BE WATER
ÁGUAS DE VALONGO

PROJETO DE EXECUÇÃO DA ETAR DE ERMESINDE E ALFENA



ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL CONSOLIDADO

RELATÓRIOS TÉCNICOS
VOLUME 3 – MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE POLUENTES

SETEMBRO 2025

AQUALOGUS
Engenharia e Ambiente

www.aqualogus.com

INFORMAÇÃO DO PROJETO

Cliente:	Águas de Valongo
Nome do Projeto:	Estudo de Impacte Ambiental do Projeto de Execução da ETAR de Ermesinde e Alfena
Designação:	Projeto de Execução da ETAR de Ermesinde e Alfena – Estudo de Impacte Ambiental
Data de Assinatura do Contrato:	9 de maio de 2024
Autores:	AQUALOGUS, Engenharia e Ambiente, Lda. (AQUALOGUS)

INFORMAÇÃO DO ENTREGÁVEL

Entregável: **Estudo de Impacte Ambiental Consolidado**

Preparado por: AQUALOGUS

Rev. N.º	Ref.:	Data	Elaborado	Verificado	Aprovado
0	261.01.03	22/09/2025	MDM	FMR	DGE

PROJETO DE EXECUÇÃO DA ETAR DE ERMESINDE E ALFENA

ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL

ÍNDICE DE VOLUMES

RELATÓRIO

VOLUME 1 – PEÇAS ESCRITAS

TOMO 1 – CAPÍTULOS INTRODUTÓRIOS

TOMO 2 – CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA

TOMO 3 – AVALIAÇÃO DE IMPACTES

TOMO 4 – MITIGAÇÃO, MONITORIZAÇÃO E CONCLUSÕES

VOLUME 2 – PEÇAS DESENHADAS

RELATÓRIOS TÉCNICOS

VOLUME 1 – SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NO RIO LEÇA

VOLUME 2 – PLANO DE GESTÃO AMBIENTAL

VOLUME 3 – MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE POLUENTES

RESUMO NÃO TÉCNICO

PROJETO DE EXECUÇÃO DA ETAR DE ERMESINDE E ALFENA

ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL

RELATÓRIOS TÉCNICOS

VOLUME 3 – MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE POLUENTES

ÍNDICES

TEXTO **Pág.**

1 INTRODUÇÃO 3
2 LIMITAÇÕES E PRESSUPOSTOS DO MODELO 4
3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA 5
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 5
3.2 ALTURA EFETIVA DA CHAMINÉ 5
3.3 PARÂMETROS DE DISPERSÃO 5
3.4 HIPÓTESES ASSUMIDAS 6
4 CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO 7
5 RESULTADOS 8
5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO 8
5.2 CONCENTRAÇÕES PRÓXIMAS DO SOLO 11
6 BIBLIOGRAFIA 14

FIGURAS **Pág.**

Figura 2 Secção vertical da pluma gaussiana, para uma taxa de emissão de NOx de 350 g/h e diferentes regimes de vento. 9
Figura 3 Secção vertical da pluma gaussiana, para uma taxa de emissão de NOx de 675 g/h e diferentes regimes de vento. 10
Figura 4 Variação da concentração de NOx em função da distância à chaminé, para uma altura de 2 m. As curvas representam diferentes cenários de emissão (350 em cima e 675 g/h em baixo), e para uma velocidade média de vento de 3.9 m/s, evidenciando o ponto de máxima concentração próximo dos 46 m. 11

1 INTRODUÇÃO

Para a avaliação da dispersão atmosférica de poluentes foi adotado o modelo gaussiano de pluma estacionário, um dos métodos mais consolidados e amplamente utilizados a nível internacional em estudos de qualidade do ar (Turner, 1994; Seinfeld & Pandis, 2016). Este modelo permite descrever o comportamento da dispersão de um poluente emitido continuamente por uma fonte pontual (e.g., chaminé), em função de variáveis como a velocidade e direção do vento, a turbulência atmosférica e a altura efetiva da emissão, como ilustrado na **Figura 1.1**.

