

AQUISIÇÃO DE SERVIÇOS PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO TÉCNICO-CIENTÍFICO NA ÁREA DA QUALIDADE DO AR AMBIENTE

AValiação da QUALIDADE DO AR AMBIENTE NA REGIÃO NORTE NO PERÍODO 2020 A 2024

DEZEMBRO DE 2025

MONITAR



TÍTULO DO RELATÓRIO	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR AMBIENTE NA REGIÃO NORTE NO PERÍODO 2020 A 2024
AUTOR DO RELATÓRIO	MONITAR, LDA. RUA QUINTA D'EL REI, LOTE 266, FRAÇÕES A/B 3500-612 VISEU
EQUIPA TÉCNICA	PAULO GABRIEL FERNANDES DE PINHO SÉRGIO MIGUEL GOMES LOPES JOÃO MIGUEL BARROTE LOPES LEITE

ÍNDICE

ÂMBITO	6
INTRODUÇÃO	6
REDE DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO NORTE.....	7
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR	10
<i>Dióxido de azoto (NO₂).....</i>	<i>10</i>
Dados globais	10
Perfil horário	14
Perfil dia da semana	16
Perfil mensal	16
Estações Urbanas de tráfego	17
Estações urbanas de fundo	18
Estações suburbanas de fundo	18
Estações rurais de fundo	19
Análise.....	20
<i>Partículas em suspensão (PM₁₀)</i>	<i>22</i>
Dados globais	22
Perfil horário	25
Perfil dia da semana	27
Perfil mensal	27
Estações urbanas de tráfego.....	28
Estações urbanas de fundo	29
Estações suburbanas de fundo	29
Estações rurais de fundo	30
Análise.....	31
<i>Ozono (O₃).....</i>	<i>33</i>
Dados globais	33
Perfil horário	37
Perfil dia da semana	39
Perfil mensal	39
Estações urbanas de fundo	40
Estações suburbanas de fundo	41
Estações rurais de fundo	41
Análise.....	42
<i>Partículas em suspensão (PM_{2,5}).....</i>	<i>44</i>
Dados globais	44
<i>Benzeno (C₆H₆)</i>	<i>45</i>
Dados globais	46
<i>Dióxido de enxofre (SO₂)</i>	<i>46</i>
Dados globais	46
SÍNTESE	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

Índice de tabelas

Tabela 1: Estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N), por tipo de ambiente envolvente e tipo de influência dominante, em funcionamento no ano de 2024.	9
Tabela 2: Identificação das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N) em funcionamento no ano de 2024, respetiva classificação por tipo de ambiente e por tipo de influência dominante, e poluentes monitorizados (considerando os poluentes analisados no presente estudo).	9
Tabela 3: Valores- limite e limiar de alerta para proteção da saúde humana relativos ao dióxido de azoto (NO ₂) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.	10
Tabela 4: Eficiência na recolha de dados de dióxido de azoto (NO ₂), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.	11
Tabela 5: Concentração média anual de dióxido de azoto (NO ₂), em (µg/m ³), por estação, no período de 2020 a 2024.	12
Tabela 6: Excedências ao valor-limite horário de dióxido de azoto (NO ₂) de 200 µg/m ³ , por estação, no período de 2020 a 2024.	12
Tabela 7: 19.º valor máximo horário da concentração de dióxido de azoto (NO ₂), em µg/m ³ , por estação, no período de 2020 a 2024.	13
Tabela 8: Valores-limite para a proteção da saúde humana relativos às partículas em suspensão (PM ₁₀) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.	22
Tabela 9: Eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão (PM ₁₀), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.	23
Tabela 10: Concentração média anual de partículas em suspensão (PM ₁₀), base diária, por estação, no período de 2020 a 2024.	23
Tabela 11: Excedências ao valor limite diário de 50 µg/m ³ de concentração média diária de partículas em suspensão (PM ₁₀), por estação, no período de 2020 a 2024.	24
Tabela 12: Objetivo a longo prazo, valor-alvo e limiares de informação e de alerta para o ozono (O ₃) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.	33
Tabela 13: Eficiência horária na recolha de dados de ozono (O ₃), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.	34
Tabela 14: Concentração média anual de ozono (O ₃), base horária, por estação, no período de 2020 a 2024.	34
Tabela 15: Excedências ao Objetivo de Longo Prazo (OLP) (120 µg/m ³), por estação, no período de 2020 a 2024.	35
Tabela 16: Concentração de ozono (O ₃) (µg/m ³), correspondente ao 26.º máximo diário da média móvel de 8h, por estação, no período de 2020 a 2024.	35
Tabela 17: Excedências ao limiar de informação do ozono (O ₃) (180 µg/m ³), por estação, no período de 2020 a 2024.	36
Tabela 18: Excedências ao limiar de alerta do ozono (O ₃) (240 µg/m ³), por estação, no período de 2020 a 2024.	36
Tabela 19: Valor-limite para a proteção da saúde humana relativo às partículas em suspensão (PM _{2,5}) no ar ambiente, estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010.	44
Tabela 20: Eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão (PM _{2,5}), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.	45
Tabela 21: Concentração média anual de partículas em suspensão (PM _{2,5}), base diária, por estação, no período de 2020 a 2024.	45

Tabela 22: Valor-limite para a proteção da saúde humana relativo ao Benzeno (C_6H_6) no ar ambiente, estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010.....	45
Tabela 23: Eficiência diária na recolha de dados de Benzeno (C_6H_6), em percentagem, no período de 2020 a 2024.....	46
Tabela 24: Concentração média anual de Benzeno (C_6H_6), no período de 2020 a 2024.	46
Tabela 25: Valores-limite para a proteção da saúde humana relativo ao dióxido de enxofre (SO_2) no ar ambiente, estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010.....	46
Tabela 26: Eficiência horária na recolha de dados de dióxido de enxofre (SO_2), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.	47
Tabela 27: O 4.º valor máximo diário de concentração de dióxido de enxofre (SO_2), por estação, no período de 2020 a 2024.	47
Tabela 28: O 25.º valor máximo horário de concentração de dióxido de enxofre (SO_2), por estação, no período de 2020 a 2024.	47

ÂMBITO

O presente documento constitui o relatório de Avaliação da qualidade do ar na Região Norte a partir do histórico de dados disponível para o período de 2020 a 2024, no âmbito do Concurso Público REF.^a CPI.PA.2025.1 – “Aquisição de Serviços para a Realização do Estudo Técnico-Científico na Área da Qualidade do Ar Ambiente”, promovido pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, I.P. (CCDR-N).

O estudo incide sobre a análise das concentrações de dióxido de azoto (NO_2), partículas em suspensão (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), ozono (O_3), benzeno (C_6H_6) e dióxido de enxofre (SO_2), com base nos dados recolhidos nas estações pertencentes à Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N).

A avaliação compreende:

- A caracterização da eficiência de funcionamento da rede;
- A análise da evolução temporal das concentrações dos poluentes no período em estudo;
- A avaliação da conformidade legal face aos valores de qualidade do ar definidos na legislação em vigor.

O período de análise (2020–2024) corresponde aos últimos 5 anos. Decorreu um processo de modernização da RMQAR-N, com colocação de novos equipamentos, no final do ano de 2021 e durante o ano de 2022.

Os anos de 2020 e 2021 correspondem assim a uma fase anterior marcada por limitações ao nível dos equipamentos de monitorização, da eficiência operacional e dos procedimentos de validação de dados. Nesse sentido, os resultados relativos a estes 2 anos devem ser analisados com precaução.

