir a partir das 7 horas, atingindo um primeiro pico às 12 horas. O segundo pico é registado às 19 horas (116,2 µg CO/m<sup>3</sup>), diminuindo a partir desse período até ao final do dia. Comparando com as concentrações de CO simuladas no exterior (Figura 30), verifica-se que existe uma relação direta entre os valores simulados no interior e no exterior da Escola Básica nº 1 da Glória.

Na Figura 32, é apresentado o gráfico comparativo das concentrações interiores de CO medidas no interior da sala pelo grupo de trabalho do projeto SINPHONIE e as simuladas pelo IAQX (valores na Tabela 13 em Anexo):

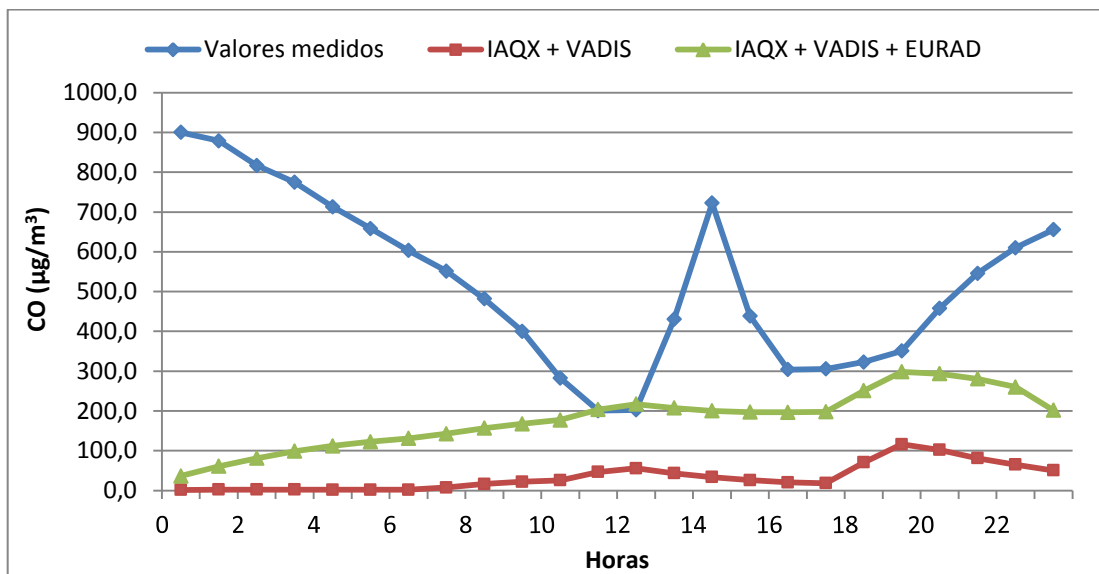


Figura 32: Valores das concentrações interiores de CO medidos e simulados no dia 11 de janeiro de 2012.

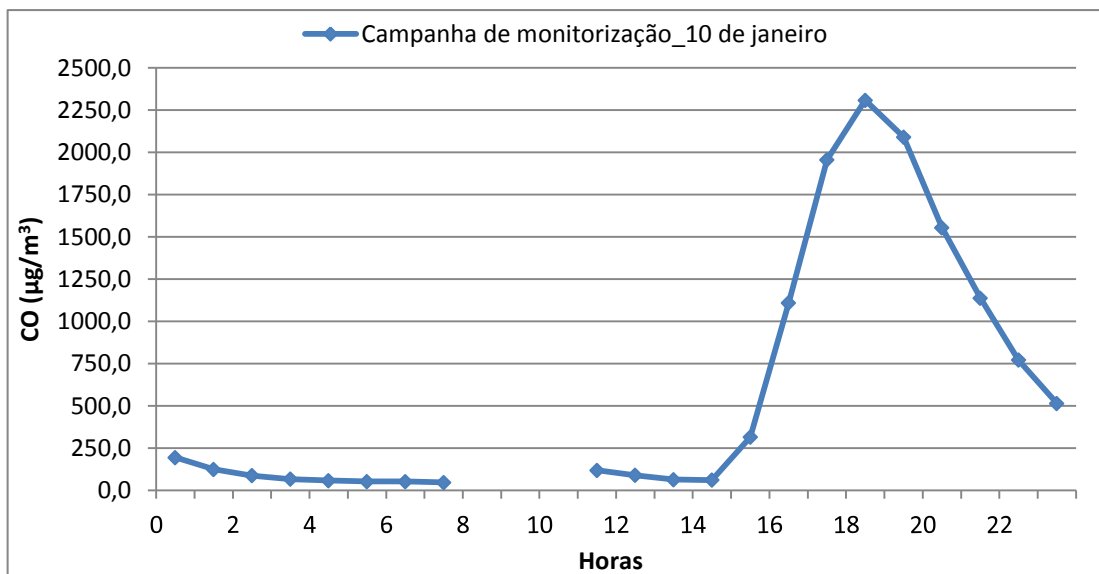
Analisando a figura anterior, e ao contrário das concentrações exteriores de CO, os resultados não foram tão satisfatórios. Os valores medidos dentro da sala têm uma tendência diferente dos valores simulados, e nem com a utilização das concentrações de fundo do modelo EURAD os resultados são mais favoráveis.

Enquanto que, por um lado, os valores medidos tendem a diminuir nas primeiras horas do dia, aumentando depois a partir das 19 horas, os valores simulados vão aumentando gradualmente de manhã, estabilizando à tarde, e diminuindo ao início da noite (20 horas). Os períodos de maior semelhança entre os resultados obtidos foram durante as 11 - 13 horas, e à tarde, entre as 16 e as 20 horas.

Uma possível razão para esta discrepância de valores pode estar diretamente relacionada com episódios de concentrações exteriores de CO e com as condições meteorológicas. Para tal, mostra-se relevante recuar ao dia anterior. Analisando os valores das concentrações exteriores de CO medidos na campanha de monitorização no dia 10 de janeiro de 2012, registou-se um valor máximo de 2300 µg CO/m<sup>3</sup> (Figura 33), entre as 18 e as 19 horas. Este pico do dia 10 de janeiro pode ter influenciado os valores *indoor* de CO medidos na sala R3, e tendo em conta que a direção do vento entre o final do dia 10 e o início do dia 11 era de sudeste, ou seja, favorável à acumulação de poluentes na sala, daí a provável razão para os altos valores registados no interior da sala para as primeiras horas do dia 11 de janeiro. O posterior decaimento dos valores medidos até às 11 horas, traduz o efeito do fecho das janelas durante a noite. O CO



acumulou-se no interior da sala durante o período de aulas, havendo depois um decaimento normal das concentrações à noite.



**Figura 33:** Concentrações exteriores de CO medidas durante a campanha de monitorização na Escola da Glória no dia 10 de janeiro de 2012.

Em relação à tendência contraditória verificada a partir das 19 horas, em que os valores simulados começam a diminuir e os valores medidos no interior da sala a aumentar, é necessário comparar-se as Figuras 30 e 32. A concentração interior simulada (Figura 32) segue, minimamente, a tendência da concentração simulada no exterior (Figura 30), portanto, há um aumento por volta das 19 horas e depois uma diminuição. Isto não é verificado nos valores medidos interiores, que contrariam os valores medidos no exterior. A tendência medida no interior contraria a do exterior, o que pode induzir uma contribuição, que não está a ser contabilizada nas simulações das concentrações interiores de CO.

No entanto, se por um lado os resultados da simulação com o IAQX não foram tão favoráveis, por outro há a registar o facto das concentrações interiores de CO simuladas na sala de aula número 3 encontrarem-se dentro dos limites máximos estipulados na legislação da QAI em vigor (Tabela 2), que define  $12,5 \text{ mg/m}^3$  ( $12500 \text{ µg/m}^3$ ) como a concentração máxima de CO permitida no interior de edifícios.

### 5.5. Análise estatística dos valores simulados de concentração exterior e interior

A análise estatística das simulações das concentrações de CO exteriores e interiores foi avaliada através do *software* BOOT [Chang e Hanna, 2005], com recurso aos seguintes parâmetros estatísticos, recomendados para a avaliação do desempenho de modelos: média ( $\mu$ ), desvio-padrão ( $\sigma$ ), desvio médio (d), desvio fracionado (FB), desvio médio geométrico (MG), erro quadrático médio normalizado (NMSE), variância geométrica (VG), coeficiente de correlação (R) e a fração de previsões dentro de um fator 2 das observações (FAC2) - em Anexo as respetivas expressões matemáticas. Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os resultados para as concentrações exteriores e interiores de CO, respetivamente.

**Tabela 5:** Parâmetros estatísticos relativos às concentrações exteriores de CO.

Parâmetros estatísticos	Valor ideal	Critério de aceitabilidade	Valores medidos	VADIS	VADIS + EURAD
$\mu$	-	-	441,1	235,1	408,4
$\sigma$	-	-	575,2	520,6	524,6
d	-	-	-	206,0	32,7
FB	0,0	$ \text{FB}  < 0,3$	-	0,6	0,1
MG	1,0	$0,7 < \text{MG} < 1,3$	-	9,1	0,7
NMSE	0,0	$\text{NMSE} < 1,5$	-	2,5	1,2
VG	1,0	$\text{VG} < 4$	-	1,9E+04	3,3
R	1,0	-	-	0,7	0,7
FAC2	1,0	$\text{FAC2} > 0,5$	-	0,2	0,4

Tabela 6: Parâmetros estatísticos relativos às concentrações interiores de CO.

Parâmetros estatísticos	Valor ideal	Critério de aceitabilidade	Valores medidos	IAQX (VADIS)	IAQX (VADIS + EURAD)
$\mu$	-	-	0,53	0,0	0,2
$\sigma$	-	-	0,21	0,0	0,1
d	-	-	-	0,5	0,4
FB	0,0	$ FB  < 0,3$	-	1,8	1,0
MG	1,0	$0,7 < MG < 1,3$	-	30,6	3,0
NMSE	0,0	$NMSE < 1,5$	-	16,3	2,0
VG	1,0	$VG < 4$	-	2,9E+06	6,7
R	1,0	-	-	-0,5	-0,7
FAC2	1,0	$FAC2 > 0,5$	-	0,0	0,4

Analisando os parâmetros estatísticos relativos às concentrações exteriores de CO apresentados na Tabela 5, verifica-se que os resultados obtidos são bons, com valores maioritariamente dentro dos critérios de aceitabilidade quando considerado o contributo das concentrações de fundo (VADIS+EURAD). Já em relação à análise estatística dos valores simulados da concentração interior de CO (Tabela 6), não se pode concluir o mesmo. Nenhum dos parâmetros estatísticos está de acordo com os critérios de aceitabilidade, sendo até negativos os coeficientes de correlação (R), o que indica uma correlação inversa entre os valores medidos e os simulados. De referir que, no entanto, o NMSE não é muito superior ao valor máximo recomendado, no caso das simulações VADIS+EURAD. Isto mostra que com o EURAD há uma melhoria do desempenho, tanto no modelo VADIS, como também no modelo IAQX.

## **6. Conclusões**

As boas condições ambientais são um fator que contribui para o rendimento do trabalho, pelo que as intervenções no sentido de melhorar a QAI nos edifícios começa a ser um assunto cada vez mais importante hoje em dia. Os efeitos da má QAI têm reflexos negativos não só na saúde e conforto das pessoas, mas também na sua produtividade, em particular em ambiente escolar. A QAI é um fator determinante na incidência e prevalência de doenças do foro respiratório, podendo afetar os utentes dos espaços escolares.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho consistiu em avaliar a QAI numa escola do concelho de Aveiro, simulando-se a contribuição da concentração de poluentes do exterior para os níveis de poluentes no interior de uma sala de aula. Para alcançar o objetivo proposto, utilizou-se o modelo de QAI IAQX, que estimou as concentrações interiores de CO numa das salas de aulas da Escola Básica nº 1 da Glória, a partir das concentrações exteriores simuladas com o modelo CFD VADIS, que permite um elevado detalhe espacial e um conhecimento pormenorizado das condições de escoamento atmosférico e consequente efeito sobre a dispersão de poluentes.

Abordando em primeiro lugar os valores simulados no VADIS, pode-se dizer que os resultados obtidos foram bons. As concentrações exteriores de CO simuladas aproximaram-se dos valores medidos durante a campanha de monitorização da qualidade do ar na Escola da Glória, sendo esta semelhança de valores ainda mais evidente se for considerada a contribuição das concentrações de fundo de CO simuladas com o modelo EURAD.

Em relação às concentrações interiores de CO simuladas no IAQX, pode-se concluir que os resultados alcançados para a sala de aula número 3 da Escola Básica nº 1 da Glória foram relativamente razoáveis, atendendo à complexidade e incerteza associada a este tipo de simulação numérica. A simulação no IAQX resultou em valores de CO um pouco afastados dos valores medidos, com uma tendência distinta entre os valores. Esta diferença pode ter resultado de elevadas concentrações exteriores de CO e das condições meteorológicas dos dias 10 e 11 de janeiro de 2012, bem como de fatores humanos, como a abertura de janelas. Também pode dever-se a algum problema ou erro inerentes à aplicação do próprio modelo IAQX, mas para se ter a certeza disso era indispensável simular as concentrações interiores de CO para mais do que um dia.

De referir, também o facto de nem os valores simulados nem os medidos de CO excederem o valor máximo de 12,5 mg/m<sup>3</sup> previsto na legislação para espaços interiores

(Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de abril). Sem dúvida que isto é um bom sinal, embora que, para garantir que a Escola da Glória esteja a cumprir todos os padrões de uma boa QAI, fosse necessário analisar mais poluentes e parâmetros para além do CO.

Em suma, os objetivos propostos para este trabalho foram cumpridos. Foi possível simular a QAI no interior de uma das salas de aulas da Escola Básica nº 1 da Glória. No entanto, é muito complexo fazê-lo, pois há muitas variáveis associadas que dificultam as simulações. Existem fatores locais que são difíceis de controlar, como os fatores humanos (aberturas de janelas), ou fatores de escoamento atmosférico, que mesmo com modelos CFD são difíceis de contabilizar. Para trabalhos futuros, a utilização de outro modelo de estimativa da QAI e a análise de diferentes poluentes seriam os objetivos a seguir.

De referir igualmente que se revela importante realizar simulações de QAI em edifícios, dado que as medições são efetuadas em pontos específicos. Com um modelo CFD, como o VADIS, obtém-se uma imagem detalhada e tridimensional de todo o espaço, sendo possível, por exemplo, saber qual a concentração junto a uma determinada janela.

É importante que a QAI seja um aspeto a ter em conta pelos responsáveis escolares para o bem de alunos, professores e funcionários, tendo sempre em atenção as medidas corretivas/preventivas para uma melhor QAI, nomeadamente quanto à otimização da ventilação, como por exemplo abrindo as janelas nas salas de aulas durante os períodos de intervalo (no inverno, principalmente).

A modelação de emissões de poluentes atmosféricos constitui um importante instrumento de avaliação, permitindo assim quantificar os poluentes que afetam uma zona numa dada escala temporal e espacial. É um processo que constitui sempre uma tarefa delicada e que deverá ser sempre efetuada com alguns cuidados, principalmente no que diz respeito à aquisição dos dados de entrada dos modelos. Aplicar programas de certificação de QAI, energética, ou de sustentabilidade nos edifícios sociais (escolas, hospitais, centros comerciais, etc.) e residenciais é o caminho certo a seguir.