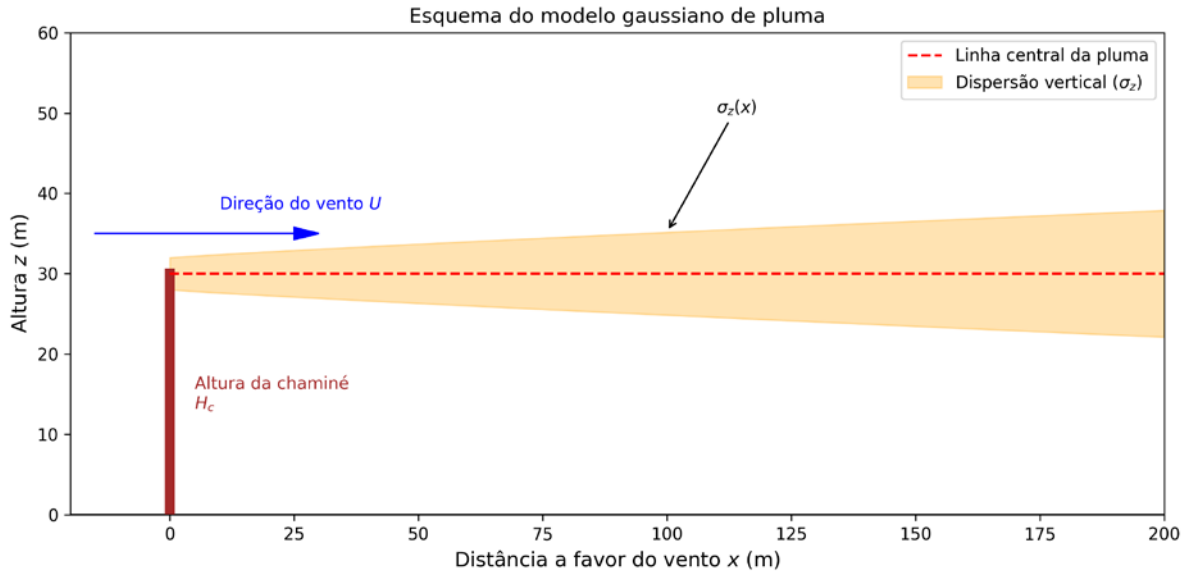


Figura 1.1 – Esquema do modelo gaussiano de pluma, representando os principais parâmetros (altura da chaminé, direção do vento, coeficientes de dispersão) e a linha central da pluma. O significado da informação apresentada na figura é detalhado posteriormente no texto.

A escolha deste modelo prende-se com o facto de se tratar de uma ferramenta reconhecida e recomendada em normas e guias técnicos (US-EPA, 2004; EEA, 2019), capaz de fornecer uma primeira estimativa das concentrações de poluentes no espaço envolvente.

Considera-se que não se justifica a aplicação de modelos mais complexos (e.g., lagrangeanos ou eulerianos tridimensionais), dado que:

- a sua implementação exigiria dados meteorológicos de alta resolução (horários ou sub-horários), inexistentes para a área de estudo;
- o tempo e dados necessários para a sua calibração e execução não se coaduna com a natureza da informação disponível nesta fase da avaliação.

Apesar de constituir uma aproximação simplificada, o modelo gaussiano de pluma estacionário é, ainda assim, reconhecido como uma ferramenta de referência para análises preliminares de dispersão atmosférica, sendo amplamente aceite como suporte em Estudos de Impacte Ambiental e em processos de licenciamento (Arya, 1999).

2 LIMITAÇÕES E PRESSUPOSTOS DO MODELO

O modelo aqui utilizado é estacionário, o que significa que assume condições constantes ao longo de um determinado período. Em vez de fornecer séries temporais de concentrações, produz uma solução média representativa, aplicável a uma situação de emissão contínua em condições meteorológicas estáveis (Seinfeld & Pandis, 2016).

Os principais pressupostos são:

- A taxa de emissão da fonte é constante no tempo (libertação contínua).
- O vento mantém velocidade e direção constantes durante o período considerado.
- A atmosfera encontra-se em regime estacionário, sem variações rápidas na estabilidade ou na intensidade da turbulência.
- O terreno é plano e homogéneo, sem obstáculos significativos que alterem a dispersão.
- Os poluentes comportam-se como traçadores passivos, não sofrendo reações químicas, deposição ou transformações relevantes.
- A dispersão nas direções transversal e vertical segue uma distribuição gaussiana.

Importa salientar que estes pressupostos podem conduzir a subestimações ou sobrestimações locais em situações de:

- variações rápidas de vento e estabilidade atmosférica,
- topografia complexa, com relevos ou obstáculos de grande escala,
- processos químicos ou deposição relevantes no tempo de transporte.

Ainda assim, no contexto deste estudo, estas limitações não comprometem a validade da avaliação realizada, uma vez que a aplicação do modelo fornece uma aproximação conservadora e metodologicamente aceite para a fase em análise.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A concentração *C(x,y,z)* em função da distância à fonte é expressa por:

$$\mathrm{C(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi\ \mathrm{U}\ \sigma_y(\mathrm{x})\sigma_z(\mathrm{x})} \times \exp\left(-\frac{\mathrm{y}^2}{2\sigma_y(\mathrm{x})^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(\mathrm{z}-\mathrm{H})^2}{2\sigma_z(\mathrm{x})^2}\right) + \exp\left(-\frac{(\mathrm{z}+\mathrm{H})^2}{2\sigma_z(\mathrm{x})^2}\right)\right]$$

onde:

- Q: taxa de emissão do poluente (massa/tempo, tipicamente kg/s ou g/s)
- U: velocidade média do vento (m/s)
- H: altura efetiva da chaminé (m)
- σy(x), σz(x): parâmetros de dispersão horizontal e vertical (m), dependentes da distância x e da classe de estabilidade atmosférica.