INTRODUÇÃO

No presente documento apresenta-se a avaliação da qualidade do ar ambiente na Região Norte (RN) para o período compreendido no período de 2020 a 2024, tendo por base as concentrações dos poluentes medidas nas estações de monitorização integradas na Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N).

A análise realizada incide na avaliação da conformidade legal das concentrações observadas face aos valores dos objetivos de qualidade do ar estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010 (na sua versão consolidada, que transpõe para o direito nacional a Diretiva 2008/50/CE e a Diretiva 2004/107/CE, relativas à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente).

São analisados os poluentes dióxido de azoto (NO_2), partículas em suspensão (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), ozono (O_3), benzeno (C_6H_6) e dióxido de enxofre (SO_2). Para cada um dos poluentes é efetuada a análise da evolução temporal das concentrações ao longo do período em estudo, com base nos indicadores legalmente definidos para a avaliação da conformidade, bem como através da caracterização de padrões horários, semanais, mensais e sazonais.

Como referido os anos de 2020 e 2021 correspondem a uma fase anterior a um processo de modernização da RMQAR-N. Estes dois anos correspondem à existência de equipamentos de medição obsoletos, falhas operacionais recorrentes, metodologias de validação de dados menos robustas e níveis de eficiência de funcionamento reduzidos. Estas limitações condicionam a representatividade estatística de parte dos dados utilizados, sendo por esse motivo explicitamente consideradas na metodologia e na interpretação dos resultados apresentados.

A análise desenvolvida neste relatório visa, assim, não apenas a avaliação da conformidade legal das concentrações observadas, mas também a identificação de padrões históricos de comportamento da qualidade do ar na Região Norte, contribuindo como suporte à definição de políticas públicas de gestão da qualidade do ar.

REDE DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO NORTE

As zonas e aglomerações para efeitos de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente foram inicialmente delimitadas, a nível nacional, em 2001. Na RN foram definidas as seguintes unidades territoriais: Norte Litoral; Norte Interior; Braga; Vale do Ave; Vale do Sousa e Porto Litoral (Instituto do Ambiente; DCEA-FCT/UNL, 2002).

Em 2009, a CCDR-N promoveu um estudo de reavaliação das zonas e aglomerações da RN (CCDR-N; DCEA-FCT/UNL, 2009). O estudo analisou os dados históricos das estações entre 2003 e 2007, bem como os resultados de campanhas de monitorização realizadas em 2008. O resultado destas campanhas de monitorização permitiu melhorar o conhecimento existente sobre a distribuição espacial dos poluentes, em particular na aglomeração do Porto Litoral.

Em 2012, na sequência de um processo de remodelação da RMQAR-N, foi efetuada a reorganização territorial das aglomerações, tendo as anteriores aglomerações de Braga, Vale do Ave e Vale do Sousa sido agregadas na nova aglomeração de Entre Douro e Minho. A RMQAR-N passou então a integrar 21 estações de monitorização da qualidade do ar.

Em 2021 foi publicado o resultado de um novo estudo de reavaliação da delimitação das zonas e aglomerações da Região Norte (CCDR-N; FCT/UNL, 2021), considerando dados atualizados de população à escala da freguesia, bem como o conhecimento mais recente sobre as características territoriais e a qualidade do ar na região. Este estudo confirmou a manutenção das zonas e aglomerações anteriormente definidas, bem como a adequação global da rede existente.

Em 2019 foi integrada na RMQAR-N a estação de Santa Combinha, localizada no município de Macedo de Cavaleiros. A estação de Santa Combinha é gerida pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Em 2021, a rede passou a integrar um total de 22 estações de monitorização da qualidade do ar, maioritariamente localizadas em áreas urbanas da Região Norte. Contemplando assim 21 estações da Rede de Monitorização da Qualidade do ar geridas pela CCDR-N e 1 estação gerida pela Agência Portuguesa do Ambiente.

As estações encontram-se instaladas em locais representativos de diferentes tipos de ambientes (urbano, suburbano e rural) e de diferentes tipos de influência dominante (tráfego, industrial e fundo), de acordo com as principais fontes emissoras existentes na respetiva envolvente.

As estações urbanas e suburbanas de fundo destinam-se a representar a exposição média da população, sendo influenciadas pela contribuição combinada das fontes situadas a barlavento. As estações de tráfego localizam-se na proximidade de vias com tráfego intenso, permitindo a avaliação do risco máximo de exposição da população às emissões rodoviárias. As estações industriais visam a caracterização das concentrações máximas de poluentes de origem industrial a que a população pode estar pontualmente exposta.

As estações rurais de fundo situam-se afastadas de fontes poluidoras significativas e de zonas densamente povoadas, refletindo essencialmente o transporte regional e de longa distância de poluentes. Estas estações assumem especial relevância na monitorização de poluentes secundários, como o ozono (O_3), bem como na identificação de fenómenos naturais, como intrusões de poeiras do Norte de África ou impactes de incêndios florestais.

Na Figura 1 apresenta-se a delimitação das zonas e aglomerações para efeitos de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente na Região Norte, em vigor em 2024, e na Figura 2 a localização das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte em funcionamento no mesmo ano.

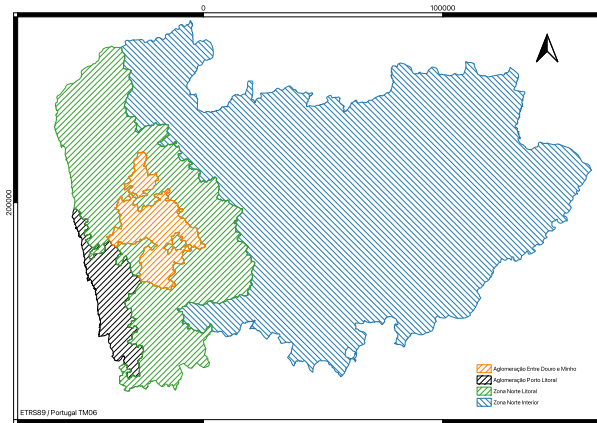


Figura 1: Delimitação das zonas e aglomerações para efeitos de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente na Região Norte, em vigor em 2024.