## **Bibliografia**

- Adefeso I., Sonibare J., Akeredolu F. (2011): Outdoor-indoor exchange of carbon monoxide from an outdoor source. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology. Rhodes, Greece.
- AEA (2007): Europe's environment: the fourth assessment. Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, ISBN 978 92 9167 932 4 AEA, Agência Europeia do Ambiente (AEA), Copenhaga.
- AEA (2011a): Air quality in Europe – 2011 report. Serviço das Publicações da União Europeia, ISBN 978 92 9213 232 3 AEA, Agência Europeia do Ambiente (AEA), Copenhaga.
- AEA (2011b): The application of models under the European Union's Air Quality Directive: A technical reference guide. Serviço das Publicações da União Europeia, ISBN 978 92 9213 223 1 AEA, Agência Europeia do Ambiente (AEA), Copenhaga.
- Amorim J.H., Miranda A.I., Borrego C. (2004): Modelação numérica da dispersão de poluentes atmosféricos no centro de Lisboa. 8<sup>a</sup> Conferência Nacional de Ambiente. Lisboa – Portugal.
- Amorim J.H., Lopes M., Borrego C., Tavares R., Miranda A.I. (2010a): Air quality modelling as a tool for sustainable urban traffic management. Air Pollution XVIII. 21-23 junho, Kos, Grécia.
- Amorim J.H., Rodrigues V., Tavares R., Borrego C. (2010b): CFD Modelling of Tree-induced Effects on Flow and Dispersion of Traffic Emissions in City Centres. Advances in Urban Rehabilitation and Sustainability. Panagopoulos T., Noronha T. and Beltrão J. (Eds.). In The 3rd WSEAS International Conference on Urban Rehabilitation and Sustainability (URES '10), University of Algarve, Faro, Portugal, November 3-5, 2010.
- APA (2009): Qualidade do Ar em Espaços Interiores - Um Guia Técnico. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.

- Borrego C., Miranda A.I., Costa A.M., Amorim J.H. (2002): VADIS Street Canyon Model: Methodology description, Deliverable D04.3 of SUTRA Project (EVK4-CT-1999-00013). Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. AMB-QA-09/2002, Aveiro, Portugal.
- Borrego C., Miranda A.I., Tchepel O. (2003a): TREM Transport Emission Model for Line Sources: Methodology, Deliverable D04.1 of SUTRA Project (EVK4-CT-1999-00013). Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. AMB-QA-09/03, Aveiro, Portugal.
- Borrego C., Tchepel O., Costa A.M., Amorim J.H., Miranda A.I. (2003b): Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale. *Atmospheric Environment*, 37, 5197-5205.
- Borrego C., Neuparth N., Carvalho A.C., Carvalho A., Miranda A.I., Costa A.M., Monteiro A., Martins H., Correia I., Ferreira J., Amorim J.H., Martins J., Pinto J.R., Santos J., Silva J.V., Valente J., Simões L., Lopes M., Tchepel O., Cascão P., Lopes da Mata P., Martins P., Santos P., Tavares R., Nunes T., Martins V. (2008): A SAÚDE E O AR QUE RESPIRAMOS - Um caso de estudo em Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian, 1ª Edição, Lisboa.
- Borrego C., Monteiro A., Pay M.T., Ribeiro I., Miranda A.I., Basart S., Baldasano J.M. (2011): How bias-correction can improve air quality forecast over Portugal. *Atmospheric Environment*, 45, 6629-6641.
- Breen M.S., Breen M., Williams R., Schultz B. (2010): Predicting Residential Air Exchange Rates from Questionnaires and Meteorology: Model Evaluation in Central North Carolina. *Environ. Sci. Technol.*, 44, 9349-9356.
- Chaloulakou A., Mavroidis I. (2002): Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school. Evaluation of an indoor air quality model. *Atmospheric Environment*, 36, 1769-1781.
- Chang J., Hanna S. (2005): Technical Descriptions and User's Guide for the BOOT Statistical Model Evaluation Software Package, Version 2.0. 64 pp..

- Costa A.M. (2008): Microscale modelling of exposure to atmospheric pollutants in urban areas. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Universidade de Aveiro.
- Costa A.M., Valente J., Lopes M., Amorim J.H., Martins H., Cascão P., Miranda A.I., Borrego C. (2009): Modelação de microescala da exposição a poluentes atmosféricos em áreas urbanas. X Congresso Nacional de Engenharia do Ambiente, I Congresso Lusófono de Engenharia do Ambiente. 1-2 outubro, Faro, Portugal.
- Csobod E., Fernandes E., Kephelopoulos S., Rudnai P. (2010): Air Quality in Schools and Childcare Settings – A 2-year-long pilot project. The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe.
- Dimitroulopoulou C., Ashmore S.R., Hill M.T.R., Byrne M.A., Kinnersley R. (2006): INDAIR: A probabilistic model of indoor air pollution in UK homes. *Atmospheric Environment*, 40, 6362-6379.
- Drivas P.J. (1982): Calculation of evaporative emissions from multicomponent liquid spills. *Environmental Science & Technology*, 16, 726-728.
- Elbern H., Strunk A., Schmidt H., Talagrand O. (2007): Emission rate and chemical state estimation by 4-dimensional variational inversion. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3749-3769.
- Garden C., Semple S., De Brouwere K. (2011): A review of existing indoor air pollutant exposure data and models Integrated. *Exposure for Risk Assessment in Indoor Environments (INTERA)*.
- Gilbert N.L., Guay M., Miller J.D., Judek S., Chan C.C., Dales R.E. (2005): Levels and determinants of formaldehyde, acetaldehyde, and acrolein in residential indoor air in Prince Edward Island, Canada. *Environmental Research*, 99, 11-17.
- Gromke C., Buccolieri R., Di Sabatino S., Ruck B. (2008): Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data. *Atmospheric Environment*, 42, 8640-8650.



- Guo Z. (1996): Z-30 Indoor Air Quality Simulator. Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 2, 1063-1068.
- Guo Z., Chang J.S., Sparks L.E., Fortmann R. (1999): Estimation of the rate of VOC emissions from solvent-based indoor coating materials based on product formulation. Atmospheric Environment, 33, 1205-1215.
- Guo Z. (2000a): Development of a Windows-based indoor air quality simulation software package. Environmental Modelling & Software, 15, 403-410.
- Guo Z. (2000b): Simulation Tool Kit for Indoor Air Quality and Inhalation Exposure (IAQX) Version 1.0 User's Guide. US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Research Triangle Park, NC. (Report No. EPA-600/R-00-094).
- Guo Z. (2002): Review of indoor emission source models. Part 1. Overview. Environmental Pollution, 120, 533-549.
- Hayes S.R. (1989): Estimating the effect of being indoors on total personal exposure to outdoor air pollution. Journal of Air and Waste Management, 39, 1453-1461.
- HBEFA (1999): Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 1.2. UBA, CD-ROM, Berlin.
- Hertel O., De Leeuw F., Raaschou-Nielsen O., Jensen S., Gee D., Herbarth O., Pryor S., Palmgren F., Olsen E. (2001): Human exposure to outdoor air pollution (IUPAC Technical Report). Pure Applied Chemistry, 73, 933-958.
- Kessler C., Brücher W., Memmesheimer M., Kerschgens M., Ebel A. (2001): Simulation of Air Pollution with Nested Models in North-Rhine-Westphalia. Atmospheric Environment, 35, 3-12.
- Lee S.C., Chang M. (2000): Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. Chemosphere, 41, 109-113.
- Little J.C., Hodgson A.T., Gadgil A.J. (1994): Modeling of emissions of volatile organic compounds from new carpets. Atmospheric Environment, 28, 227-234.

- Madureira J. (2005): Impacte de uma grande linha de tráfego urbano na qualidade do ar e na saúde - Avaliação em escolas da cidade do porto. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade do Porto.
- Memmesheimer M., Friese E., Jakobs H.J., Feldmann H., Ebel A., Kessler C. (2002): Long-term calculations of air pollutants with the EURAD model. Rhenish Institute for Environmental Research, University of Cologne, Germany.
- Mendell M.J., Heath G.A. (2005): Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, 15, 27-52.
- Montoya M.I., Planas E.L., Casal J. (2009): A comparative analysis of mathematical models for relating indoor and outdoor toxic gas concentrations in accidental releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 381-391.
- Nazaroff W.W., Cass G.R. (1989): Mathematical modeling of indoor aerosol dynamics. *Environmental Science & Technology*, 23, 157-166.
- Pegas P.N., Alves C.A., Evtugina M.G., Nunes T., Cerqueira M., Franchi M., Pio C.A., Almeida S.M., Freitas M.C. (2011): Indoor air quality in elementary schools of Lisbon in spring. *Environ Geochem Health*, 33, 455-468.
- Pereira T., Seabra T., Maciel H., Torres P. (2009): Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, 1990 - 2007. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.
- Reinke P.H., Brosseau L.M. (1997): Development of a model to predict air contaminant concentrations following indoor spills of volatile liquids. *The Annals of Occupational Hygiene*, 41, 415-435.
- Santamouris M., Alvarez S., Dascalaki E., Guarracino G., Maldonado E., Sciuto S., Vandaele L. (1998): Natural ventilation in buildings – A design handbook. Altener Programme of the European Commission, Directorate General XVII, for Energy, James and James, ISBN 1873936729, 1-7.

- Shaughnessy R.J., Haverinen-Shaughnessy U., Nevalainen A., Moschandreas D. (2006): A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor Air*, 16, 465-468.
- Silva J. (2010): Caracterização química e biológica de PM10 em ambiente escolar. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade do Aveiro.
- Silva R. (2009): Modelação das Emissões Atmosféricas Associadas aos Transportes no Município de Leiria. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade do Aveiro.
- Stern A. (1977): *Air Pollution: The Effects of Air Pollution*, Vol II. 3<sup>rd</sup> edition. United Kingdom: Academic Press, Inc.
- Strunk A., Ebel A., Elbern H., Friese E., Goris N., Nieradzik L.P. (2010): Four-dimensional variational assimilation of atmospheric chemical data - Application to regional modelling of air quality. *Lecture Notes in Computer Science*, 5910, 222-22.
- Tchepel O., Costa A.M., Martins H., Ferreira J., Monteiro A., Miranda A.I., Borrego C. (2010): Determination of background concentrations for air quality models using spectral analysis and filtering of monitoring data. *Atmospheric Environment*, 44, 106-114.
- Thatcher T., Layton D. (1995): Deposition, resuspension and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29, 1487-1497.
- US-EPA (1991): *Air Quality Criteria for Carbon Monoxide*. Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency (US-EPA), Washington, D.C..
- US-EPA (1997): *Exposure Factor's Handbook*. Springfield, VA: National Center for Environmental Assessment, US Environmental Protection Agency (US-EPA).
- US-EPA (2000): *IAQ Tools for Schools: Indoor Air Quality and Student Performance*. U.S. Government Printing Office, US Environmental Protection Agency (US-EPA), Washington, D.C..

- Valente J. (2011): Modelação da qualidade do ar e da saúde humana: da mesoscala à dose. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Universidade de Aveiro.
- Vardoulakis S., Fisher B., Pericleous K., Gonzalez-Flesca N. (2003): Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.
- Ventura G. (2011): Characterization of the school buildings (WP3.1). Selection criteria of schools; schools and classrooms checklists. Sinphonie General Assembly. Ispra, 2-6 May.
- WHO (1997): Assessment of exposure to indoor air pollutants. Regional Publications, European Series, World Health Organization (WHO).
- WHO (2001): WHO Strategy on Air Quality and Health, Occupational and Environmental Health Protection of the Human Environment, World Health Organization (WHO), Geneva.
- WHO (2006): Development of WHO Guidelines for Indoor Air Quality, Report on a Working Group Meeting Bonn. World Health Organization (WHO), Germany.
- WHO (2007): Children's health and the environment in Europe: a baseline assessment, version May 2007. World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe, EU/06/50678021.
- Wood R.A. (2003): Improving the indoor environment for health, well-being and productivity. Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, University of Technology. Sydney, Australia.
- Woods J.E. (1991): An engineering approach to controlling indoor air quality. *Environmental Health Perspectives*, 95, 15-21.
- Yang X., Srebric J., Li X., He G. (2004): Performance of three air distribution systems in VOC removal from an area source. *Building and Environment*, 39, 1289-1299.

### **Legislação Nacional:**

- Decreto-Lei nº 79/2006, de 4 de abril, estabelece o Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE).
- Decreto-Lei nº 102/2010, de 23 de setembro, estabelece os objetivos para a qualidade do ar ambiente tendo em conta as normas, as orientações e os programas da Organização Mundial da Saúde, destinados a evitar, prevenir ou reduzir as emissões de poluentes atmosféricos.

### **Sítios na Internet:**

- <http://maps.google.com/maps?hl=pt-PT&tab=w>
- <http://www.acap.pt/>
- <http://www.apambiente.pt/>
- <http://www.bing.com/maps/>
- <http://www.eea.europa.eu/pt>
- <http://www.epa.gov/>
- <http://www.harmo.org/kit/>

## Anexos

→ Janelas do programa GPS.EXE do modelo IAQX

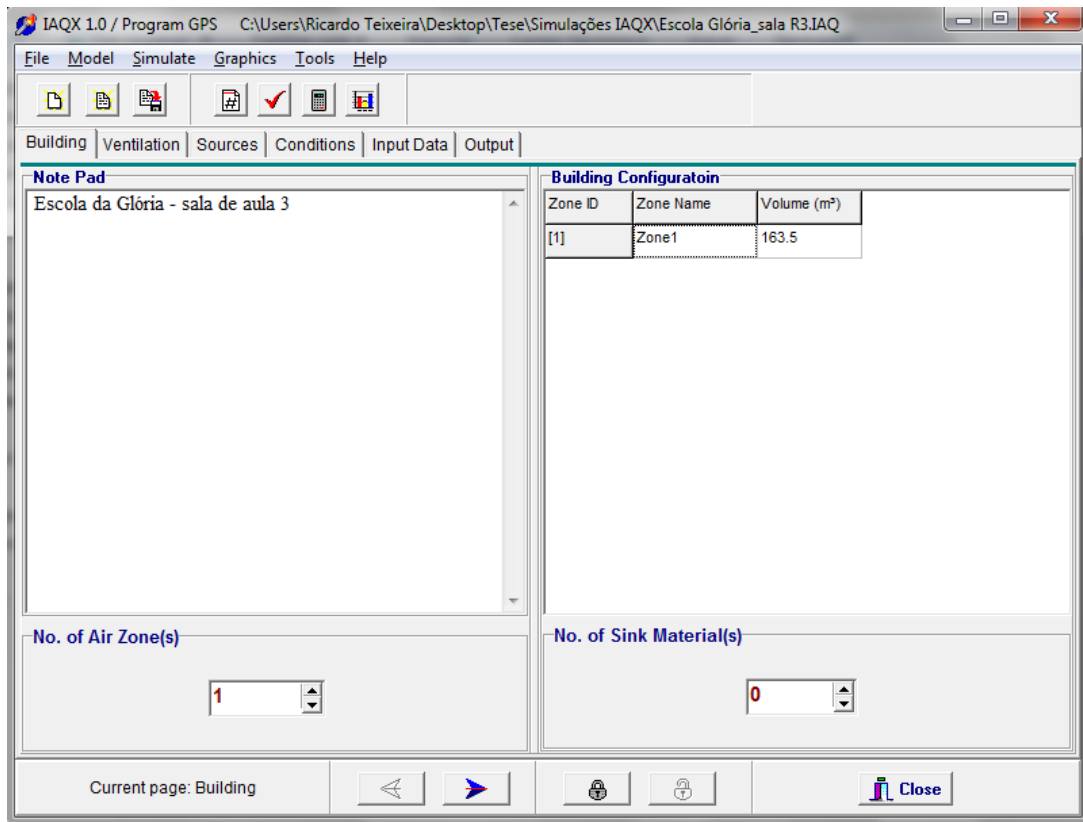


Figura 34: A página principal do programa GPS.