3.2 ALTURA EFETIVA DA CHAMINÉ

A altura efetiva da chaminé corresponde à altura real a que a pluma inicia o seu processo de dispersão na atmosfera. Este valor é superior à altura física da chaminé, dado que os gases quentes, ao serem emitidos, continuam a ascender devido a dois mecanismos principais: o empuxo (resultante da menor densidade dos gases quentes face ao ar envolvente) e o momento associado à velocidade de saída dos gases. Assim, a altura efetiva pode ser expressa pela relação:

$$\mathrm{H_{efetiva}} = \mathrm{H_c} + \Delta h_e$$

Onde H_c corresponde à altura geométrica da fonte e Δh_e ao acréscimo gerado pelos efeitos de empuxo e momento. Em termos práticos, isto significa que a pluma não inicia a sua dispersão imediatamente no topo da chaminé, mas sim a uma altura ligeiramente superior, correspondente ao ponto em que a sua ascensão adicional se esgota.

3.3 PARÂMETROS DE DISPERSÃO

No âmbito do modelo gaussiano de pluma, os parâmetros $\sigma_y(x)$ e $\sigma_z(x)$ representam o alargamento transversal e vertical da pluma, respetivamente, em função da distância *x* à fonte.

Estes parâmetros resultam de observações experimentais que descrevem a forma como a turbulência atmosférica promove a mistura dos poluentes, sendo fortemente dependentes das condições de estabilidade atmosférica. Em condições instáveis (e.g., dias ensolarados com convecção), a dispersão ocorre de forma mais rápida, originando valores elevados de $\sigma_y(x)$ e $\sigma_z(x)$. Em contrapartida, em condições estáveis (e.g., noites calmas), a pluma mantém-se mais confinada, com valores reduzidos destes parâmetros.

Na prática, $\sigma_y(x)$ e $\sigma_z(x)$ são frequentemente determinados a partir de formulações empíricas, como as curvas de Pasquill–Gifford para classes de estabilidade atmosférica A a F. No presente estudo, foram utilizados parâmetros de forma simplificada, com recurso a expressões aproximadas do tipo lei de potência:

$$\sigma_y(\mathrm{x}) = 0.1 \cdot x^{0.9} + 5$$

$$\sigma_z(\mathrm{x}) = 0.05 \cdot x^{0.9} + 2$$

Estas expressões, apesar de não corresponderem a um enquadramento específico de estabilidade, permitem ilustrar adequadamente a tendência de crescimento da dispersão com a distância e constituem uma aproximação conservadora para efeitos de avaliação preliminar.

3.4 HIPÓTESES ASSUMIDAS

Para a sua aplicação neste estudo, consideraram-se as seguintes hipóteses simplificativas, típicas do modelo (Turner, 1994; Seinfeld & Pandis, 2016):

- O vento mantém direção e velocidade constantes ao longo do período analisado.
- A atmosfera é considerada homogénea e em regime estacionário.
- O terreno é plano e sem obstáculos significativos à dispersão.
- Não são consideradas reações químicas, deposição seca ou húmida durante o transporte da pluma.

4 CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Para a avaliação da dispersão atmosférica de NOx associada ao funcionamento da ETAR, foram considerados dois cenários de emissão pelo motogerador:

- Cenário conservativo: emissão de 250 mg/Nm³, correspondendo a uma libertação de aproximadamente 350 g/h de NOx;
- Cenário extremo: emissão de 500 mg/Nm³, correspondendo a uma libertação de aproximadamente 675 g/h de NOx.

No que respeita à altura de emissão, considerou-se a altura geométrica da chaminé de 5 m, acrescida de um incremento devido ao empuxo térmico e à velocidade de exaustão. Para este acréscimo foi adotado o valor de 1,2 m, por se situar no intervalo recomendado (0,8–1,5 m). Assim, a altura efetiva da chaminé utilizada na simulação foi de 6,2 m.

Relativamente às condições meteorológicas, foram utilizados dados do SNIRH, que indicam uma velocidade média mensal do vento entre 12 e 16 km/h (equivalente a 3,3–4,4 m/s). Para abranger a variabilidade observada, consideraram-se os dois extremos deste intervalo, bem como o valor intermédio de 14 km/h (3,9 m/s).