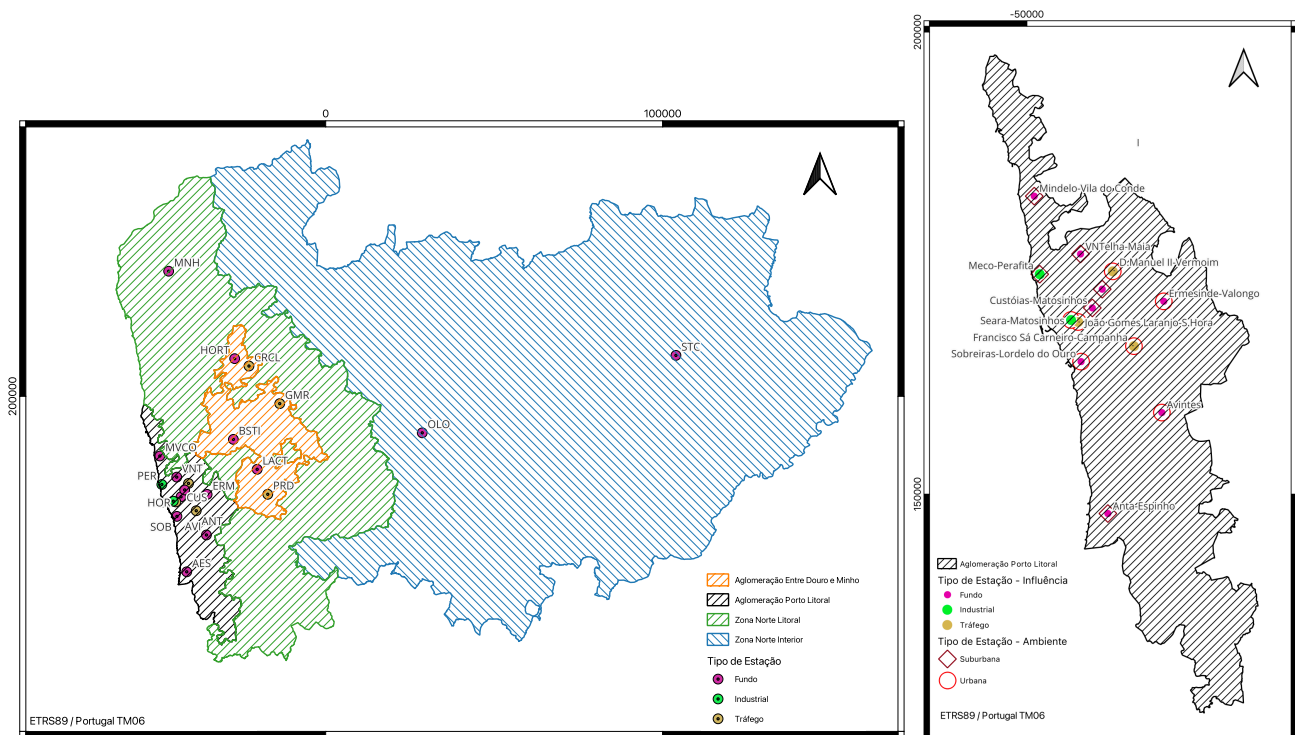


Figura 2: Localização das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte em funcionamento em 2024.

Na Tabela 1 são apresentadas as estações da RMQAR-N por tipo de ambiente e tipo de influência dominante. As estações urbanas e suburbanas encontram-se classificadas em função da influência das fontes de emissões dominantes nas zonas onde se encontram instaladas (tráfego, de fundo e industriais). A RMQAR-N possui:

- 5 estações urbanas de fundo e 6 estações suburbanas de fundo – As estações urbanas e suburbanas de fundo estão localizadas em zonas onde os níveis são representativos da exposição média da população em geral. Os valores medidos resultam da contribuição combinada de todas as fontes situadas a barlavento da estação. A RMQAR-N possui 3 estações urbanas e 5 suburbanas na Aglomeração Porto Litoral, 2 estações urbanas e 1 estação suburbana na Aglomeração Entre Douro e Minho. Cada estação é representativa de uma área de vários quilómetros quadrados na sua envolvente.
- 2 estações industriais – As estações industriais permitem conhecer as concentrações máximas de certos poluentes de origem industrial às quais a população pode estar pontualmente exposta. As estações industriais da RMQAR-N localizam-se, uma na zona industrial de Perafita/Leça da Palmeira e outra a sul do complexo energético e industrial de Leça da Palmeira, zona influenciada também pelo porto de Leixões e pelo tráfego rodoviário associado. Salienta-se que a Refinaria da GALP, em Leça da Palmeira, deixou de funcionar em 2021.

- 6 estações urbanas de tráfego – As estações de tráfego localizam-se na proximidade de vias de tráfego intenso e permitem avaliar o risco máximo de exposição da população às emissões do tráfego automóvel. A RMQAR-N possui 3 estações urbanas de tráfego em cada uma das aglomerações: Porto Litoral e Entre Douro e Minho.

- 3 estações rurais de fundo – As estações rurais de fundo situam-se afastadas de fontes poluidoras significativas e de zonas densamente povoadas. As concentrações registadas refletem essencialmente o transporte regional e de longa distância de poluentes. Estas estações são fundamentais para monitorizar poluentes de origem natural (por exemplo, poeiras do Norte de África) ou resultantes de incêndios florestais, bem como para avaliar a exposição da população e dos ecossistemas à poluição de fundo, nomeadamente a poluentes secundários como o ozono (O₃). A RMQAR-N possui 3 estações rurais de fundo, sendo 1 na Zona Norte Litoral e 2 na Zona Norte Interior.

Tabela 1: Estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N), por tipo de ambiente envolvente e tipo de influência dominante, em funcionamento no ano de 2024.

Zona/Aglomeração	Tipo de estação - Ambiente envolvente	Tipo de estação - Influência dominante		
		Tráfego	Industrial	Fundo
Porto Litoral	Urbana	3	1	3
	Suburbana	-	1	5
Entre Douro e Minho	Urbana	3	-	2
	Suburbana	-	-	1
Norte Litoral	Rural	-	-	1
Norte Interior	Rural	-	-	2
Total		6	2	14

Nota: A classificação das estações por tipo de ambiente (urbano, suburbano e rural) e por tipo de influência dominante (tráfego, industrial e fundo) encontra-se definida nos termos da Diretiva 2008/50/CE e do Decreto-Lei n.º 102/2010.

Na Tabela 2 são apresentadas as estações da RMQAR-N, por tipo de ambiente e tipo de influência, e os poluentes medidos (considerando os poluentes analisados no presente estudo) em cada uma das estações.

Tabela 2: Identificação das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N) em funcionamento no ano de 2024, respetiva classificação por tipo de ambiente e por tipo de influência dominante, e poluentes monitorizados (considerando os poluentes analisados no presente estudo).

Zona/Aglomeração	Estação		Tipo de estação		Poluente					
	Nome	Abreviatura	Influência dominante	Ambiente envolvente	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	O ₃	SO ₂	C ₆ H ₆
Porto Litoral	Anta - Espinho	AES	Fundo	Suburbana	X	X	-	X	-	-
	Avintes	AVI	Fundo	Urbana	X	X	-	X	-	-
	Custóias - Matosinhos	CUS	Fundo	Suburbana	X	X	-	X	-	-
	D. Manuel II - Vermoim	VER	Tráfego	Urbana	X	X	-	-	-	-
	Ermesinde - Valongo	ERM	Fundo	Urbana	X	X	-	X	-	-
	Francisco Sá Carneiro - Campanha	ANT	Tráfego	Urbana	X	X	-	-	-	-
	João Gomes Laranjo - S. Hara	HOR	Tráfego	Urbana	X	X	-	-	-	-
	Lega do Balio - Matosinhos	LEC	Fundo	Suburbana	-	X	-	X	-	-
	Meco - Perafita	PER	Industrial	Suburbana	-	X	-	X	-	-
	Mindelo - Vila do Conde	MVCO	Fundo	Suburbana	X	X	-	X	-	-
	Seara - Matosinhos	SEA	Industrial	Urbana	-	X	-	-	X	X
	Sobreiras - Lordelo do Ouro	SOB	Fundo	Urbana	X	X	X	X	-	-
Entre Douro e Minho	VNTelha - Maia	VNT	Fundo	Suburbana	X	X	-	X	-	-
	Burgães - Santo Tirso	BSTI	Fundo	Urbana	X	X	-	X	-	-
	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	GMR	Tráfego	Urbana	X	X	-	-	-	-
	Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	CRCL	Tráfego	Urbana	X	X	-	-	-	-
	Frossos - Braga	HORT	Fundo	Suburbana	X	-	-	X	-	-
	Paços de Ferreira	LACT	Fundo	Urbana	X	X	X	X	-	-
	Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	PRD	Tráfego	Urbana	X	X	-	-	-	-
Norte Litoral	Minho - Lima	MNH	Fundo	Rural	X	X	X	X	-	-
Norte Interior	Douro Norte	OLO	Fundo	Rural	X	X	X	X	-	-
	Santa Combinha	STC	Fundo	Rural	X	X	X	X	-	-

Nota: A presença do símbolo "X" indica a monitorização do respetivo poluente na estação considerada no ano de 2024.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

No presente capítulo apresenta-se a análise do histórico de dados validados relativos ao período de 2020 a 2024 para os poluentes dióxido de azoto (NO_2), partículas em suspensão (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), ozono (O_3), benzeno (C_6H_6) e dióxido de enxofre (SO_2).