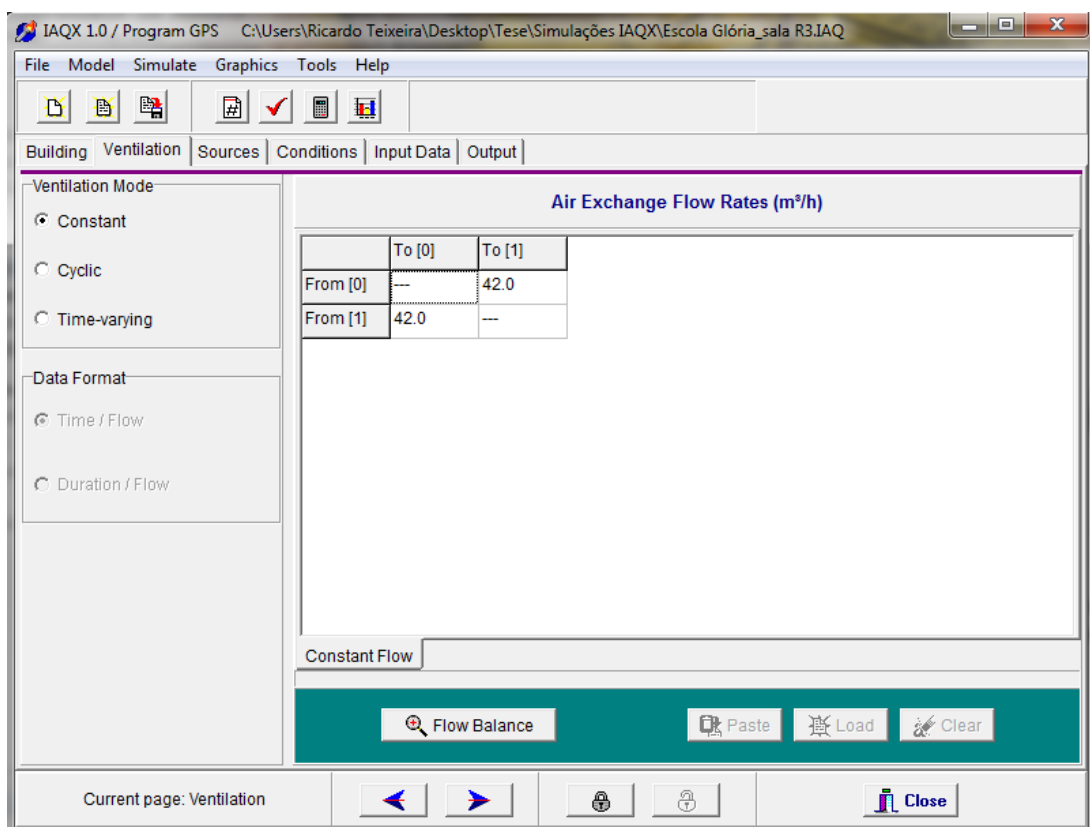


Figura 35: A página relativa à definição da ventilação do GPS.

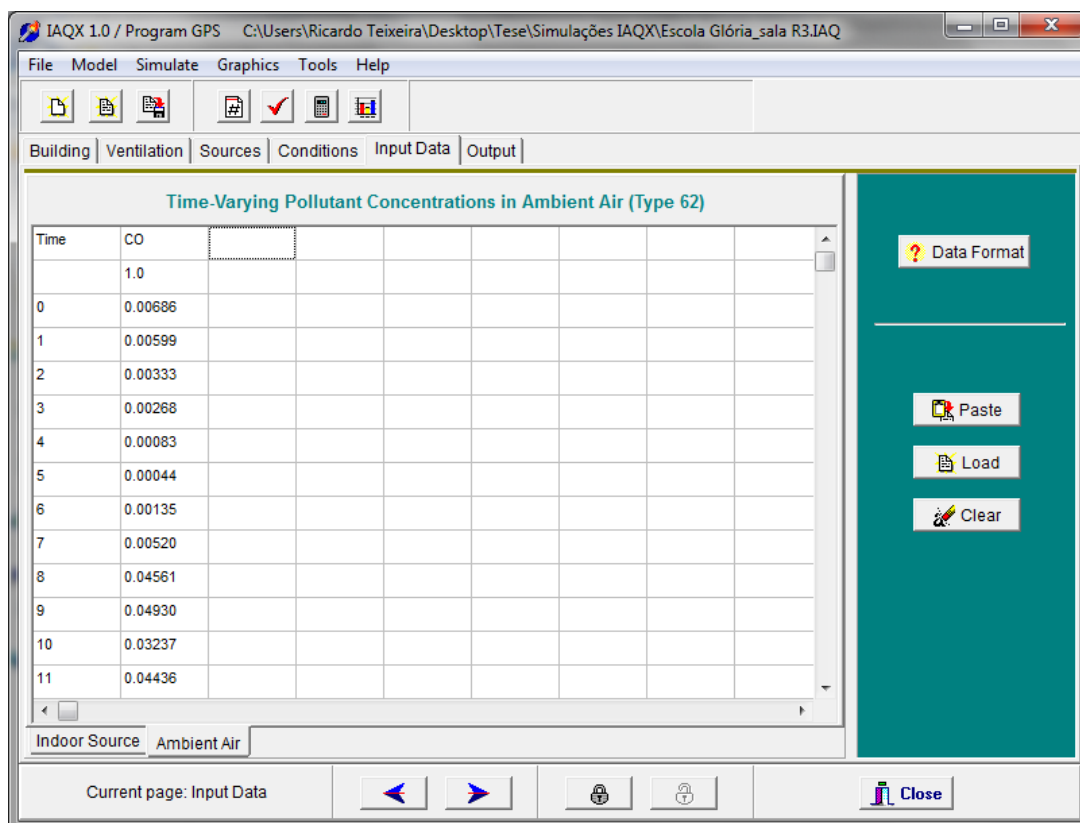


Figura 36: Página de introdução dos dados de entrada do modelo.

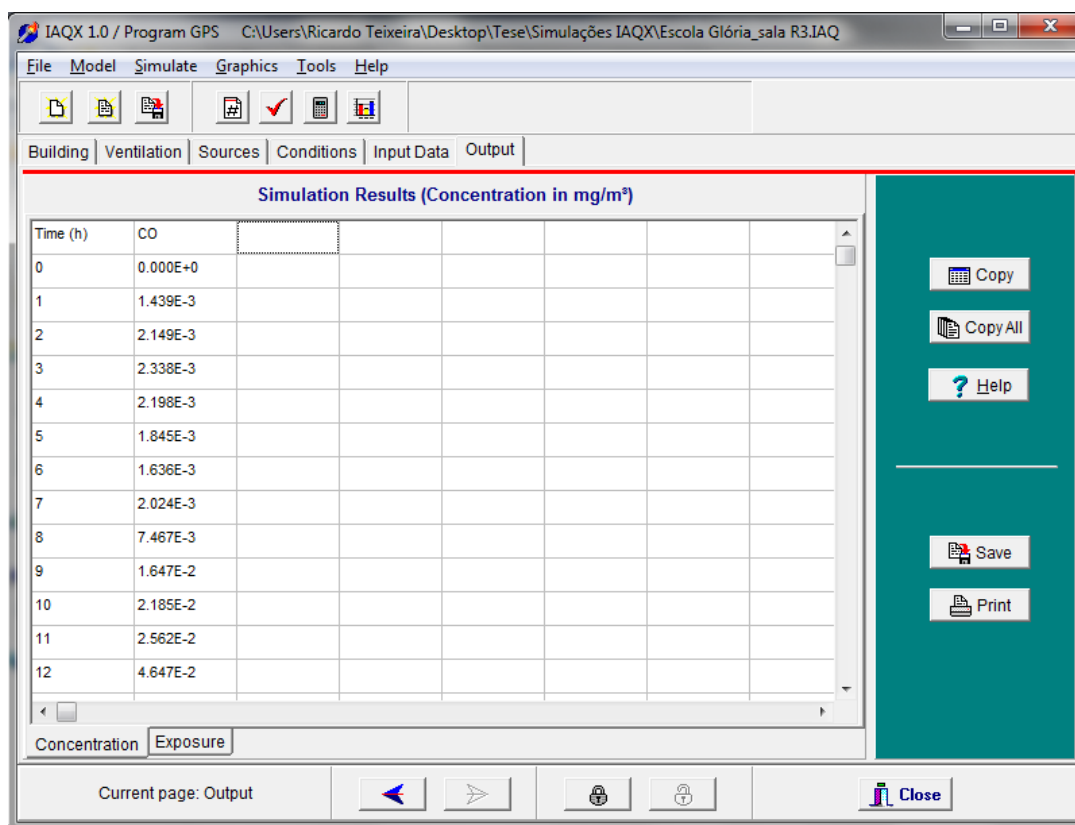


Figura 37: Página de “Output” do programa GPS.



## → Resultados da campanha de monitorização da QA

**Tabela 7:** Resultados obtidos na campanha de monitorização da qualidade do ar realizada na Escola Básica nº 1 da Glória.

Hora	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
00H00 - 01H00	302,7	7,5	20,0	5,7	108,0
01H00 - 02H00	192,1	4,2	14,3	8,1	96,0
02H00 - 03H00	130,4	3,3	11,9	10,0	51,0
03H00 - 04H00	101,3	3,6	11,9	11,9	48,0
04H00 - 05H00	69,9	1,5	10,0	12,8	43,0
05H00 - 06H00	60,5	1,5	11,4	10,5	29,0
06H00 - 07H00	95,5	5,1	15,7	7,1	37,0
07H00 - 08H00	159,5	24,0	29,9	5,7	43,0
08H00 - 09H00	136,2	49,2	39,9	8,1	25,0
09H00 - 10H00	124,6	27,0	26,6	10,9	22,0
10H00 - 11H00	93,1	24,6	26,6	14,7	29,0
11H00 - 12H00	81,5	20,4	30,4	18,1	17,0
12H00 - 13H00	58,2	16,2	29,5	26,6	12,0
13H00 - 14H00	48,9	7,5	22,8	31,8	10,0
14H00 - 15H00	48,9	4,5	22,8	34,7	7,0
15H00 - 16H00	54,7	3,0	26,1	28,0	7,0
16H00 - 17H00	372,5	3,0	28,0	14,7	38,0
17H00 - 18H00	1234,1	72,9	81,7	6,7	51,0
18H00 - 19H00	1911,6	204,3	115,9	3,8	75,0
19H00 - 20H00	1824,3	221,4	113,1	2,9	103,0
20H00 - 21H00	1478,5	87,0	65,6	2,9	156,0
21H00 - 22H00	980,3	43,5	42,8	1,9	195,0
22H00 - 23H00	640,3	32,1	35,6	2,9	157,0
23H00 - 24H00	386,5	15,9	26,6	5,2	152,0

## → Resultados das emissões do tráfego rodoviário

**Tabela 8:** Emissões totais do tráfego rodoviário para a via 1 (Fórum → Universidade) no dia 11/01/12.

<b>Via 1 (Fórum → Universidade)</b>					
<b>Hora</b>	<b>CO (g/km)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g/km)</b>	<b>PM (g/km)</b>	<b>NOx (g/km)</b>	<b>COVs (g/km)</b>
<b>00H00 - 01H00</b>	315,1	60846,1	7,0	111,3	26,5
<b>01H00 - 02H00</b>	199,6	35782,2	4,2	61,5	22,1
<b>02H00 - 03H00</b>	84,4	16125,2	1,7	25,2	3,0
<b>03H00 - 04H00</b>	32,9	6247,4	0,7	9,6	1,2
<b>04H00 - 05H00</b>	32,9	6247,4	0,7	9,6	1,2
<b>05H00 - 06H00</b>	22,6	4422,2	0,5	7,3	0,8
<b>06H00 - 07H00</b>	76,1	15184,1	1,6	25,9	2,7
<b>07H00 - 08H00</b>	305,8	59023,8	6,8	108,7	26,3
<b>08H00 - 09H00</b>	1964,8	367849,3	41,5	664,5	154,0
<b>09H00 - 10H00</b>	2441,8	458955,5	51,5	824,2	186,0
<b>10H00 - 11H00</b>	1542,7	290165,5	32,7	524,5	120,0
<b>11H00 - 12H00</b>	1430,4	268195,1	30,4	487,0	116,0
<b>12H00 - 13H00</b>	1626,4	306562,1	34,6	554,9	123,0
<b>13H00 - 14H00</b>	1888,2	353402,4	39,8	636,2	151,0
<b>14H00 - 15H00</b>	2292,2	429536,5	48,4	772,1	179,0
<b>15H00 - 16H00</b>	1932,1	361575,5	40,7	650,5	153,0
<b>16H00 - 17H00</b>	1879,6	350977,8	39,7	633,5	151,0
<b>17H00 - 18H00</b>	2315,9	434860,5	49,0	782,0	181,0
<b>18H00 - 19H00</b>	2567,3	483525,3	54,3	869,0	191,0
<b>19H00 - 20H00</b>	2193,1	412665,0	46,4	743,1	163,0
<b>20H00 - 21H00</b>	1192,2	224629,1	25,5	408,5	92,8
<b>21H00 - 22H00</b>	873,6	167426,9	18,9	301,9	67,1
<b>22H00 - 23H00</b>	517,3	98805,1	11,1	180,2	35,0
<b>23H00 - 24H00</b>	353,0	65273,9	7,5	109,3	28,0

Tabela 9: Emissões totais do tráfego rodoviário para a via 2 (Governo Civil) no dia 11/01/12.

Via 2 (Governo Civil)					
Hora	CO (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)	PM (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	COVs (g/km)
00H00 - 01H00	49,8	9544,4	1,1	16,0	2,2
01H00 - 02H00	26,4	5023,9	0,5	7,9	1,0
02H00 - 03H00	6,5	1224,5	0,1	1,7	0,2
03H00 - 04H00	6,5	1224,5	0,1	1,7	0,2
04H00 - 05H00	6,5	1224,5	0,1	1,7	0,2
05H00 - 06H00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
06H00 - 07H00	13,2	2512,0	0,3	4,0	0,5
07H00 - 08H00	32,9	6247,4	0,7	9,6	1,2
08H00 - 09H00	103,6	20002,2	2,3	34,8	4,6
09H00 - 10H00	221,5	39867,8	4,6	65,7	22,2
10H00 - 11H00	149,7	28756,5	3,2	48,3	6,3
11H00 - 12H00	169,2	31692,8	3,5	52,7	6,8
12H00 - 13H00	169,2	31692,8	3,5	52,7	6,8
13H00 - 14H00	161,5	31123,5	3,5	52,1	6,6
14H00 - 15H00	152,1	29188,3	3,2	48,7	6,3
15H00 - 16H00	223,5	39282,9	4,5	64,6	22,1
16H00 - 17H00	165,2	31160,3	3,5	52,1	6,6
17H00 - 18H00	247,9	44921,8	5,1	73,6	23,2
18H00 - 19H00	274,2	48970,5	5,6	81,5	24,3
19H00 - 20H00	132,7	25647,8	2,9	43,8	5,6
20H00 - 21H00	119,2	22940,9	2,6	39,1	5,1
21H00 - 22H00	70,0	13534,8	1,5	22,9	3,0
22H00 - 23H00	49,8	9197,6	1,0	14,0	1,7
23H00 - 24H00	53,6	10146,1	1,1	16,6	2,3

Tabela 10: Emissões totais do tráfego rodoviário para a via 3 (Universidade → Fórum) no dia 11/01/12.