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Foram avaliados dois cenários de emissão de NOx pelo motogerador, correspondentes a taxas de emissão de 350 g/h (**Figura 5.1**) e 675 g/h (**Figura 5.2**), considerando para cada caso três valores distintos de velocidade média do vento: 3,3 m/s, 3,9 m/s e 4,4 m/s.

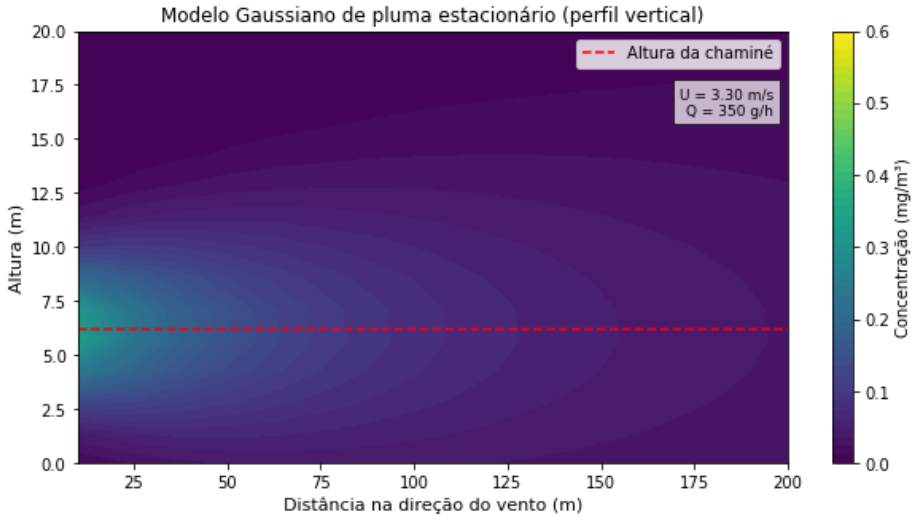
De forma geral, observa-se que a concentração máxima prevista pelo modelo é diretamente proporcional à taxa de emissão (Q). Assim, para condições de vento idênticas, o cenário de 675 g/h apresenta valores de concentração superiores aos obtidos com 350 g/h, refletindo o incremento na carga poluente emitida.

Por outro lado, o vento exerce um papel determinante na diluição da pluma. Para ambos os valores de Q, verifica-se que velocidades de vento mais baixas (3,3 m/s) conduzem a concentrações mais elevadas e a uma pluma mais confinada, com maior impacte no espaço próximo da fonte emissora. À medida que a velocidade do vento aumenta (3,9 e 4,4 m/s), a dispersão torna-se mais eficiente, originando concentrações mais reduzidas em todos os pontos, embora com uma maior extensão longitudinal da pluma.

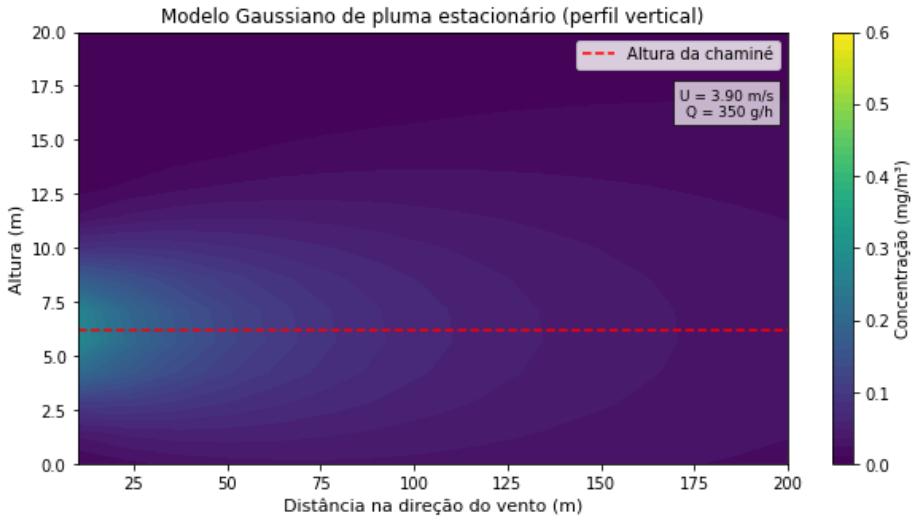
Comparando os dois fatores em simultâneo, conclui-se que:

- O aumento de Q de 350 para 675 g/h traduz-se num acréscimo de concentração, mas de magnitude moderada (aproximadamente proporcional ao incremento da emissão).
- A variação da velocidade do vento tem um efeito mais acentuado na concentração final do que a diferença entre os dois valores de Q, evidenciando a relevância das condições meteorológicas na avaliação da qualidade do ar.