É apresentado um diagnóstico da qualidade do ar para a Região Norte que inclui a análise da situação de eficiência da rede, a evolução das concentrações médias dos poluentes em estudo e a avaliação da respetiva da situação de conformidade legal.

Como referido os anos de 2020 e 2021 correspondem a uma fase anterior a um processo de modernização da RMQAR-N. Estes dois anos correspondem à existência de equipamentos de medição obsoletos, falhas operacionais recorrentes, metodologias de validação de dados menos robustas e níveis de eficiência de funcionamento reduzidos. Estas limitações condicionam a representatividade estatística de parte dos dados utilizados, sendo por esse motivo explicitamente consideradas na metodologia e na interpretação dos resultados apresentados.

O Decreto-Lei n.º 102/2010 define, nos objetivos de qualidade dos dados, uma taxa mínima de recolha de dados de 90%. Os requisitos em matéria de cálculo da média anual não incluem as perdas de dados decorrentes da calibração regular e da manutenção periódica dos instrumentos. Assim, para o cálculo da taxa de recolha de dados, o número de medições em falta devido as operações de calibração e manutenção deverá ser subtraído ao número máximo teórico de medições do ano. Na impossibilidade de contabilização rigorosa da perda de dados, é usualmente considerado que esta corresponde a uma percentagem de 5% [Guia dos anexos da Decisão 97/101/EC, de 27 de janeiro, relativa à troca de informação, revista de acordo com a Decisão 2001/752/EC, de 17 de outubro].

Para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores limite, valores-alvo e objetivos de longo prazo definidos na legislação em vigor, considera-se neste estudo apenas a análise dos dados provenientes de estações com uma eficiência de recolha igual ou superior a 85%. No entanto, para efeitos de análise da evolução temporal das concentrações e da caracterização dos perfis temporais (horário, dia da semana, mensal e anual), são igualmente analisadas as estações com eficiência de recolha igual ou superior a 14%, exclusivamente para fins exploratórios, não sendo estes resultados utilizados para a avaliação da conformidade legal.

DIÓXIDO DE AZOTO (NO_2)

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa os valores limite das concentrações do dióxido de azoto (NO_2) no ar ambiente para proteção da saúde humana (Tabela 3).

Tabela 3: Valores- limite e limiar de alerta para proteção da saúde humana relativos ao dióxido de azoto (NO_2) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor	Observações
Valor limite horário	Uma hora	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	A não exceder mais de 18 vezes por ano civil
Valor limite anual	Ano civil	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Média anual
Limiar de alerta	Três horas consecutivas		Média horária, medida em três horas consecutivas

Nota: Os valores-limite aplicam-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com o método de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Figura 3 é apresentada a eficiência na recolha de dados de dióxido de azoto (NO_2) na RMQAR-N, em percentagem, no período de 2020 a 2024. Verifica-se que a RMQAR-N apresentou uma eficiência de recolha de dados particularmente reduzida nos anos de 2020 e 2021, fortemente condicionados pela epidemia de COVID-19 e por limitações operacionais dos analisadores. Nestes anos o número de estações com eficiência superior a 85% foi muito reduzido, o que limita a avaliação da conformidade legal nesses anos.

Em contraste, observa-se uma melhoria substancial da eficiência de recolha de dados a partir de 2022, atingindo-se valores elevados e mais homogêneos na maioria das estações. No ano de 2024, a eficiência de recolha de dados de NO_2 apenas não atingiu o limiar de 85% na estação de Paços de Ferreira, sendo superior a este valor em todas as restantes estações da rede.

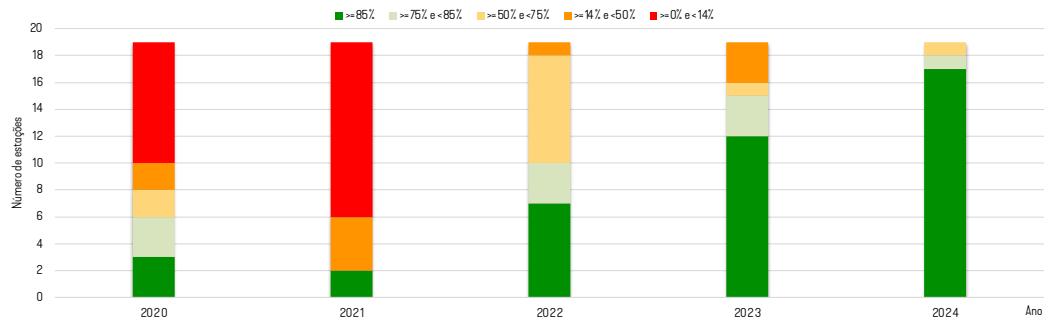


Figura 3: Eficiência na recolha de dados de dióxido de azoto (NO₂) na RMQAR-N, em percentagem, no período de 2020 a 2024.

Na Tabela 4 é apresentada a eficiência na recolha de dados de NO₂ por estação, no período de 2020 a 2024. Para várias destas estações observa-se uma eficiência reduzida nos anos de 2020 e 2021 o que limita uma análise robusta das tendências evolutivas das concentrações de NO₂ nesses locais, particularmente quando consideradas séries temporais de curta duração ou comparações interanuais.

Tabela 4: Eficiência na recolha de dados de dióxido de azoto (NO₂), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.

			Eficiência na recolha de dados de NO ₂ (%), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	0	0	80	90	96
		Custóias - Matosinhos	0	0	67	82	94
		Mindelo - Vila do Conde	98	9	69	92	100
		VNTelha - Maia	61	94	96	52	96
	Urb. Fundo	Avintes	0	0	80	99	100
		Ermesinde - Valongo	83	0	57	96	98
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	76	44	100
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	0	0	74	88	95
		Francisco Sá Carneiro - Campanha	62	29	98	81	58
		João Gomes Laranja - S. Hara	0	4	59	78	88
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	91	18	65	90	91
		Pacps de Ferreira	23	0	68	92	77
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	87	29	91	95	97
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	0	21	98	49	99
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	0	0	99	100	99
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	0	0	94	97	95
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	78	4	14	43	98
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	36	0	69	99	96
		Santa Combinha	75	95	100	99	94

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: >=85% (verde escuro), >=75% e <85% (verde claro), >=50% e <75% (amarelo), >=14% e <50% (laranja), >=0% e <14% (vermelho).