<b>Via 3 (Universidade → Fórum)</b>					
<b>Hora</b>	<b>CO (g/km)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g/km)</b>	<b>PM (g/km)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g/km)</b>	<b>COVs (g/km)</b>
00H00 - 01H00	135,3	26166,1	3,0	46,0	6,3
01H00 - 02H00	53,2	10512,6	1,3	20,2	3,0
02H00 - 03H00	28,8	5455,7	0,6	8,3	1,0
03H00 - 04H00	15,6	2943,7	0,3	4,3	0,5
04H00 - 05H00	15,6	2943,7	0,3	4,3	0,5
05H00 - 06H00	26,5	5024,7	0,5	7,9	1,0
06H00 - 07H00	65,6	12304,8	1,3	18,6	2,3
07H00 - 08H00	175,5	32734,9	3,9	61,3	21,2
08H00 - 09H00	1134,7	212631,4	23,9	380,5	89,3
09H00 - 10H00	1434,9	268869,9	30,4	487,5	116,0
10H00 - 11H00	940,8	177263,7	20,0	318,8	68,9
11H00 - 12H00	875,8	164541,4	18,5	296,1	66,7
12H00 - 13H00	1002,2	186511,8	21,1	334,7	84,5
13H00 - 14H00	1485,8	278992,8	31,6	505,9	118,0
14H00 - 15H00	1250,1	235901,8	26,7	428,0	94,7
15H00 - 16H00	1307,1	246974,4	27,8	446,6	96,6
16H00 - 17H00	1226,4	231177,7	26,2	419,1	93,9
17H00 - 18H00	1488,3	279467,7	31,6	506,5	118,0
18H00 - 19H00	1745,2	327657,7	36,8	590,9	132,0
19H00 - 20H00	1374,1	260396,7	29,4	472,2	99,5
20H00 - 21H00	892,5	167615,7	18,9	302,0	67,1
21H00 - 22H00	426,2	83093,5	9,4	151,4	30,9
22H00 - 23H00	262,0	50360,6	5,9	93,9	24,7
23H00 - 24H00	192,9	34518,7	4,1	59,2	21,9

**Tabela 11:** Emissões totais do tráfego rodoviário para a via 4 (Rua Capitão Sousa Pizarro) no dia 11/01/12.

<b>Via 4 (Rua Capitão Sousa Pizarro)</b>					
<b>Hora</b>	<b>CO (g/km)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g/km)</b>	<b>PM (g/km)</b>	<b>NOx (g/km)</b>	<b>COVs (g/km)</b>
00H00 - 01H00	42,0	7962,6	0,8	12,3	1,5
01H00 - 02H00	15,6	2943,7	0,3	4,3	0,5
02H00 - 03H00	9,4	1909,2	0,2	3,3	0,3
03H00 - 04H00	6,5	1224,5	0,1	1,7	0,2
04H00 - 05H00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
05H00 - 06H00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
06H00 - 07H00	9,4	1909,2	0,2	3,3	0,3
07H00 - 08H00	30,0	5843,7	0,6	9,9	1,0
08H00 - 09H00	101,2	20628,7	2,4	39,2	4,5
09H00 - 10H00	195,1	35892,7	4,2	65,0	21,0
10H00 - 11H00	106,0	20433,9	2,3	35,2	4,6
11H00 - 12H00	125,1	25257,3	2,8	46,6	5,3
12H00 - 13H00	148,0	29976,0	3,4	55,1	6,1
13H00 - 14H00	109,9	21770,7	2,5	40,5	4,6
14H00 - 15H00	199,0	34755,4	4,0	57,1	21,2
15H00 - 16H00	198,9	35445,7	4,1	58,4	21,4
16H00 - 17H00	196,5	34322,9	4,0	56,7	21,2
17H00 - 18H00	219,6	40516,8	4,6	72,5	21,9
18H00 - 19H00	196,5	34322,9	4,0	56,7	21,2
19H00 - 20H00	130,4	25759,8	2,9	47,1	5,3
20H00 - 21H00	88,4	16902,7	2,0	30,2	4,0
21H00 - 22H00	48,6	9186,1	1,0	14,0	1,7
22H00 - 23H00	61,8	11703,0	1,2	18,0	2,2
23H00 - 24H00	46,2	8754,4	0,9	13,6	1,7

## → Resultados da aplicação dos modelos VADIS e IAQX

**Tabela 12:** Resultados obtidos das concentrações exteriores de CO medidos na campanha de monitorização e simulados no VADIS e EURAD.

[CO] µg/m <sup>3</sup>				
Hora	Campanha de monitorização	VADIS	EURAD	VADIS + EURAD
<b>00H00 - 01H00</b>	302,7	13,8	163,2	177,0
<b>01H00 - 02H00</b>	192,1	20,5	148,0	168,5
<b>02H00 - 03H00</b>	130,4	12,3	136,0	148,2
<b>03H00 - 04H00</b>	101,3	12,1	159,5	171,6
<b>04H00 - 05H00</b>	69,9	4,3	155,3	159,5
<b>05H00 - 06H00</b>	60,5	1,9	158,7	160,6
<b>06H00 - 07H00</b>	95,5	5,7	158,3	163,9
<b>07H00 - 08H00</b>	159,5	18,6	155,8	174,4
<b>08H00 - 09H00</b>	136,2	176,6	156,7	333,3
<b>09H00 - 10H00</b>	124,6	221,4	160,4	381,9
<b>10H00 - 11H00</b>	93,1	145,6	167,1	312,7
<b>11H00 - 12H00</b>	81,5	224,3	176,0	400,3
<b>12H00 - 13H00</b>	58,2	856,7	176,6	1033,3
<b>13H00 - 14H00</b>	48,9	0,1	173,9	174,1
<b>14H00 - 15H00</b>	48,9	0,3	173,1	173,4
<b>15H00 - 16H00</b>	54,7	0,4	178,4	178,8
<b>16H00 - 17H00</b>	372,5	0,8	192,5	193,3
<b>17H00 - 18H00</b>	1234,1	64,9	197,7	262,6
<b>18H00 - 19H00</b>	1911,6	949,6	180,1	1129,7
<b>19H00 - 20H00</b>	1824,3	2420,6	185,8	2606,4
<b>20H00 - 21H00</b>	1478,5	419,6	193,3	613,0
<b>21H00 - 22H00</b>	980,3	19,3	250,1	269,4
<b>22H00 - 23H00</b>	640,3	31,7	205,7	237,4
<b>23H00 - 24H00</b>	386,5	20,7	158,5	179,1

**Tabela 13:** Resultados obtidos das concentrações interiores de CO medidos na sala de aula e simulados no IAQX.

<b>[CO] <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></b>			
<b>Hora</b>	<b>Valores medidos</b>	<b>IAQX + VADIS</b>	<b>IAQX + VADIS + EURAD</b>
<b>00H00 - 01H00</b>	900,4	1,4	36,3
<b>01H00 - 02H00</b>	879,0	2,1	61,0
<b>02H00 - 03H00</b>	817,2	2,3	81,3
<b>03H00 - 04H00</b>	774,8	2,2	98,7
<b>04H00 - 05H00</b>	713,2	1,8	112,0
<b>05H00 - 06H00</b>	658,6	1,6	122,6
<b>06H00 - 07H00</b>	603,2	2,0	131,1
<b>07H00 - 08H00</b>	551,4	7,5	142,7
<b>08H00 - 09H00</b>	481,7	16,5	156,9
<b>09H00 - 10H00</b>	400,1	21,9	167,6
<b>10H00 - 11H00</b>	282,5	25,6	177,2
<b>11H00 - 12H00</b>	200,7	46,5	203,6
<b>12H00 - 13H00</b>	202,7	55,9	217,1
<b>13H00 - 14H00</b>	430,3	43,4	207,3
<b>14H00 - 15H00</b>	722,4	33,6	200,3
<b>15H00 - 16H00</b>	438,9	26,1	197,0
<b>16H00 - 17H00</b>	304,2	20,3	196,7
<b>17H00 - 18H00</b>	305,8	18,5	197,6
<b>18H00 - 19H00</b>	322,9	70,7	250,7
<b>19H00 - 20H00</b>	350,6	116,2	298,4
<b>20H00 - 21H00</b>	457,9	102,1	293,4
<b>21H00 - 22H00</b>	545,8	81,2	280,5
<b>22H00 - 23H00</b>	610,1	64,9	260,1
<b>23H00 - 24H00</b>	655,6	50,4	201,7

→ Representações dos campos de concentração de CO simulados no VADIS

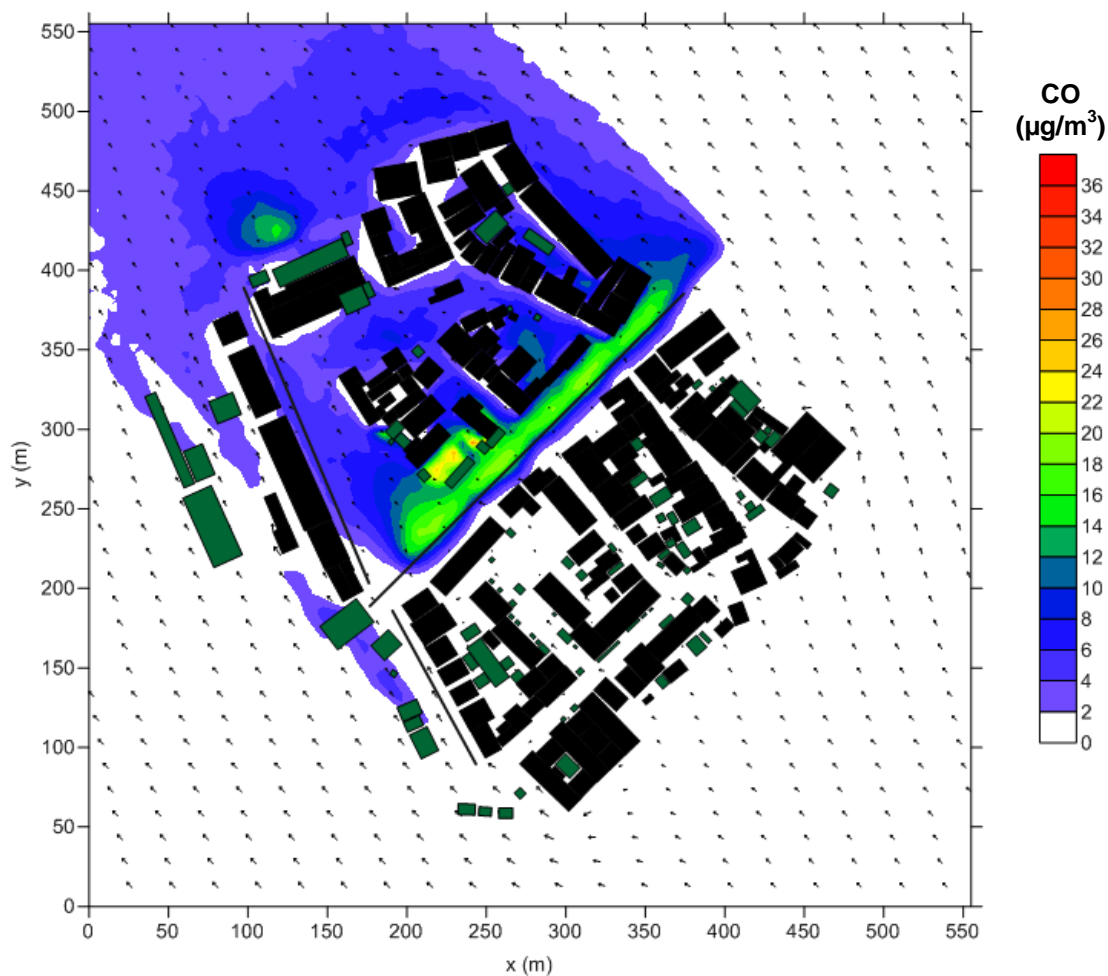


Figura 38: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 0 - 1 horas.



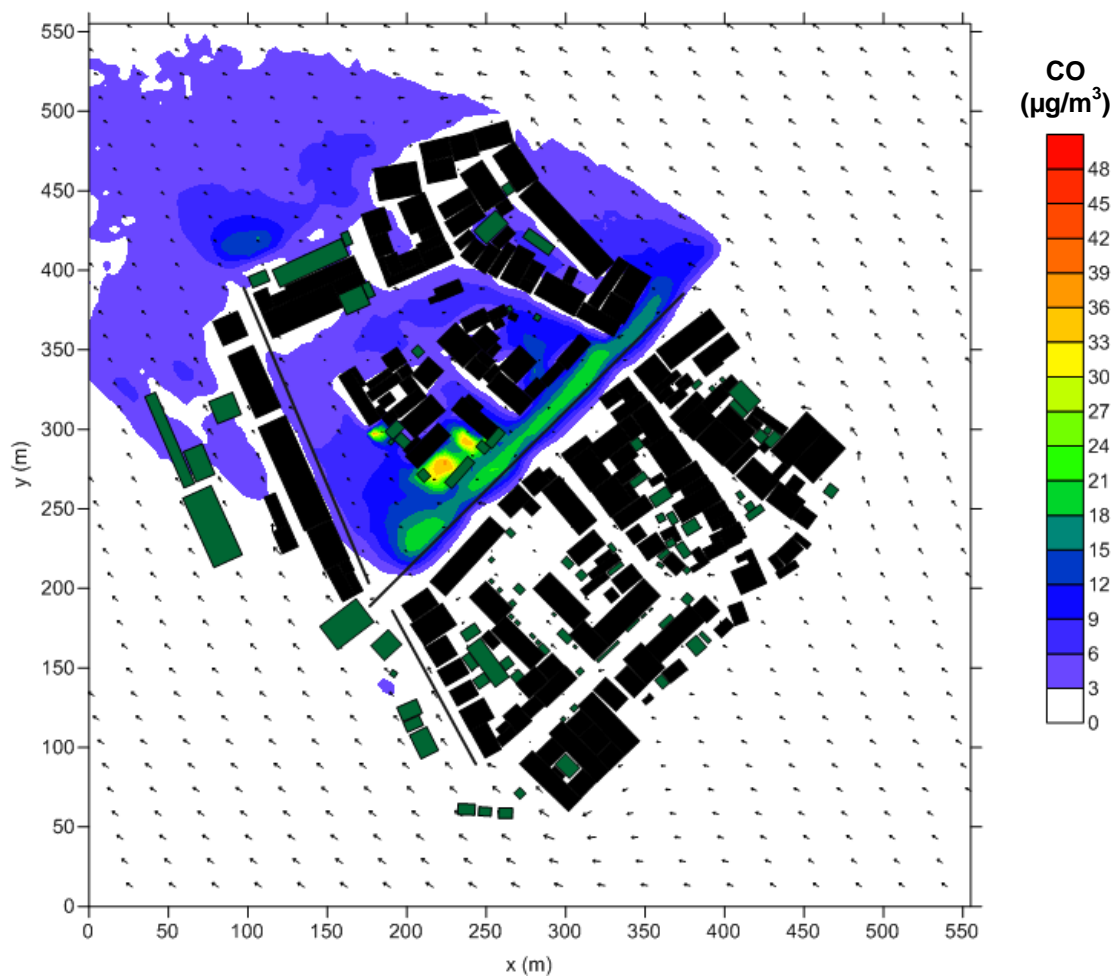


Figura 39: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 1 - 2 horas.

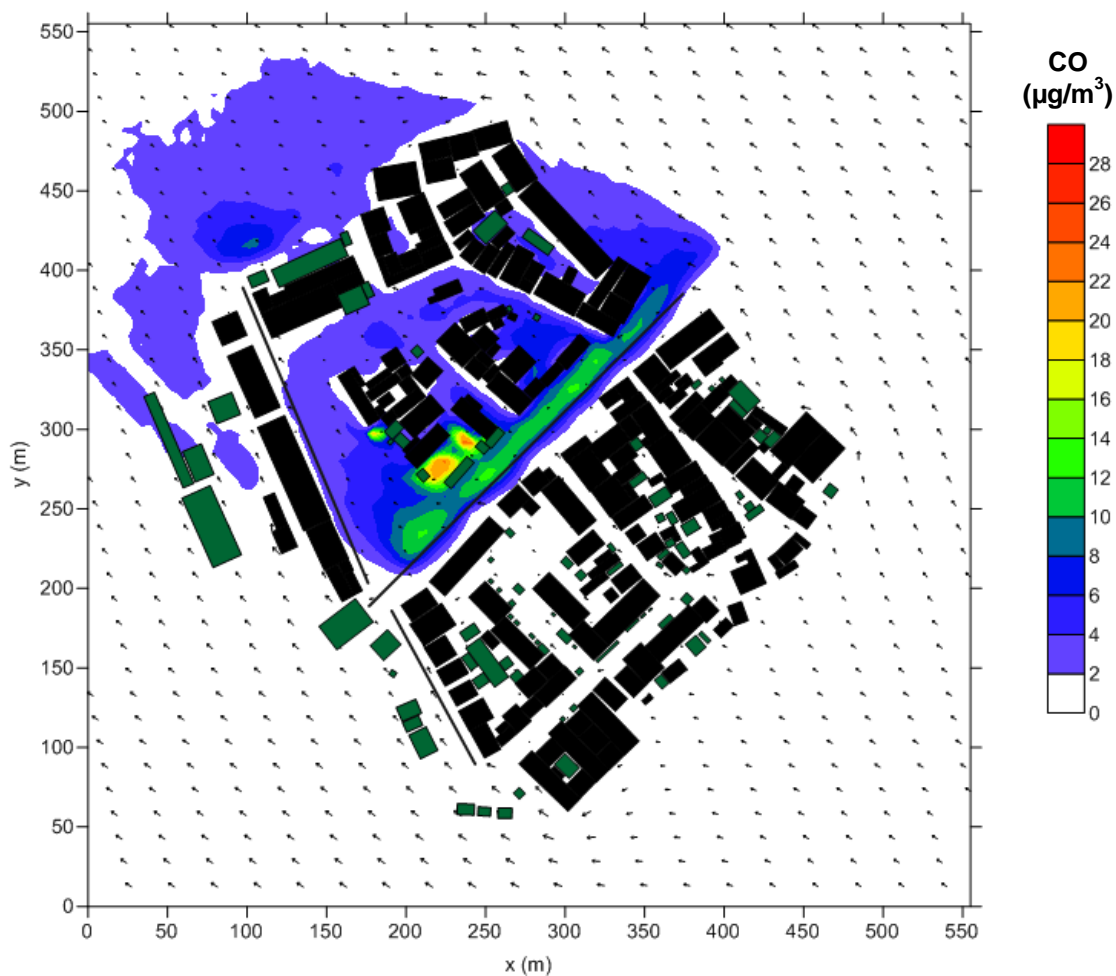


Figura 40: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 2 - 3 horas.