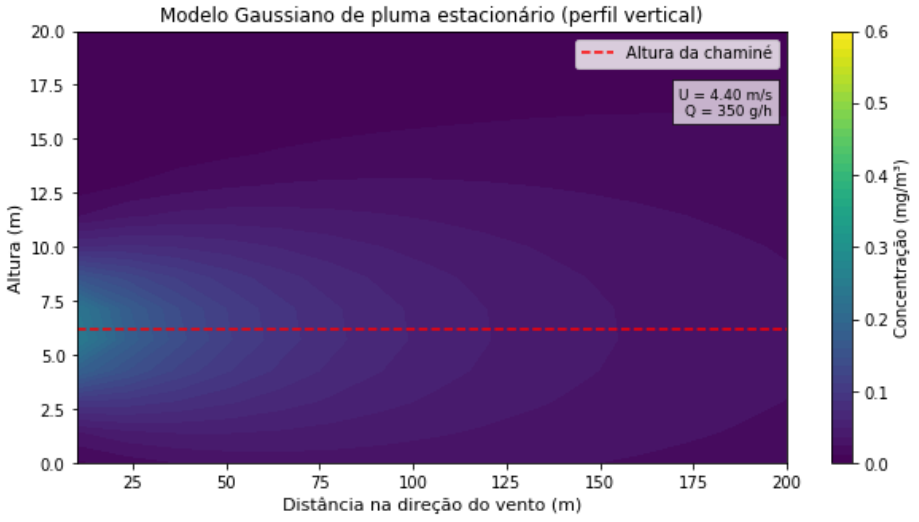
Em síntese, os resultados obtidos demonstram que, ainda que a taxa de emissão seja um parâmetro fundamental, a velocidade do vento constitui o fator dominante na dispersão atmosférica, influenciando de forma mais significativa os níveis de concentração modelados.



(a)

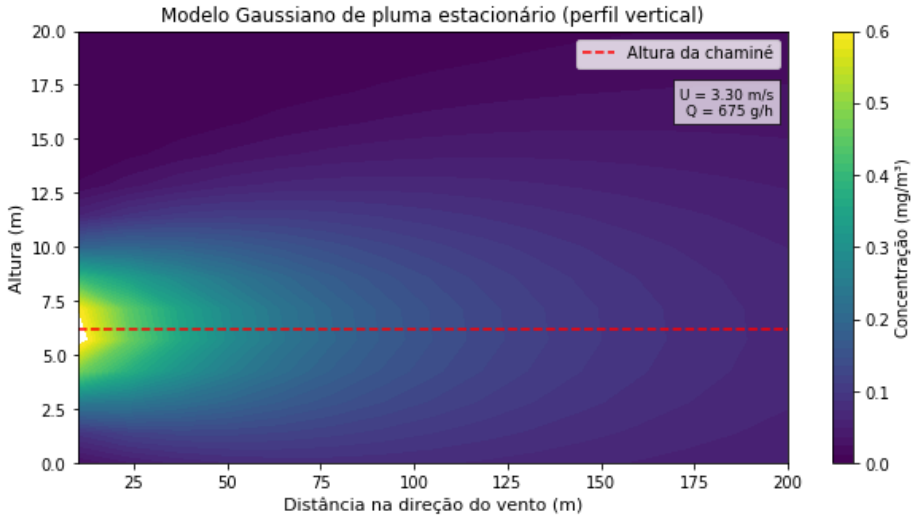


(b)

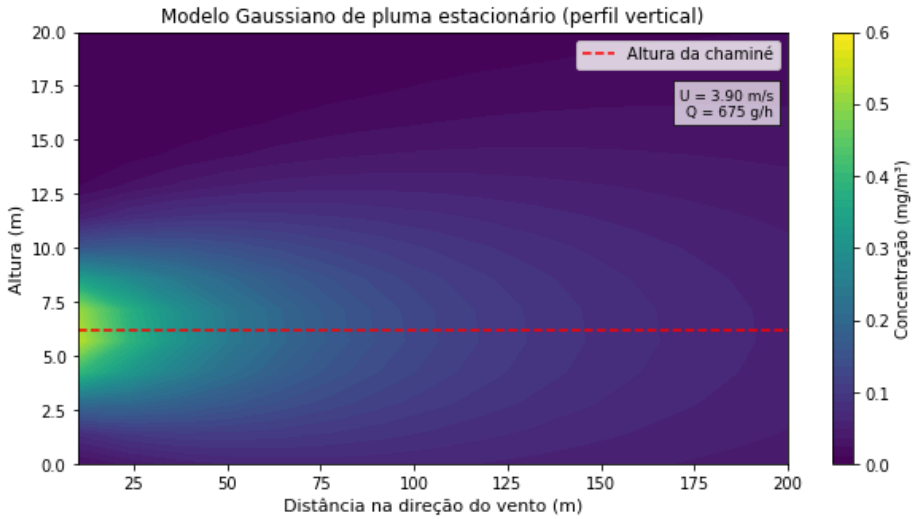


(c)