Na Tabela 5 apresenta-se a concentração média anual de NO₂ em (µg/m³), base horária, por estação, no período de 2020 a 2024. Na Tabela 6 apresenta-se o número de excedências ao valor limite horário de NO₂ (200 µg/m³), por estação, no período de 2020 a 2024. Na Tabela 7 apresenta-se, para cada estação e para cada ano, o 19.º valor máximo horário da concentração de NO₂, em µg/m³. Este indicador é utilizado na avaliação da conformidade com o valor-limite horário de 200 µg/m³, uma vez que a legislação estabelece que este valor não pode ser excedido mais de 18 vezes por ano civil.

Tabela 5: Concentração média anual de dióxido de azoto (NO₂), em (µg/m³), por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Concentração média anual de NO ₂ (µg/m ³), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	---	---	12	16	11
		Custóias - Matosinhos	---	---	19	21	18
		Mindelo - Vila do Conde	20	28	10	13	10
		VNTelha - Maia	14	16	17	17	14
	Urb. Fundo	Avintes	---	---	14	14	13
		Ermesinde - Valongo	22	---	19	19	16
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	---	---	16	21	16
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	---	---	19	21	17
		Francisco Sá Carneiro - Campanha	40	41	34	34	25
		João Gomes Laranjo - S. Hora	---	24	29	31	22
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	14	14	12	13	10
		Paços de Ferreira	19	---	15	15	12
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	32	29	33	31	29
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	---	36	45	41	42
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	---	---	23	20	19
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	---	9	9	11	10
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	8	4	1	2	3
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	12	---	2	3	5
		Santa Combinha	2	1	2	2	1

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses valores considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com o valor-limite anual de 40 µg/m³ definido no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes valores podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva da evolução temporal quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%, sendo os valores apresentados a vermelho e a negrito indicativos de excedência do valor-limite anual.

Tabela 6: Excedências ao valor-limite horário de dióxido de azoto (NO₂) de 200 µg/m³, por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Excedências por ano.				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	---	---	0	0	0
		Custóias - Matosinhos	---	---	0	0	0
		Mindelo - Vila do Conde	0	0	0	0	0
		VNTelha - Maia	0	0	0	0	0
	Urb. Fundo	Avintes	---	---	0	0	0
		Ermesinde - Valongo	0	---	0	0	0
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	---	---	0	0	0
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	---	---	0	0	0
		Francisco Sá Carneiro - Campanha	0	0	0	0	0
		João Gomes Laranjo - S. Hora	---	0	0	0	0
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	0	0	0	0	0
		Paços de Ferreira	0	---	0	0	0
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	---	0	0	0	0
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	0	0	0	0	0
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	---	0	0	0	0
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	---	---	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	0	---	0	0	0
		Santa Combinha	0	0	0	0	0

Nota: O valor-limite horário de 200 µg/m³ não pode ser excedido mais de 18 vezes por ano civil. Apenas os anos com eficiência horária de recolha de dados ≥85% são considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal. As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Tabela 7: 19.º valor máximo horário da concentração de dióxido de azoto (NO₂), em µg/m³, por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeração/Zona	Tipo	Estação	Concentração de NO ₂ (µg/m ³), 19.º máximo horário, por ano.				
			2020	2021	2022	2023	2024
Agglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	---	---	70	89	70
		Custóias - Matosinhos	---	---	85	101	75
		Mindelo - Vila do Conde	109	99	53	74	63
		VNTelha - Maia	74	71	84	89	71
	Urb. Fundo	Avintes	---	---	65	71	61
		Ermesinde - Valongo	117	---	93	105	81
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	---	---	80	88	76
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	---	---	76	99	71
		Francisco Sá Carneiro - Campanha	143	107	137	127	90
		João Gomes Laranjo - S. Hora	---	58	100	124	84
Agglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgões - Santo Tirso	52	49	43	48	41
		Paços de Ferreira	61	---	68	78	58
	Urb. Tráfego	Córego Dr. Manuel Faria - Azurém	---	9	48	55	50
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	107	69	84	95	84
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	---	78	136	116	118
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	---	---	102	94	73
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	19	6	4	9	11
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	17	---	23	10	27
		Santa Combinha	10	8	10	8	7

Nota: O valor-limite horário de NO₂ (200 µg/m³) não pode ser excedido mais de 18 vezes por ano civil. O 19.º valor máximo horário constitui o indicador operacional de conformidade: se o 19.º valor máximo horário for superior a 200 µg/m³, então ocorreram pelo menos 19 excedências nesse ano, não sendo cumprido o critério legal. Apenas os anos com eficiência horária de recolha de dados ≥ 85% são considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal. As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Na Figura 4 é apresentada a tendência evolutiva das concentrações médias anuais de dióxido de azoto (NO₂), com base horária, agregadas por aglomeração e zona, para o período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a) apresenta a evolução das concentrações médias anuais considerando, para o cálculo da média, as estações com uma eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 14%, sendo utilizado exclusivamente para uma análise descritiva da evolução temporal das concentrações. As médias apresentadas correspondem a médias aritméticas simples das concentrações médias anuais das estações incluídas em cada aglomeração ou zona.

O gráfico inferior (b) apresenta a evolução da concentração média anual de NO₂ considerando exclusivamente as estações com uma eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%, sendo este o único gráfico utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal com o valor-limite anual de 40 µg/m³, conforme estabelecido na legislação em vigor.

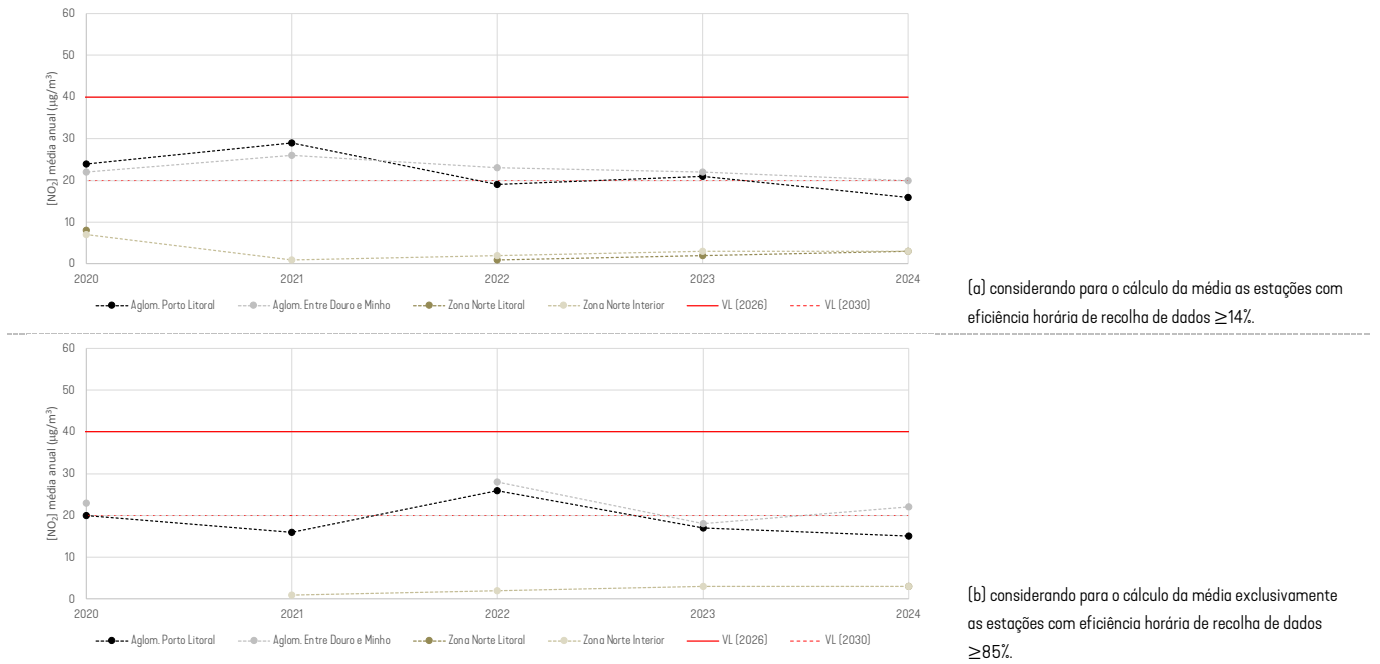


Figura 4: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por aglomeração e zona, no período de 2020 a 2024. O traço horizontal a vermelho (cheio) corresponde ao valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o traço a vermelho (tracejado) corresponde ao valor-limite anual de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a cumprir em 2030.