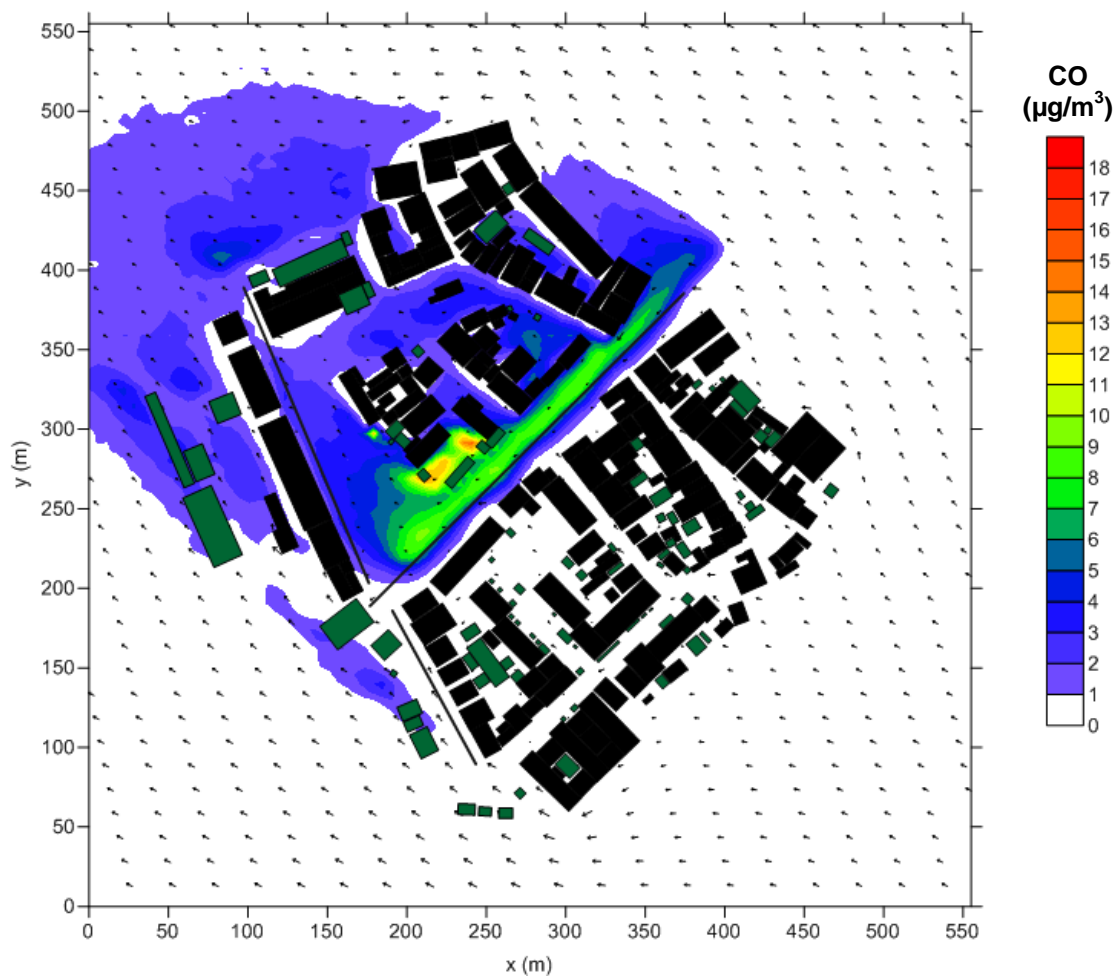


Figura 41: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 3 - 4 horas.

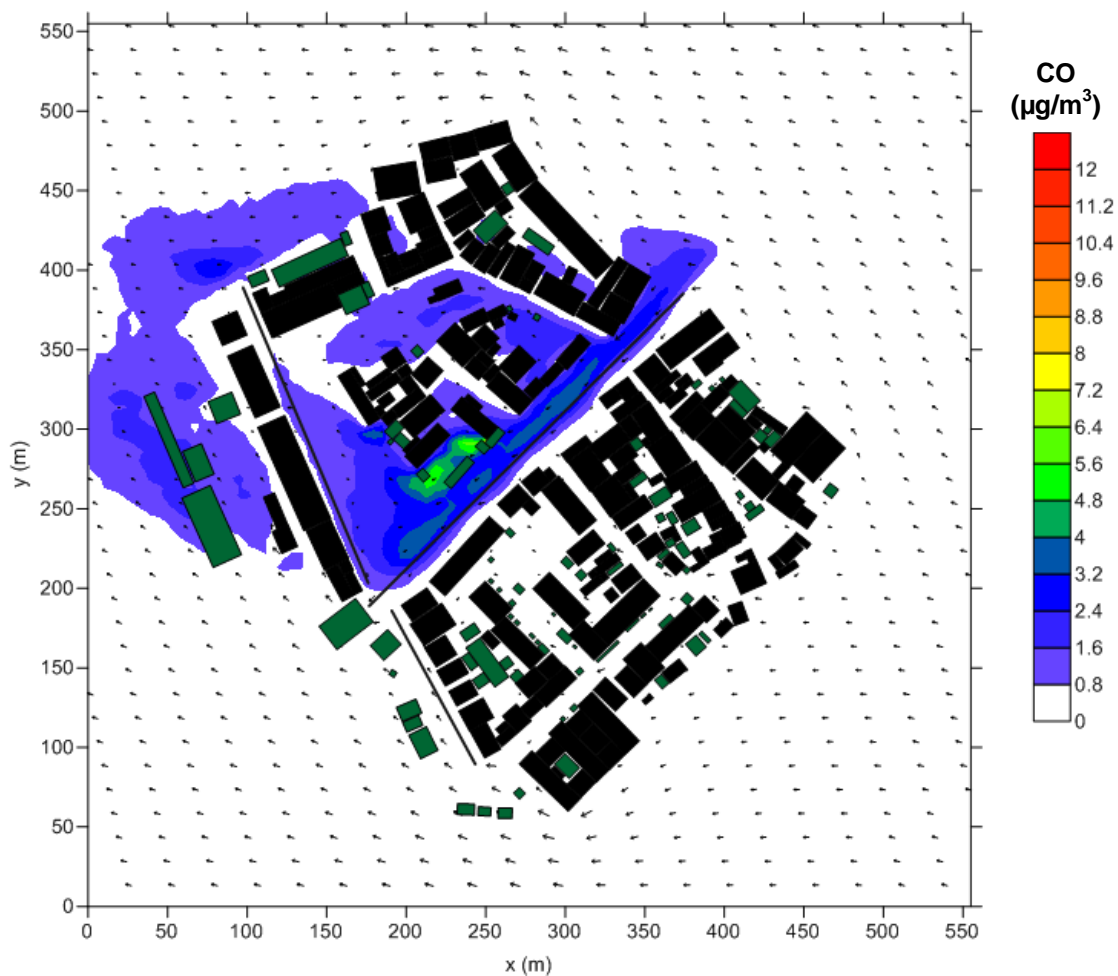


Figura 42: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 4 - 5 horas.

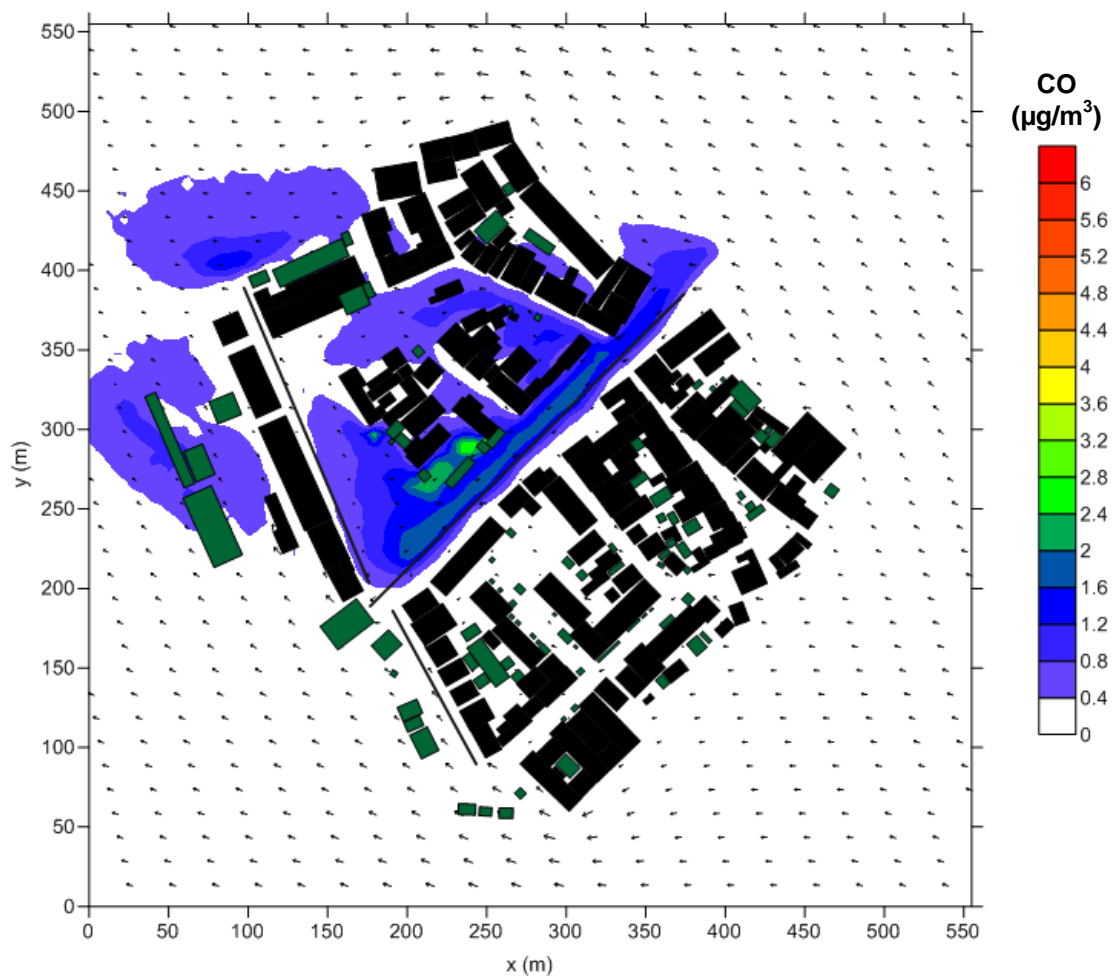


Figura 43: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 5 - 6 horas.

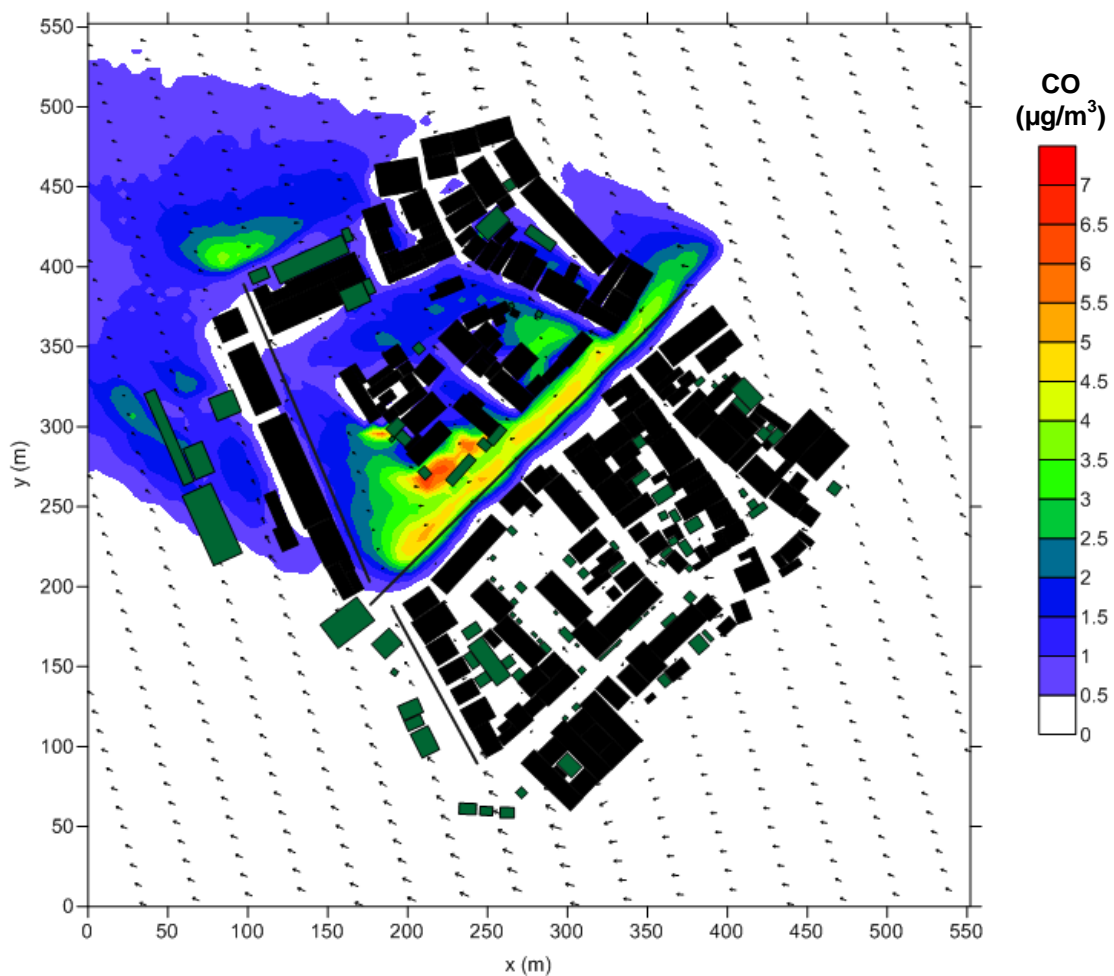


Figura 44: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 6 - 7 horas.