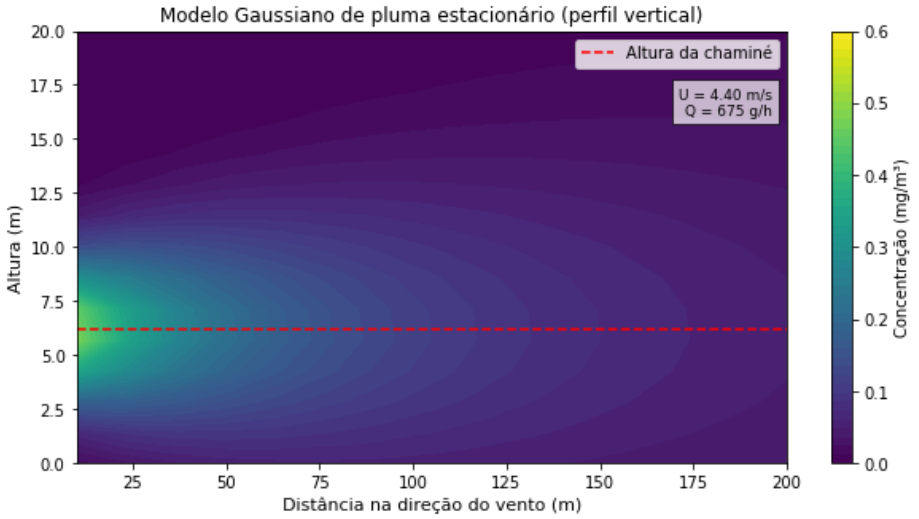
Figura 5.1 – Secção vertical da pluma gaussiana,
para uma taxa de emissão de NOx de 350 g/h e diferentes regimes de vento.



(a)



(b)

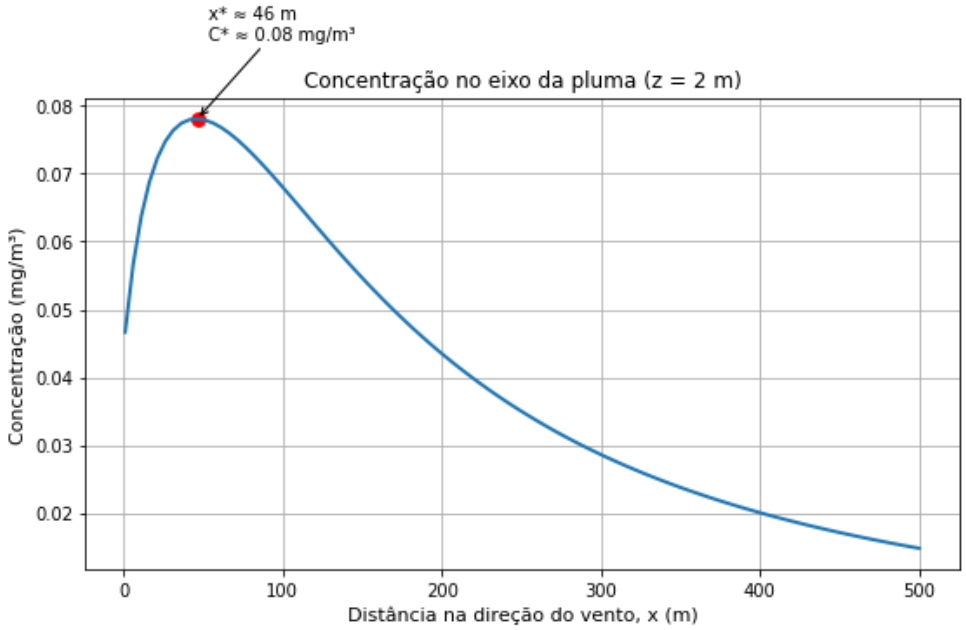


(c)