Os perfis temporais apresentados na Figura 5 à Figura 8 (horário, por dia da semana e mensal) foram construídos com base nas estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 14% e também considerando exclusivamente as estações com eficiência $\geq 85\%$, com o objetivo de demonstrar a consistência e a robustez dos padrões temporais observados. Estes perfis destinam-se exclusivamente à caracterização do comportamento temporal típico do dióxido de azoto (NO_2), não se destinando à avaliação da conformidade legal.

Perfil horário

Por tipo de estação

Na Figura 5 é apresentado o perfil horário da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024. Nas estações urbanas verifica-se que as concentrações de NO_2 apresentam uma variação típica associada ao tráfego rodoviário, com um primeiro pico no início da manhã e um segundo pico no final da tarde. A concentração mais elevada no pico do final da tarde está associada a uma maior estabilidade atmosférica junto à superfície, resultante do arrefecimento radiativo, e à consequente redução da dispersão dos poluentes.

Nas estações de fundo, as concentrações médias de NO_2 são significativamente inferiores às observadas nas estações urbanas e não evidenciam uma variação horária relevante ao longo do dia, refletindo essencialmente níveis de poluição de fundo.

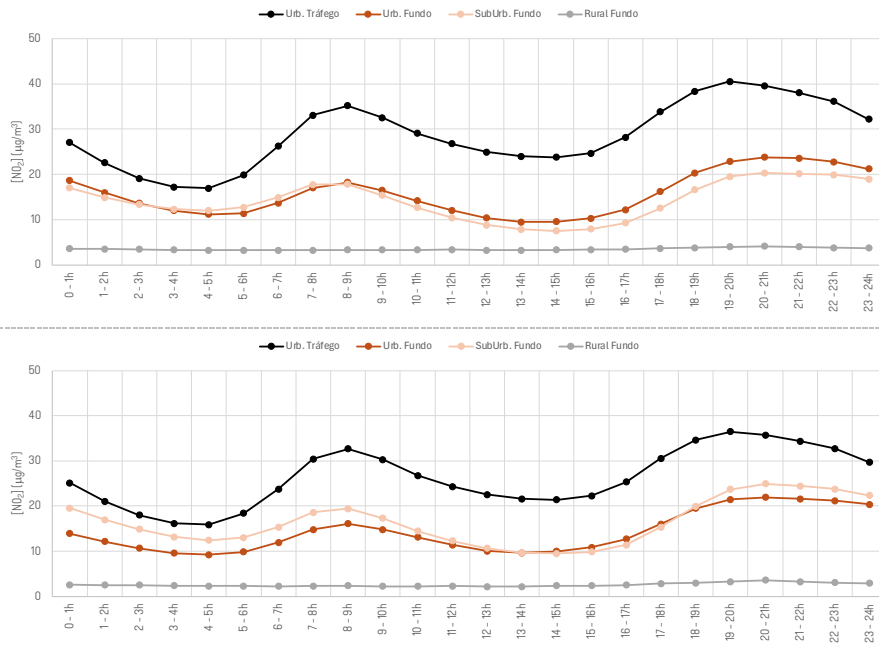


Figura 5: Perfil horário da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024.

Comparação verão-inverno

Na Figura 6 é apresentado o perfil horário da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, na Região Norte, por estação do ano, no período de 2020 a 2024. Verifica-se que as concentrações de NO_2 são, de forma geral, mais elevadas no período de inverno [outubro a março], o que se encontra associado a uma maior estabilidade atmosférica junto à superfície, resultante da menor intensidade da radiação solar, e à consequente menor dispersão dos poluentes. Adicionalmente, no período de inverno, os picos horários associados aos períodos de tráfego tendem a apresentar maior amplitude.

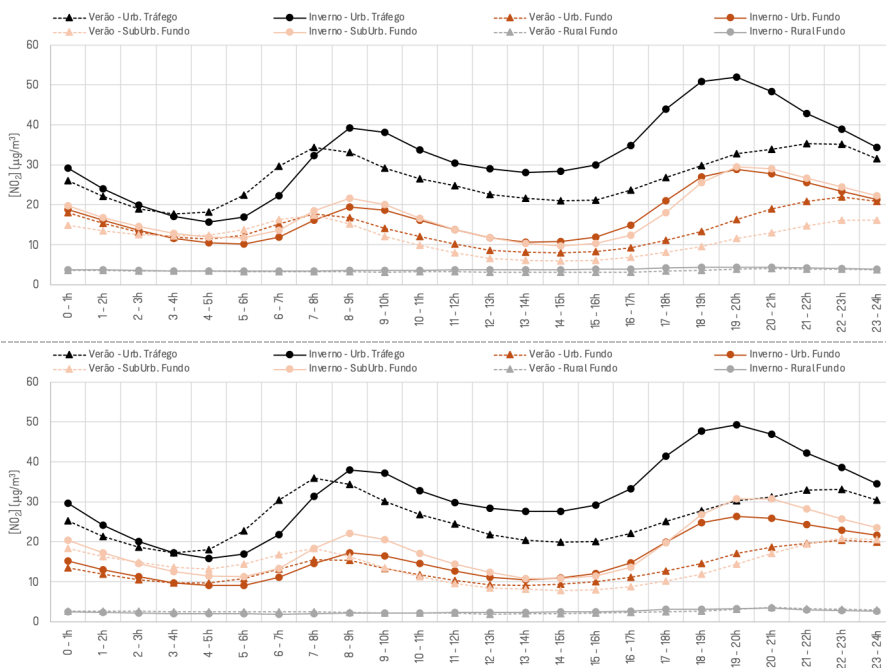


Figura 6: Perfil horário da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), na Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2020 a 2024. Verão - intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; inverno - intervalo de 1 de outubro a 31 de março.

Perfil dia da semana

Na Figura 7 é apresentado o perfil por dia da semana da concentração média diária de dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024. Nas estações urbanas as concentrações de NO_2 são mais elevadas nos dias úteis, o que se encontra associado a uma maior intensidade de tráfego rodoviário nesses dias, comparativamente com os dias de fim-de-semana.

Nas estações rurais, as concentrações de NO_2 são sempre reduzidas e não se identifica uma relação significativa entre os níveis observados e o dia da semana, refletindo predominantemente valores característicos de poluição de fundo.