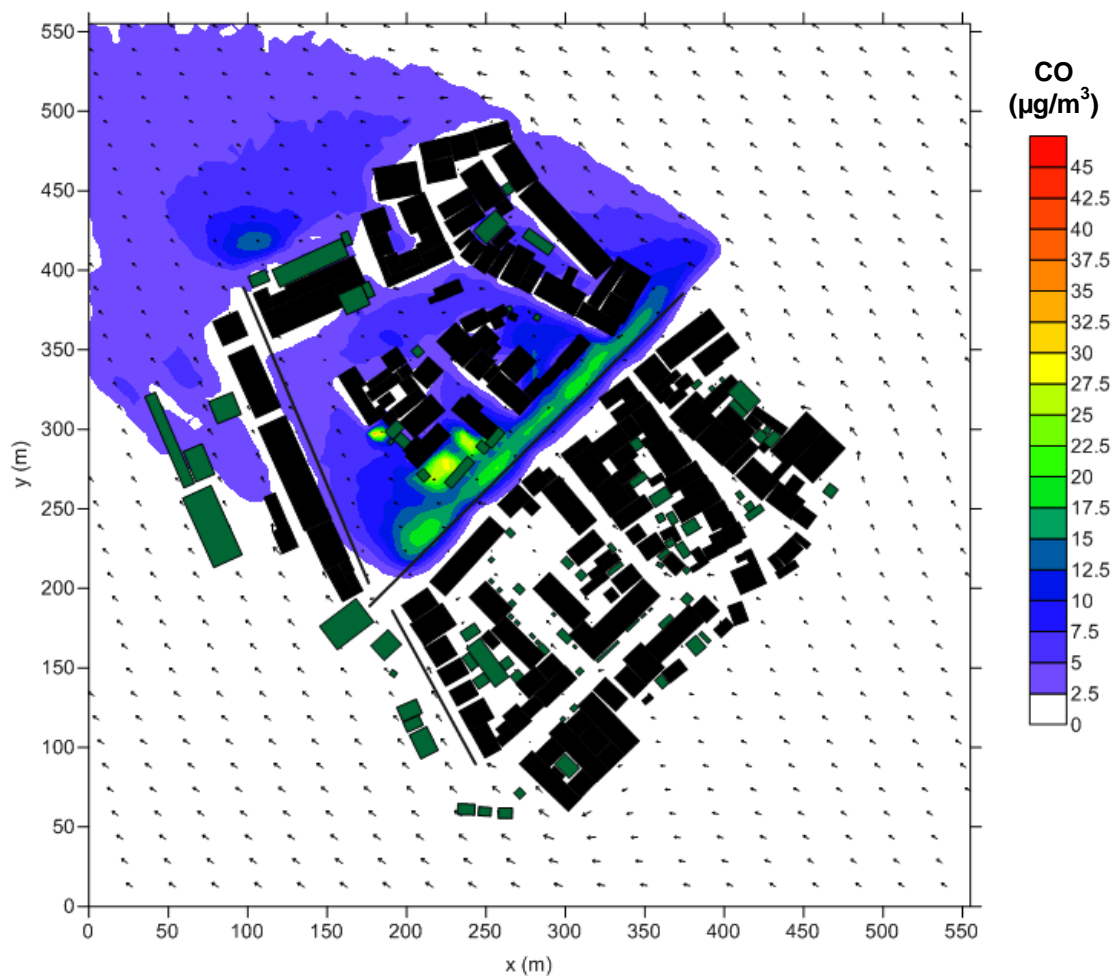


Figura 45: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 7 - 8 horas.

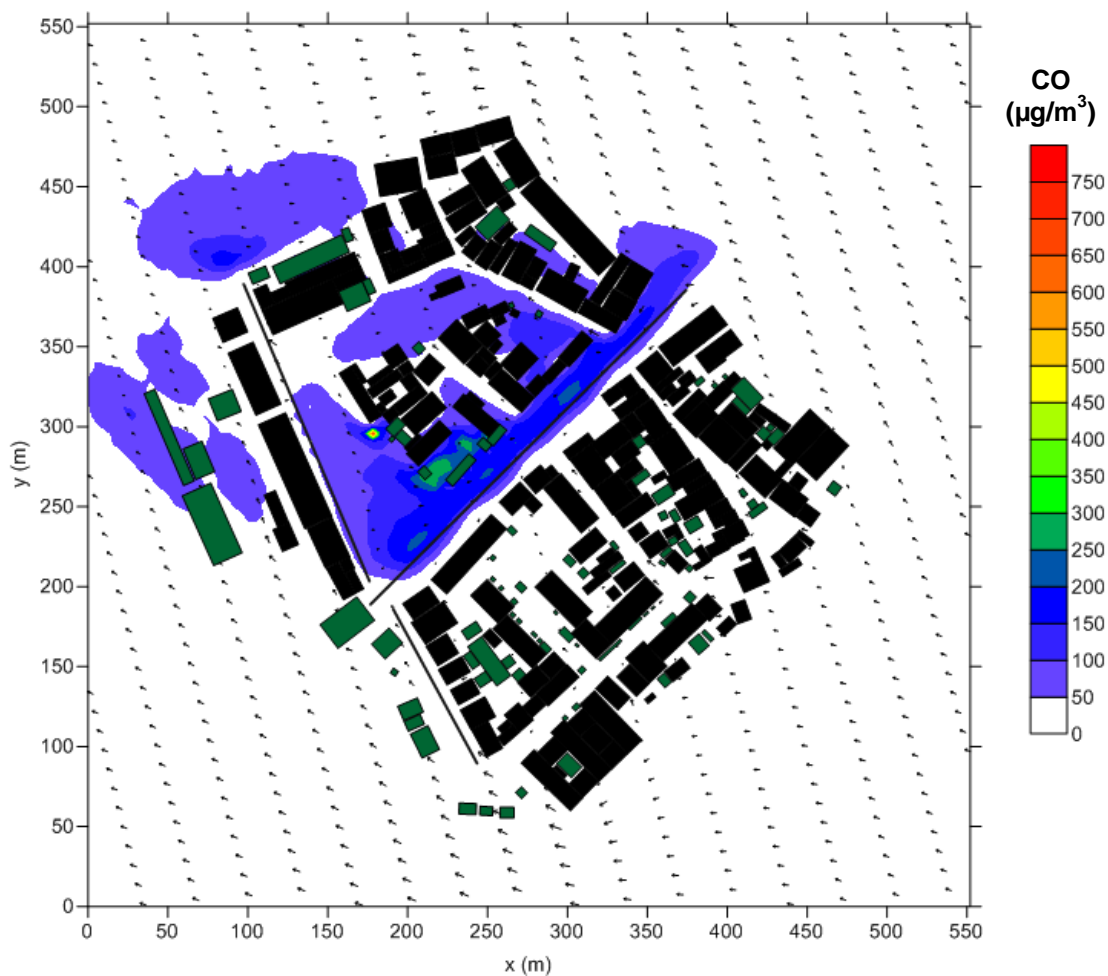


Figura 46: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 9 - 10 horas.



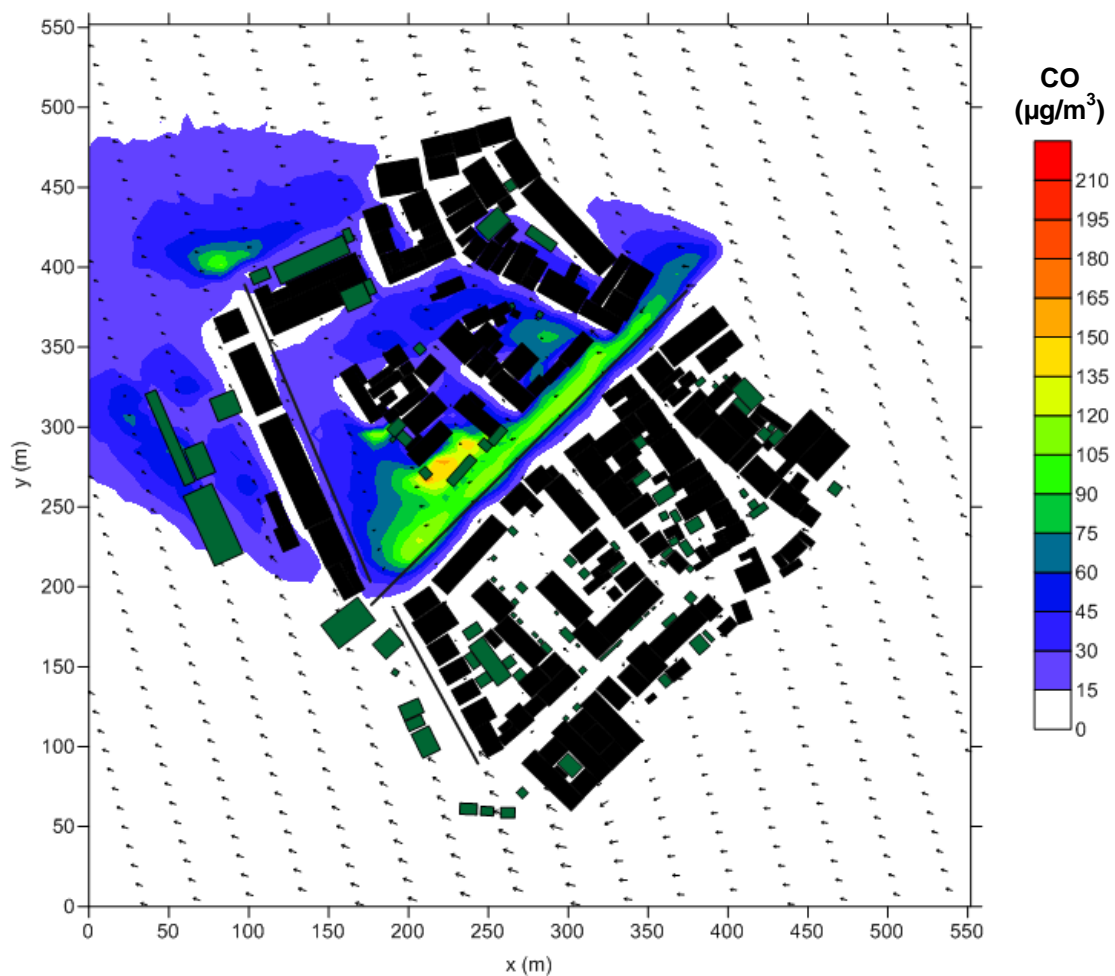


Figura 47: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 10 - 11 horas.

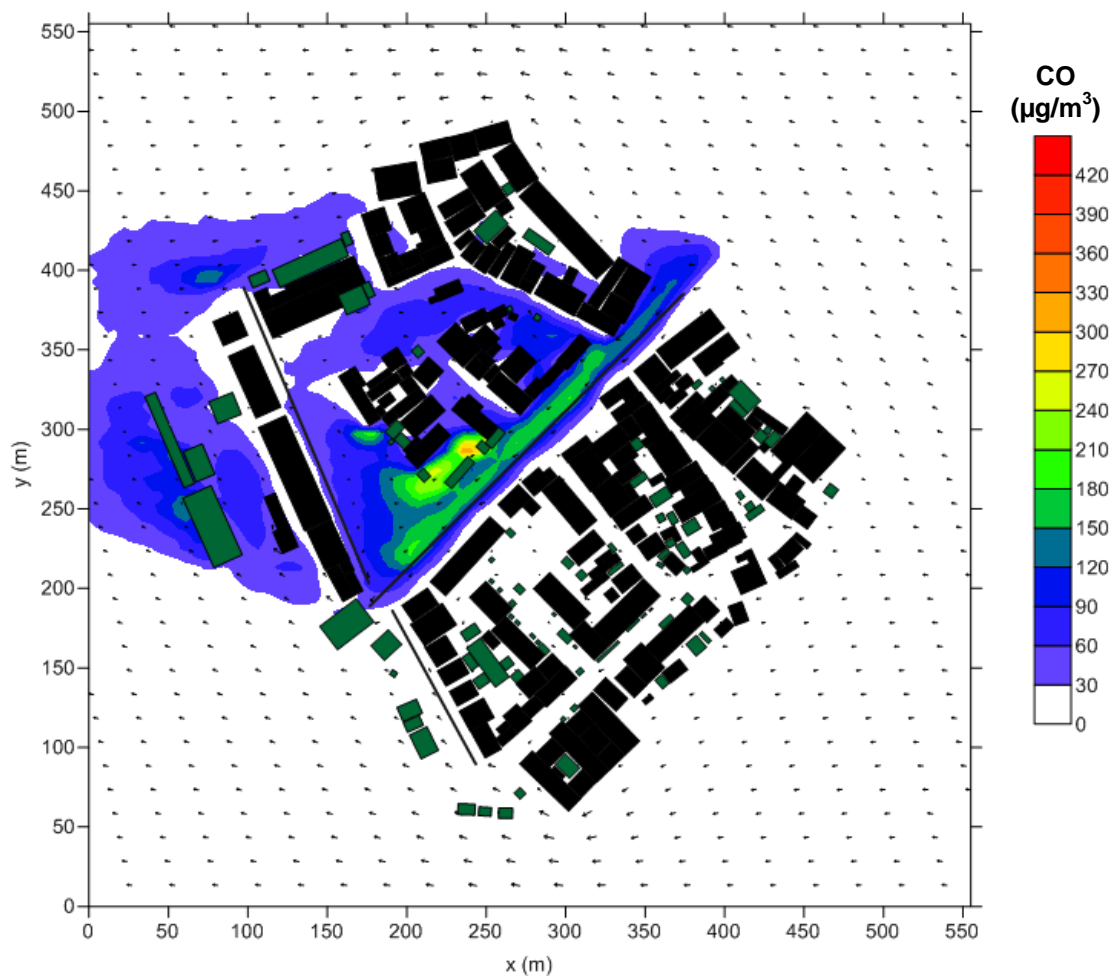


Figura 48: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 11 - 12 horas.

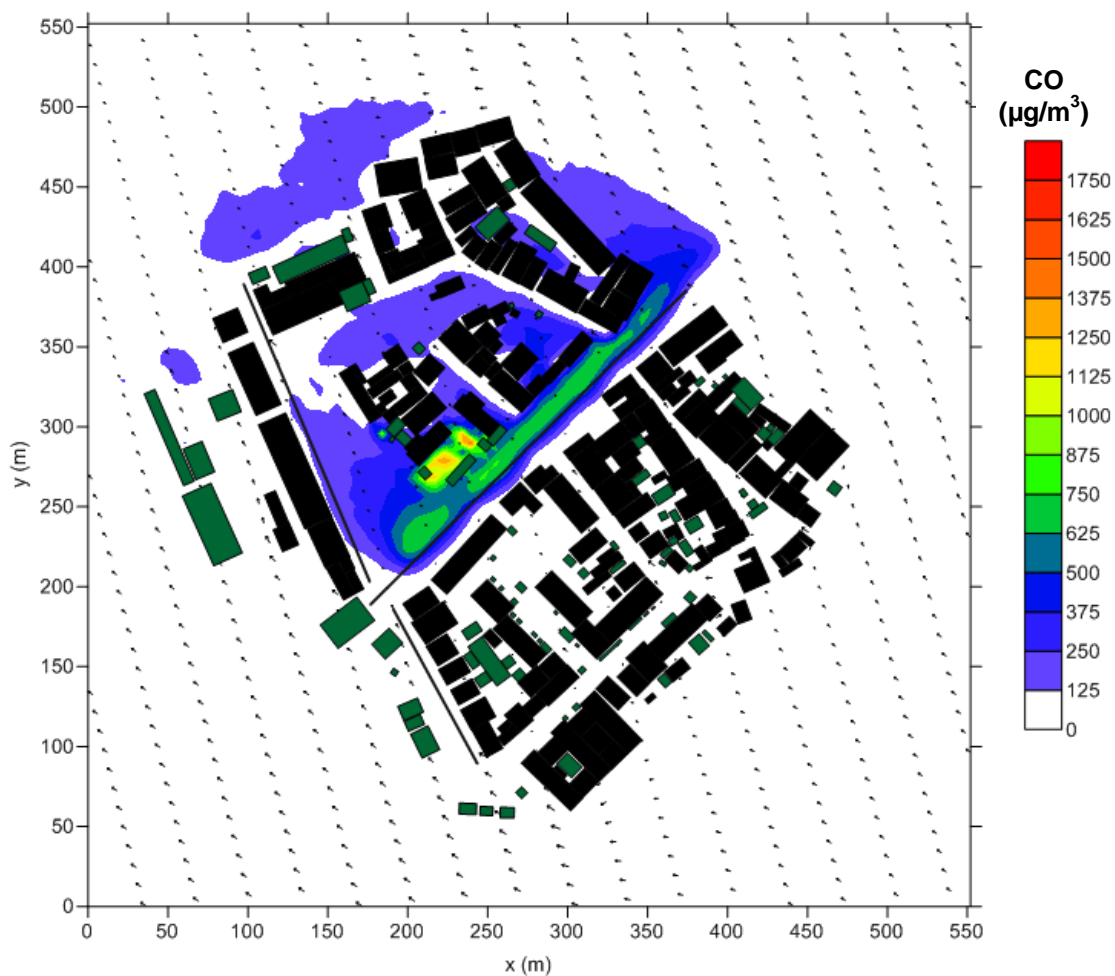


Figura 49: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 12 - 13 horas.