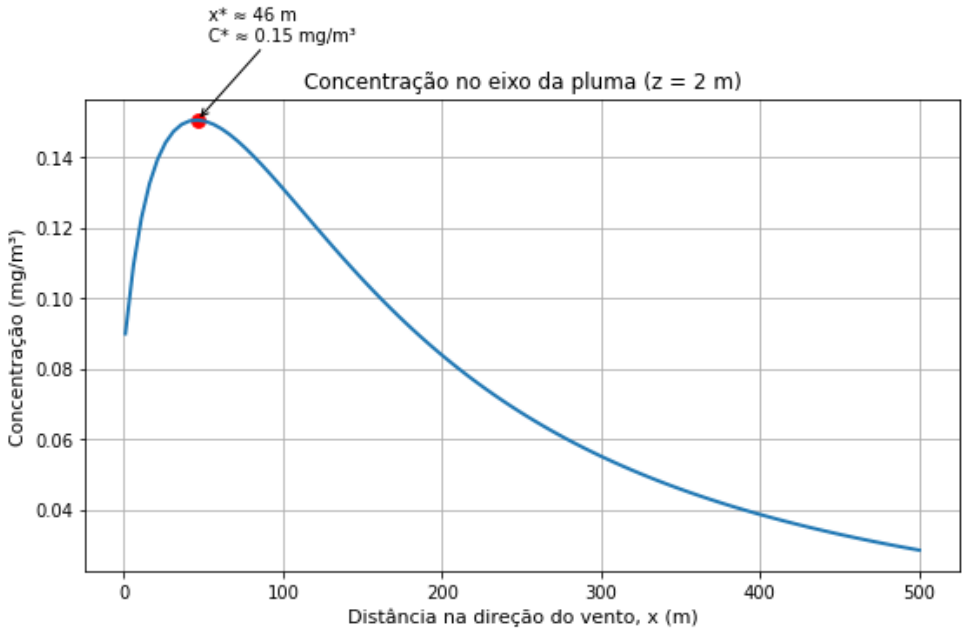
Figura 5.2 – Secção vertical da pluma gaussiana,
para uma taxa de emissão de NOx de 675 g/h e diferentes regimes de vento.

5.2 CONCENTRAÇÕES PRÓXIMAS DO SOLO

Para avaliar o impacte ao nível dos recetores mais próximos da superfície, foi considerada a concentração no eixo da pluma a 2 m de altura (**Figura 5.3**). Esta análise permite aproximar as condições de exposição humana ou da vegetação em áreas vizinhas à instalação.



(a)



(b)

Figura 5.3 – Variação da concentração de NOx em função da distância à chaminé, para uma altura de 2 m. As curvas representam diferentes cenários de emissão (350 em cima e 675 g/h em baixo), e para uma velocidade média de vento de 3.9 m/s, evidenciando o ponto de máxima concentração próximo dos 46 m.

Tal como observado nos cálculos anteriores, a taxa de emissão (Q) influencia diretamente os valores obtidos, sendo que o cenário de 675 g/h conduz sistematicamente a concentrações ligeiramente mais elevadas do que o de 350 g/h. A diferença é aproximadamente proporcional ao incremento da emissão, evidenciando a linearidade do modelo em relação a este parâmetro.

A velocidade do vento (U), contudo, revela-se novamente o fator determinante na magnitude das concentrações junto ao solo:

- Para U = 3,3 m/s, as concentrações máximas ao nível de 2 m são mais elevadas e ocorrem relativamente perto da chaminé (encontram-se num intervalo entre os 40 e os 60 metros), refletindo menor capacidade de diluição e ainda um efeito não tão acentuado da dispersão.
- Para U = 3,9 m/s (valor intermédio), a pluma irá atingir o solo um pouco mais distante, e as concentrações máximas apresentam-se mais reduzidas.
- Para U = 4,4 m/s, o aumento da dispersão pelo vento provoca uma diminuição adicional das concentrações máximas, deslocando ligeiramente o ponto de impacte máximo.

Independentemente do regime do vento, os valores de pico são sempre registados aos 46 m de distância da chaminé. Salienta-se que, segundo a **Figura 5.4**, os primeiros recetores sensíveis localizam-se a distâncias entre 100 e 150 m. Mesmo nestes pontos, no cenário em que a velocidade de vento é intermédia e há uma maior emissão de NOx (ver gráfico (b) da **Figura 5.3**), as concentrações estimadas variam entre 0,10 e 0,13 mg/m³, correspondendo igualmente a classificações de qualidade do ar entre “Médio” e “Bom”, de acordo com o IQAR.