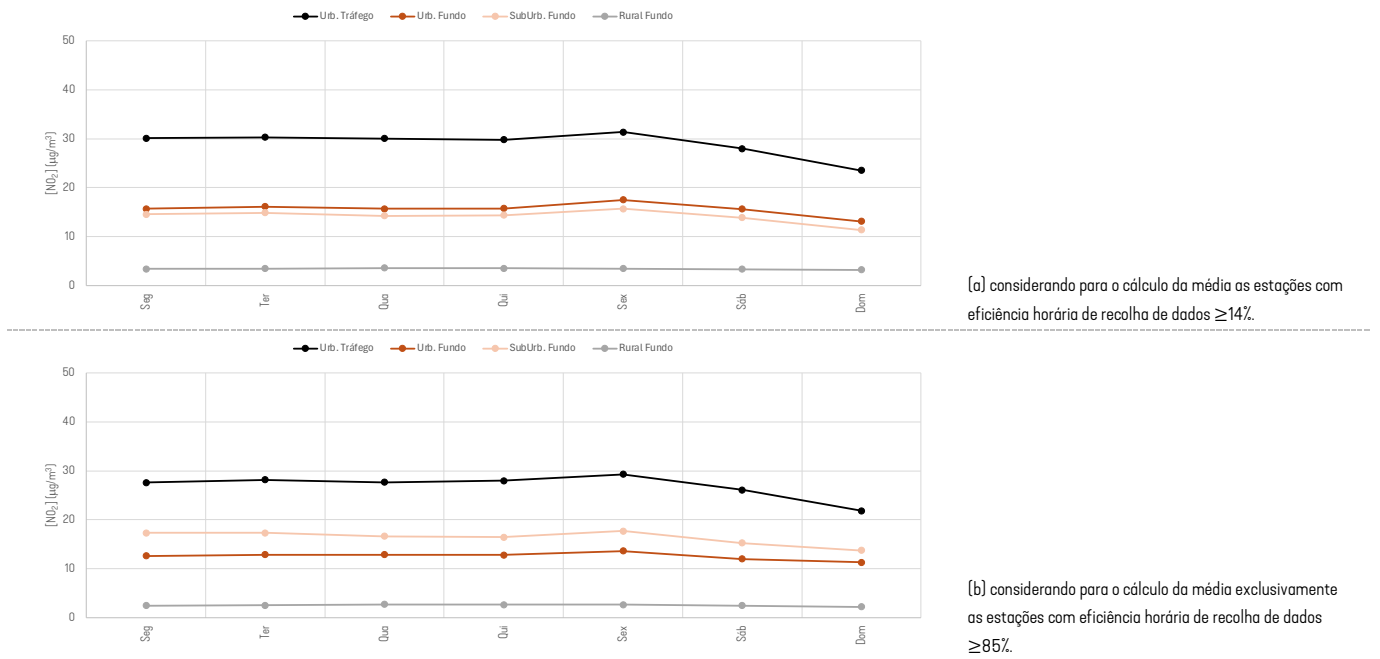
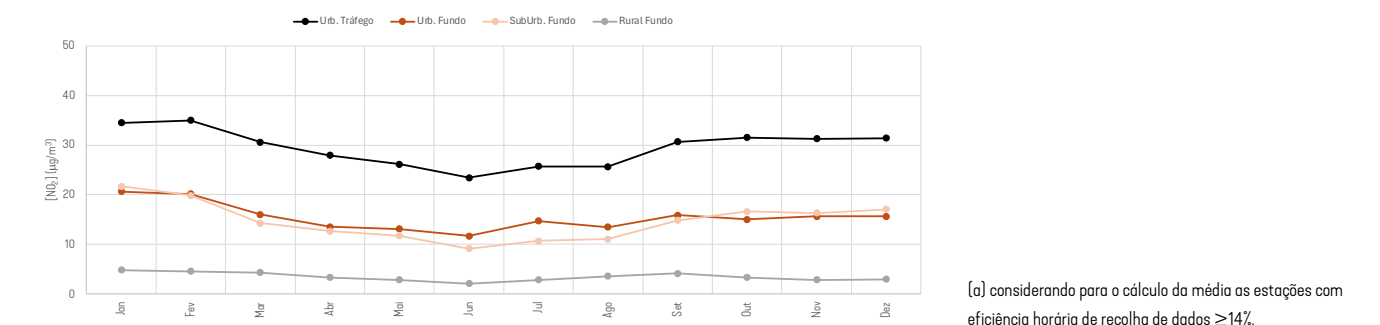


Figura 7: Perfil por dia da semana da concentração média diária de dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024.

Perfil mensal

Na Figura 8 é apresentado o perfil mensal da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), base horária, na Região Norte, no período de 2020 a 2024. Verifica-se que as concentrações de NO_2 são, de forma geral, mais elevadas no período de inverno (outubro a março), o que se encontra associado a uma maior estabilidade atmosférica junto à superfície, resultante da menor intensidade da radiação solar, e à consequente menor dispersão dos poluentes.

Nas estações urbanas de tráfego, observa-se que a concentração média mensal de NO_2 nos meses de maio a agosto é aproximadamente metade da concentração média registada nos meses de inverno, refletindo a combinação entre melhores condições de dispersão atmosférica e a redução da intensidade do tráfego rodoviário durante o período estival.



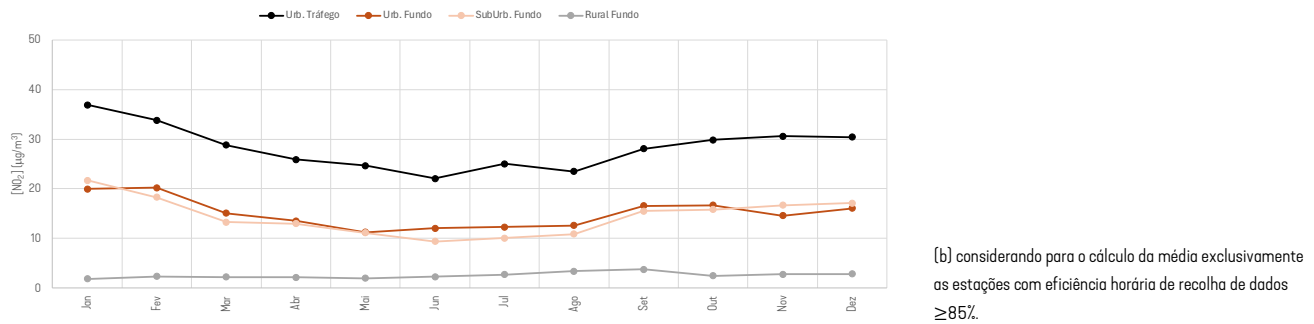


Figura 8: Perfil mensal da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), base horária, na Região Norte, no período de 2020 a 2024.

Estações Urbanas de tráfego

Na Figura 9 é apresentada a variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações urbanas de tráfego das aglomerações, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), baseado nas estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 14%, é utilizado para a análise descritiva da evolução temporal das concentrações e permite identificar a tendência global de comportamento do NO_2 nas zonas marcadamente influenciadas pelo tráfego rodoviário. Neste gráfico observa-se, de forma geral, uma diminuição progressiva das concentrações médias de NO_2 ao longo do período analisado. Esta leitura deve, contudo, ser enquadrada tendo em consideração as limitações de eficiência de recolha de dados em algumas estações e anos.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85% e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, mostra que, nos anos estatisticamente válidos, se verificam situações de incumprimento do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ apenas na estação de Frei Bartolomeu dos Mártires – S. Vitor.