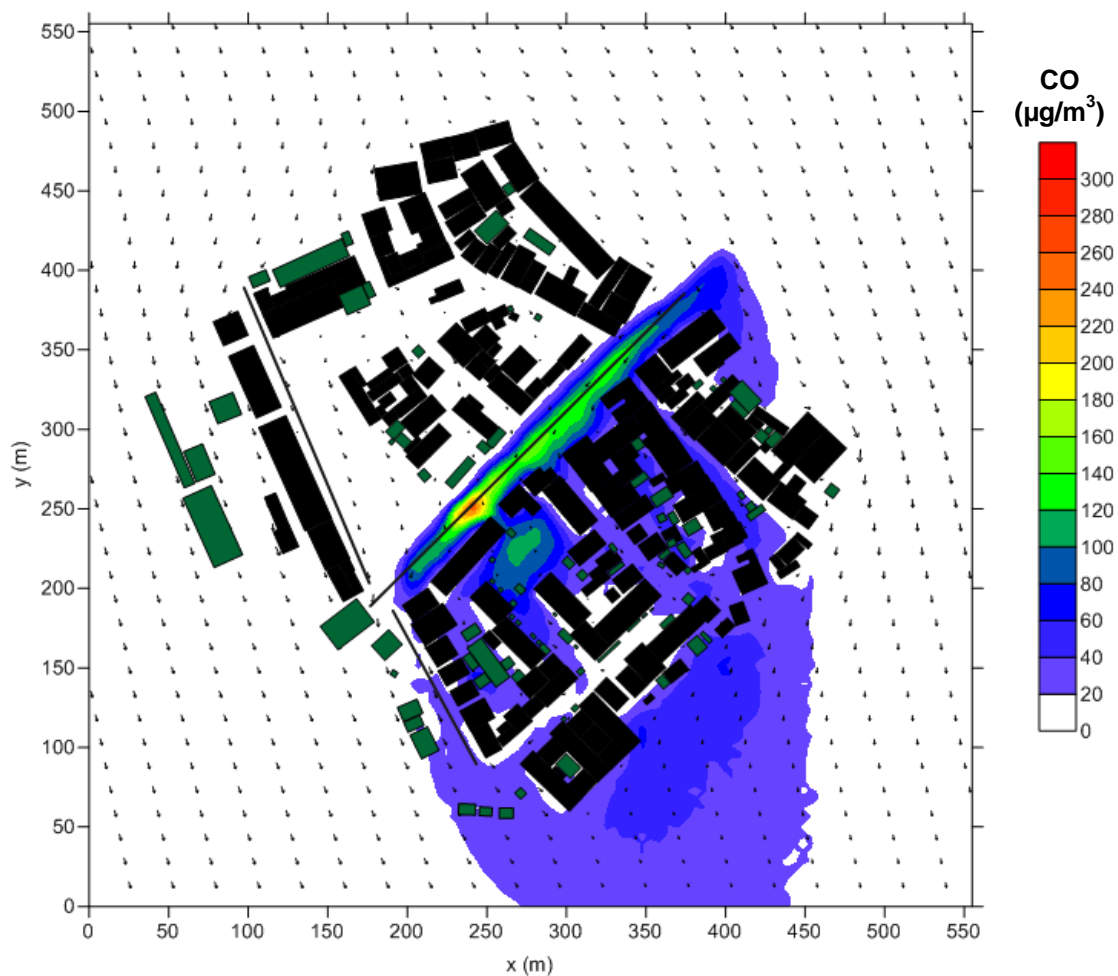
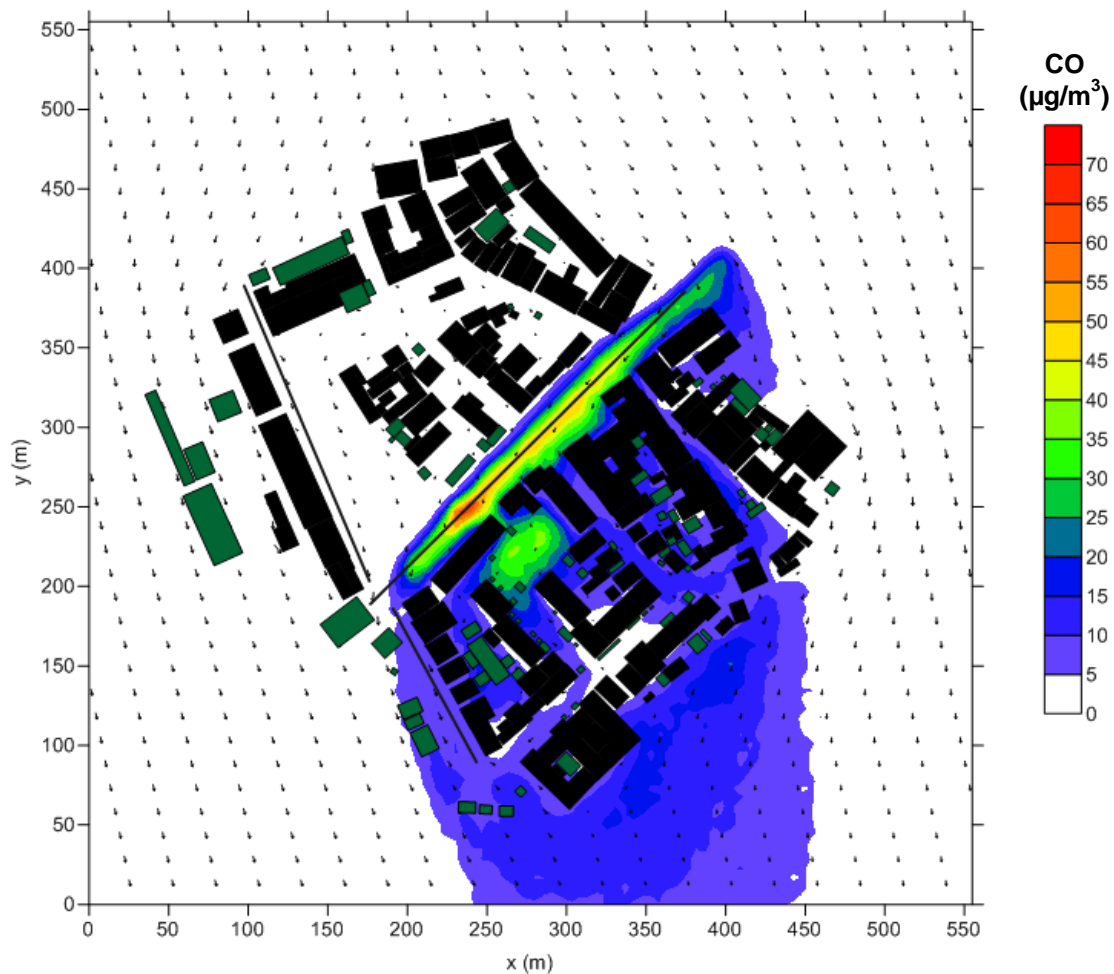


Figura 50: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 13 - 14 horas.



**Figura 51:** Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 14 - 15 horas.

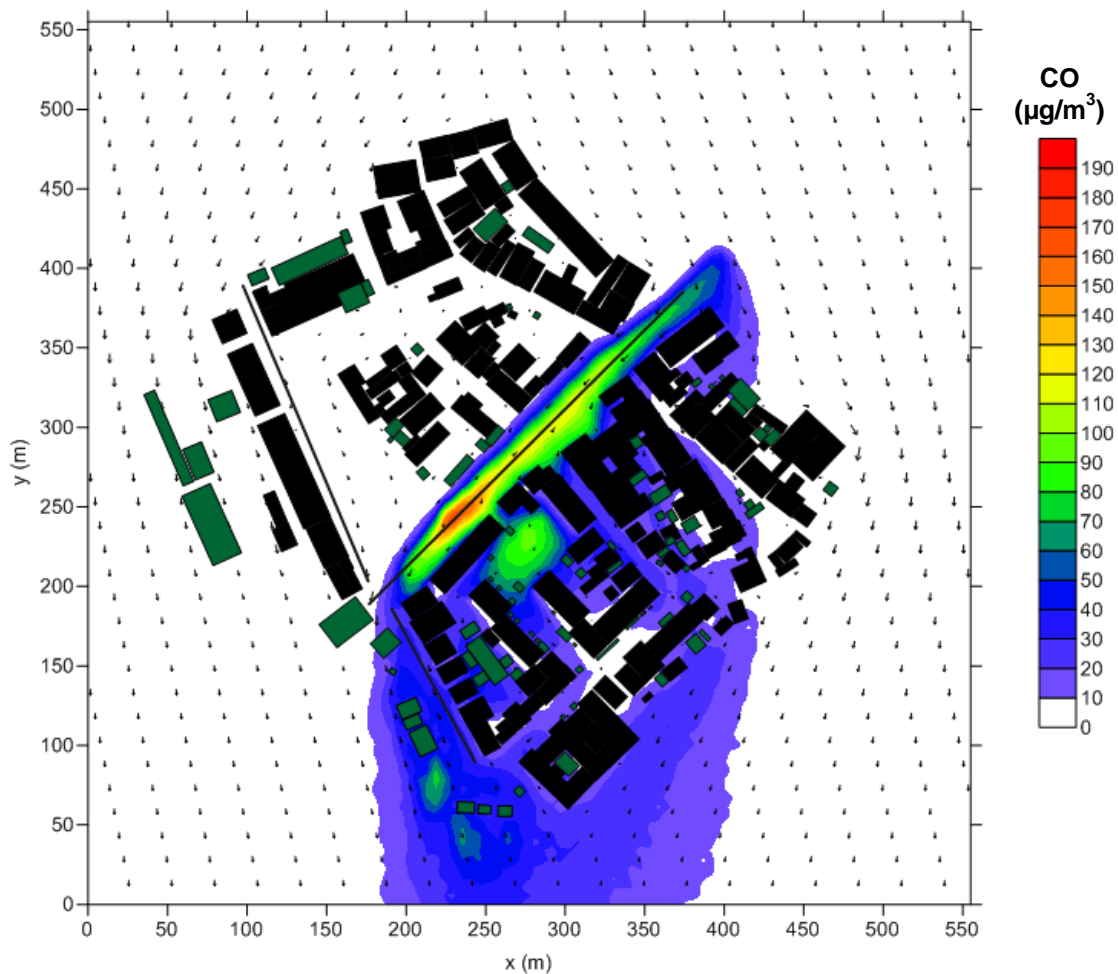


Figura 52: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 16 - 17 horas.

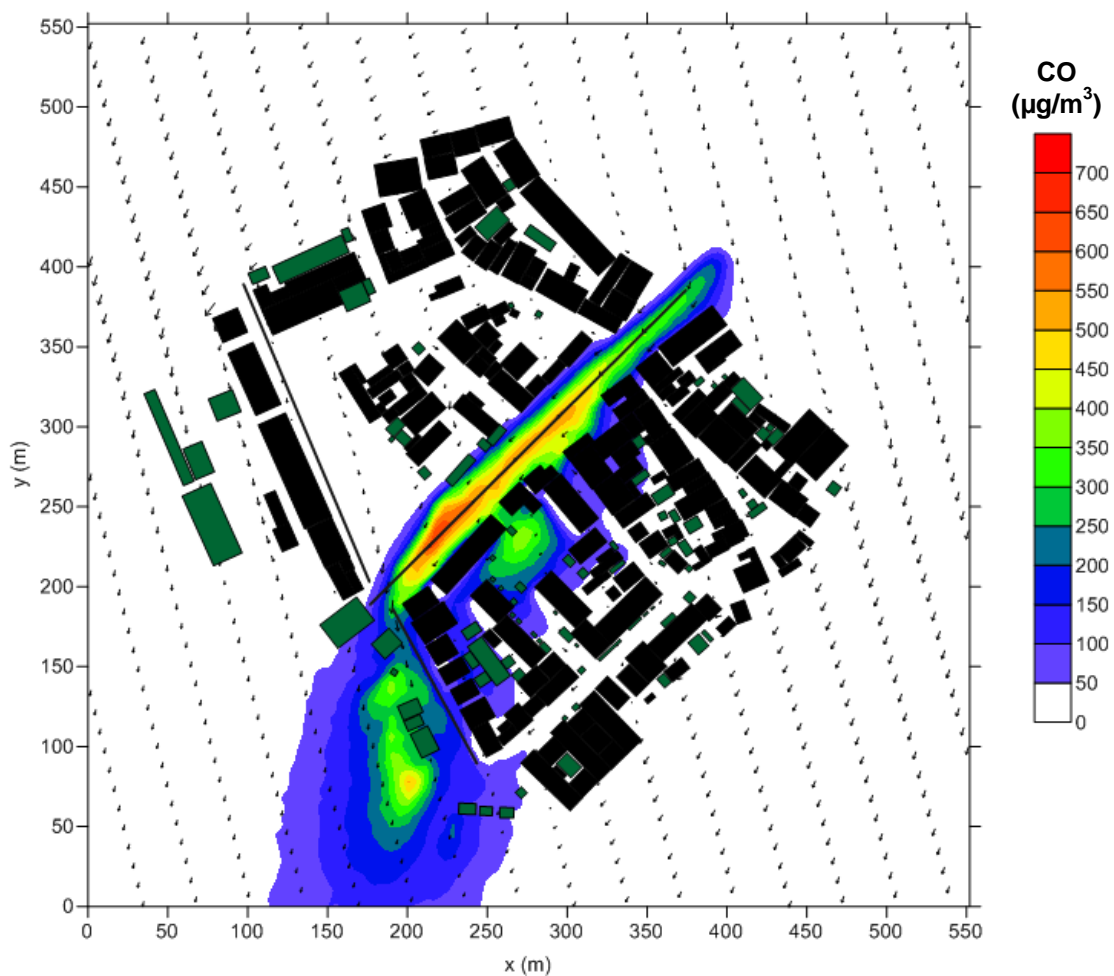


Figura 53: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 17 - 18 horas.

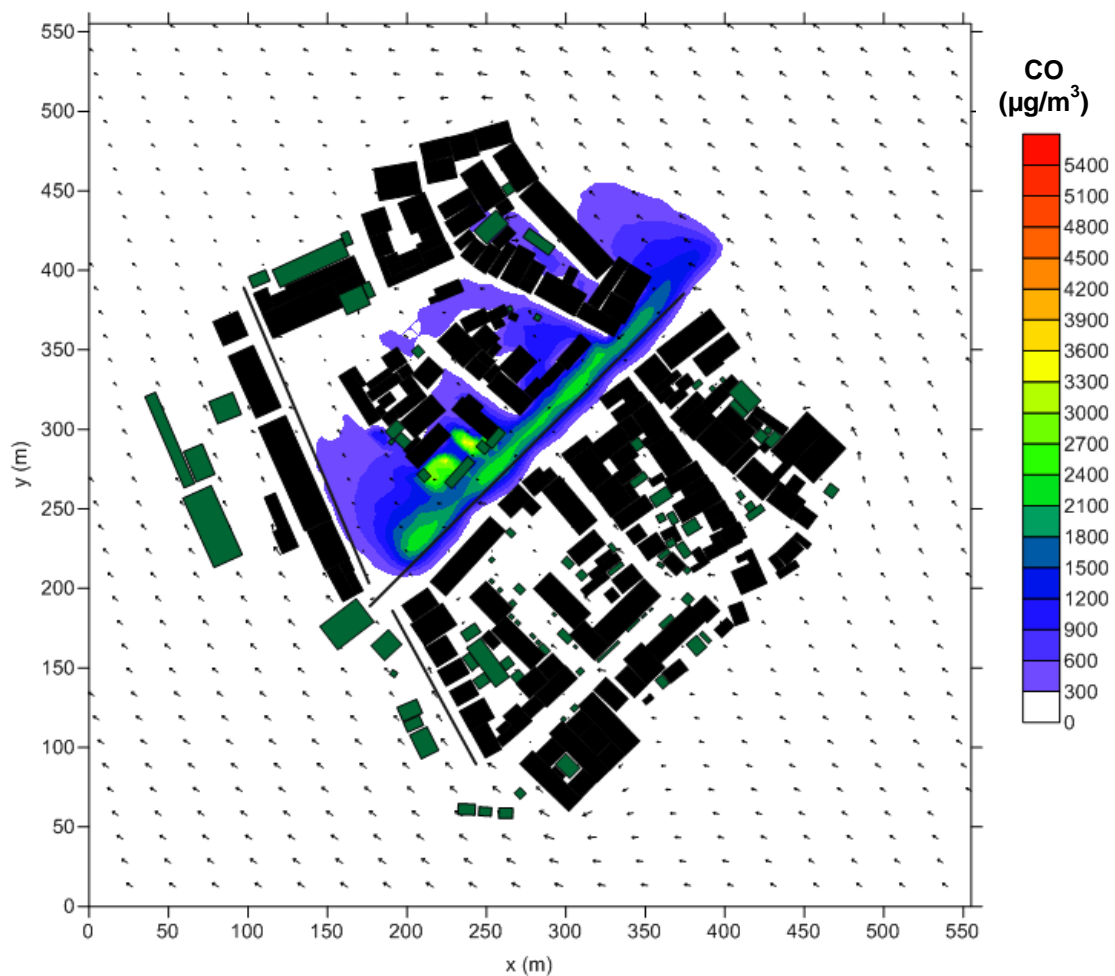


Figura 54: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 19 - 20 horas.