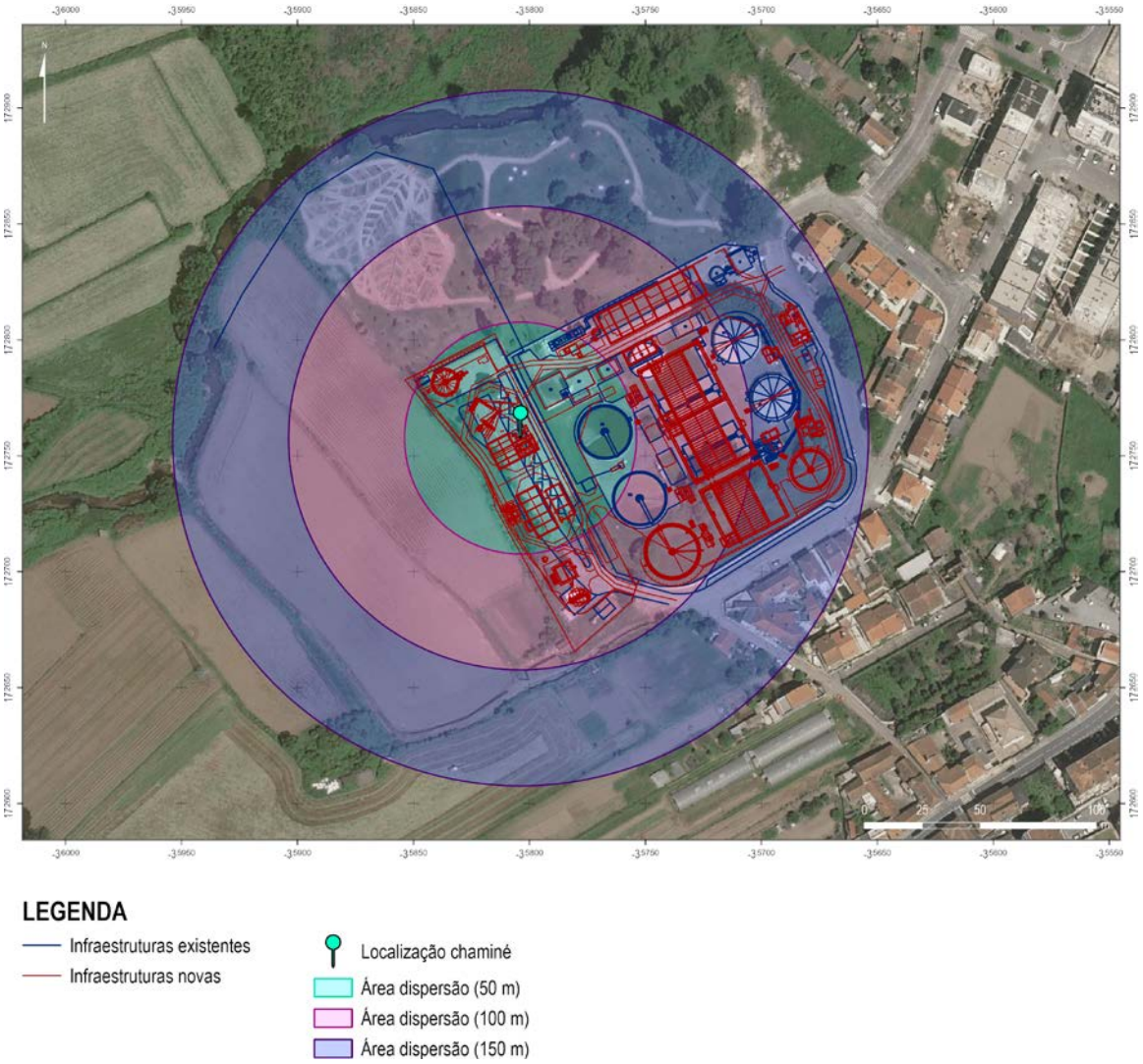


Figura 5.4 – Áreas de dispersão das emissões atmosféricas na envolvente da chaminé.

Comparando os dois fatores, conclui-se que o efeito da velocidade do vento supera em magnitude a diferença entre os dois cenários de emissão, sendo responsável por variações de cerca de 20–25% nos valores máximos previstos, enquanto a diferença entre 350 e 675 g/h se traduz num acréscimo inferior a 10%.

Em síntese, os resultados confirmam que, ao nível do solo, as condições meteorológicas (em particular a velocidade do vento) desempenham um papel preponderante na determinação da exposição, enquanto variações moderadas na taxa de emissão alteram os valores de forma proporcional, mas menos expressiva.

6 BIBLIOGRAFIA

Arya, S. P. (1999). Air Pollution Meteorology and Dispersion. Oxford University Press.

European Environment Agency (EEA) (2019). Air quality in Europe — 2019 report. EEA Report No 10/2019. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change (3rd ed.). Wiley.

Turner, D. B. (1994). Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling (2nd ed.). CRC Press.

US-EPA (2004). User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD. EPA-454/B-03-001. United States Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.

AQUALOGUS
Engenharia e Ambiente

Rua do Mar da China, 1 - Escritório 2.4 • Parque das Nações, 1990-137 Lisboa • Portugal
Telefone (+351) 21 752 01 90 • Fax (+351) 21 752 01 99 • E-mail geral@aqualogus.com

www.aqualogus.com