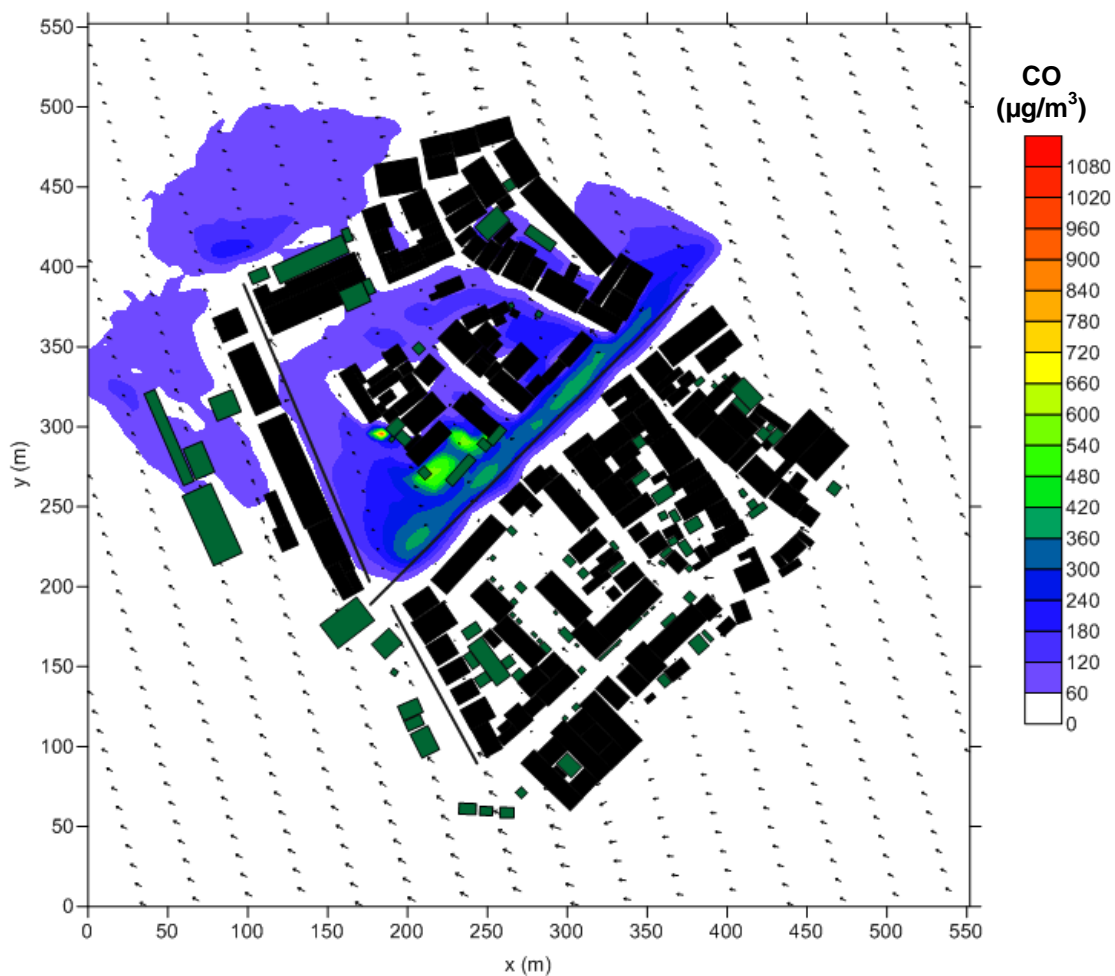


Figura 55: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 20 - 21 horas.

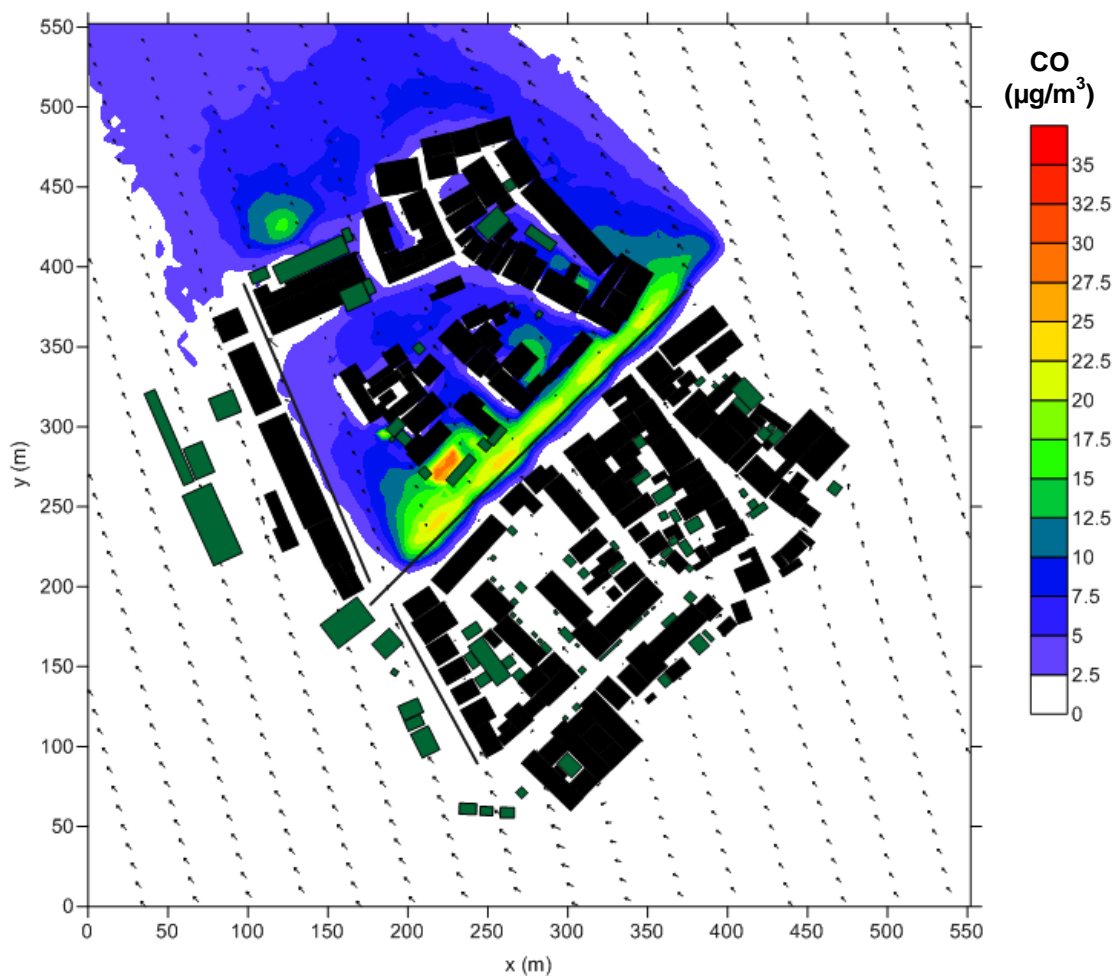


Figura 56: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 21 - 22 horas.

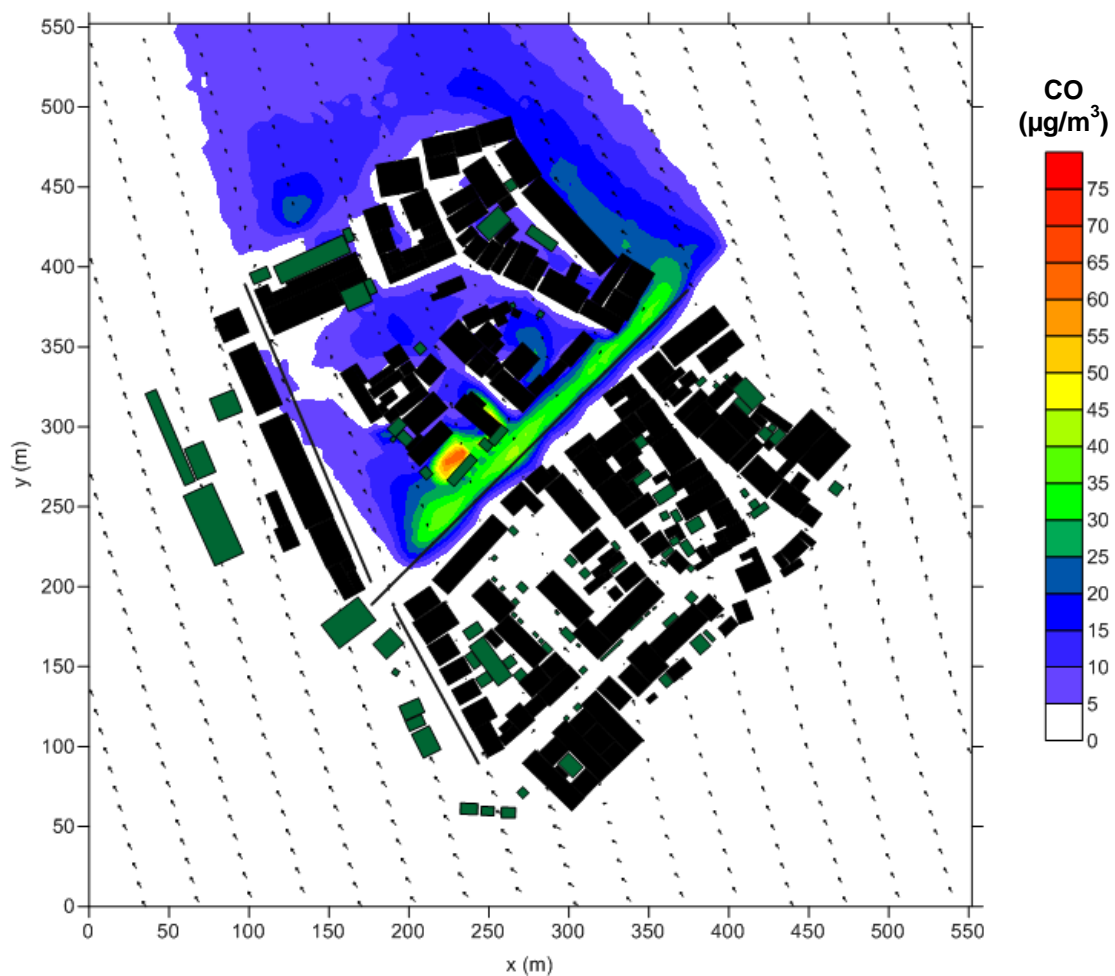


Figura 57: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 22 - 23 horas.

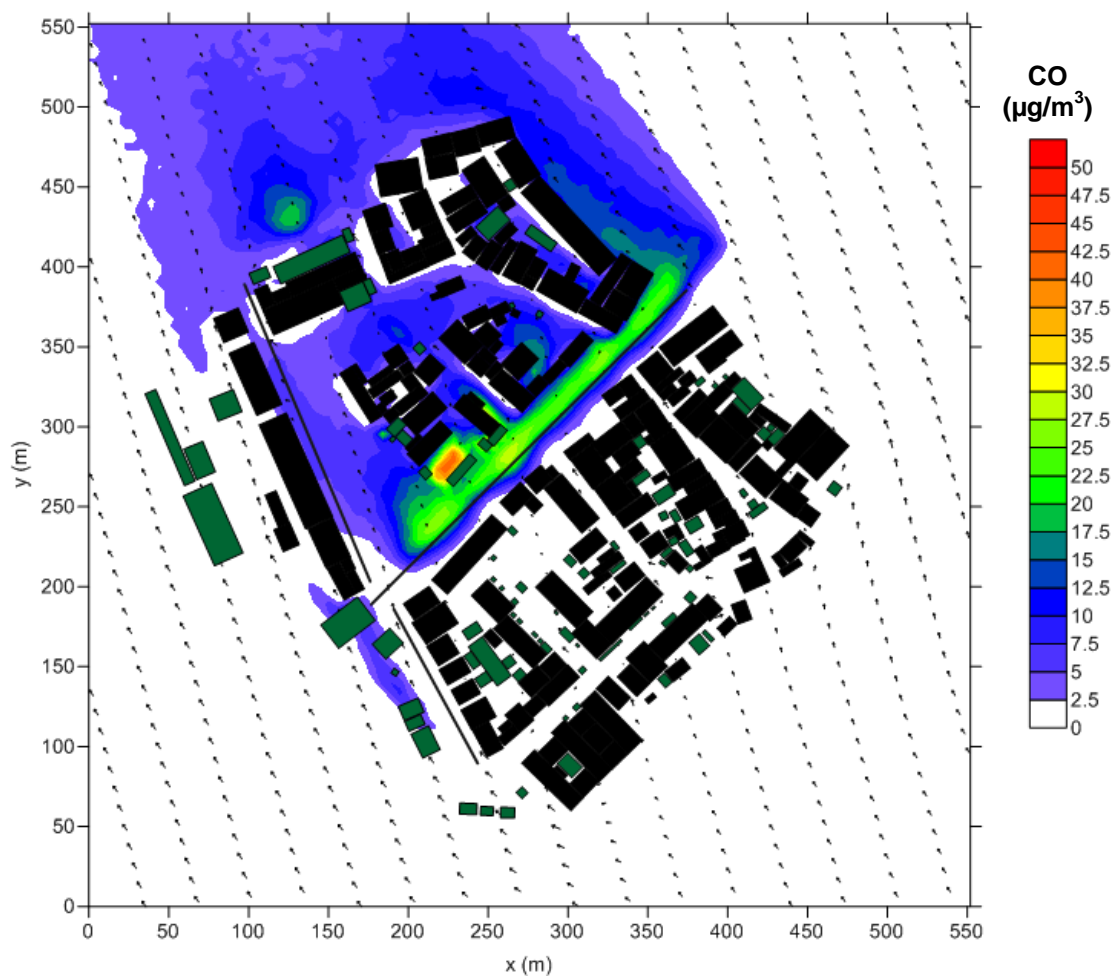


Figura 58: Representação no Surfer da simulação realizada para o período das 23 - 24 horas.

→ **Expressões matemáticas dos parâmetros estatísticos utilizados na avaliação do desempenho dos modelos VADIS e IAQX [Chang e Hanna, 2005]**

- Média,  $\mu$ :

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

- Desvio-padrão,  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

- Desvio médio,  $d$ :

$$d = \bar{M} - \bar{S} \quad (11)$$

Sendo, M o valor medido e S o valor simulado.

- Desvio fracionado, FB:

$$FB = \frac{(\bar{M} - \bar{S})}{0.5 (\bar{M} + \bar{S})} \quad (12)$$

- Desvio médio geométrico, MG:

$$MG = \exp(\overline{\ln M} - \overline{\ln S}) \quad (13)$$

- Erro quadrático médio normalizado, NMSE:

$$NMSE = \frac{\overline{(M - S)^2}}{\bar{M} \bar{S}} \quad (14)$$

- Variância geométrica, VG:

$$VG = \exp [\overline{(\ln M - \ln S)^2}] \quad (15)$$

- Coeficiente de correlação, R:

$$R = \frac{\overline{(M - \bar{M})(S - \bar{S})}}{\sigma_M \sigma_S} \quad (16)$$

- Fração de previsões dentro de um fator 2 das observações, FAC2:

$$FAC2 = \text{fração de dados que satisfaz } 0.5 \leq \frac{S}{M} \leq 2.0 \quad (17)$$