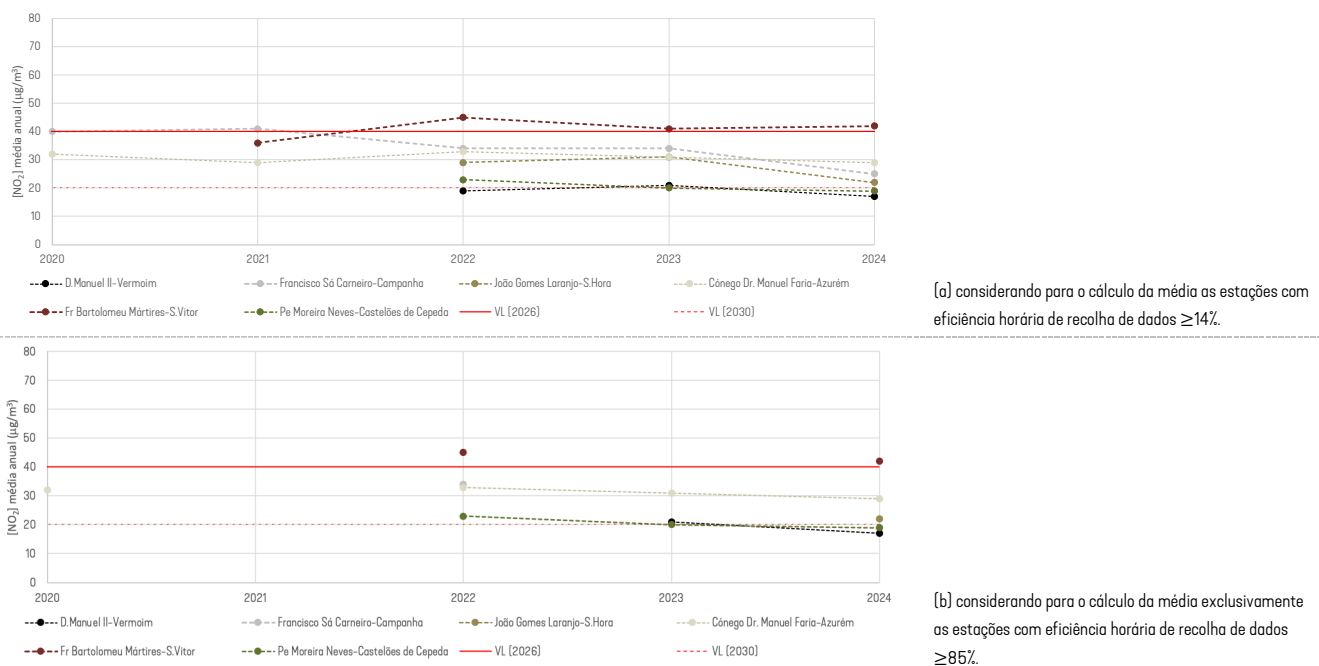


Figura 9: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), nas estações urbanas de tráfego nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

Estações urbanas de fundo

Na Figura 10 é apresentada a variação da concentração média anual de NO_2 , base horária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2020 a 2024. O gráfico superior (a), baseado nas estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite a análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando uma tendência global de diminuição dos níveis médios de NO_2 ao longo do período analisado.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência horária $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, mostra que, nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de NO_2 nas estações urbanas de fundo se mantêm abaixo do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estes resultados indicam que, ao nível do fundo urbano, a exposição média da população ao NO_2 não apresenta, nos anos válidos, situações de incumprimento do critério legal, refletindo níveis de poluição típicos de ambiente urbano não diretamente influenciado por fontes locais intensas, como o tráfego rodoviário.

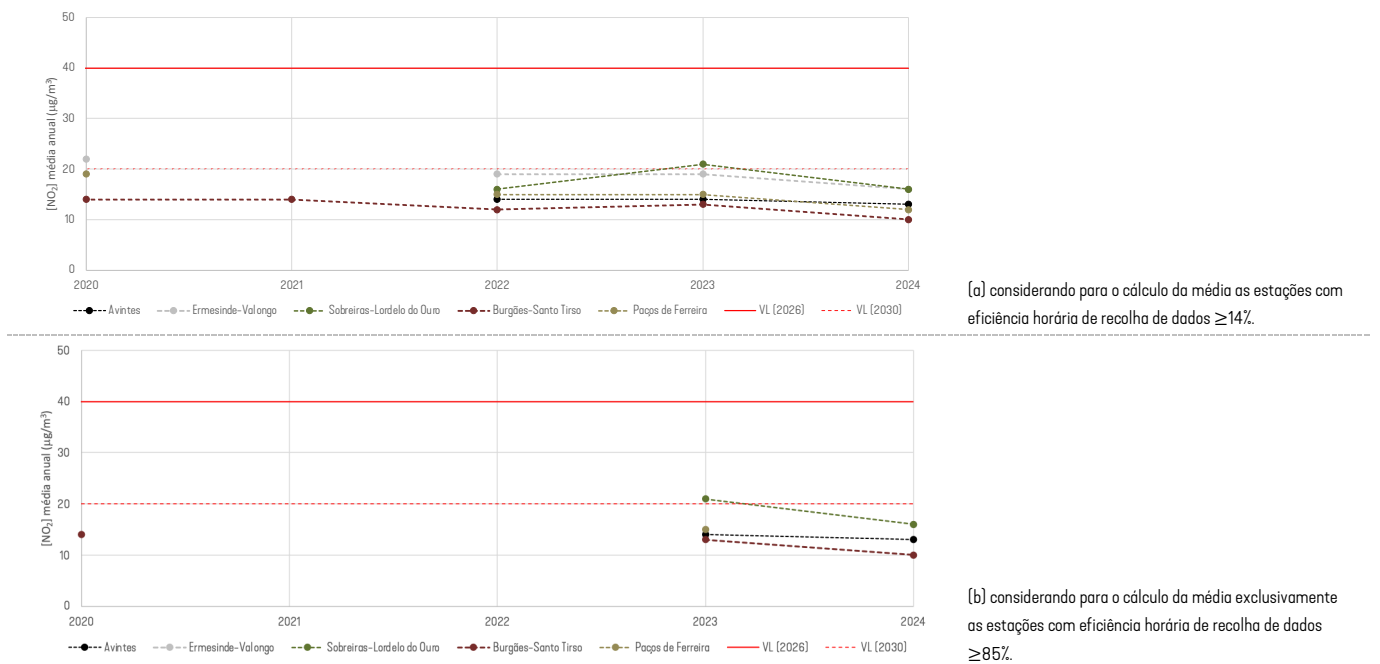


Figura 10: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), nas estações urbanas de fundo nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

Estações suburbanas de fundo

Na Figura 11 é apresentada a variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), que inclui as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite a análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando, à semelhança do observado nas estações urbanas de fundo, uma tendência global de diminuição progressiva das concentrações médias de NO_2 ao longo do período analisado.

O gráfico inferior (b) apresenta a evolução da concentração média anual de NO_2 considerando exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85% e mostra que, nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de NO_2 nas estações suburbanas de fundo mantêm-se inferiores ao valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, não se observando incumprimento do critério legal.

Tal como nas restantes tipologias de estação, nos anos de 2020 e 2021 a reduzida eficiência de recolha de dados, associada às condicionantes operacionais do período pandémico, limita a robustez estatística da informação disponível.

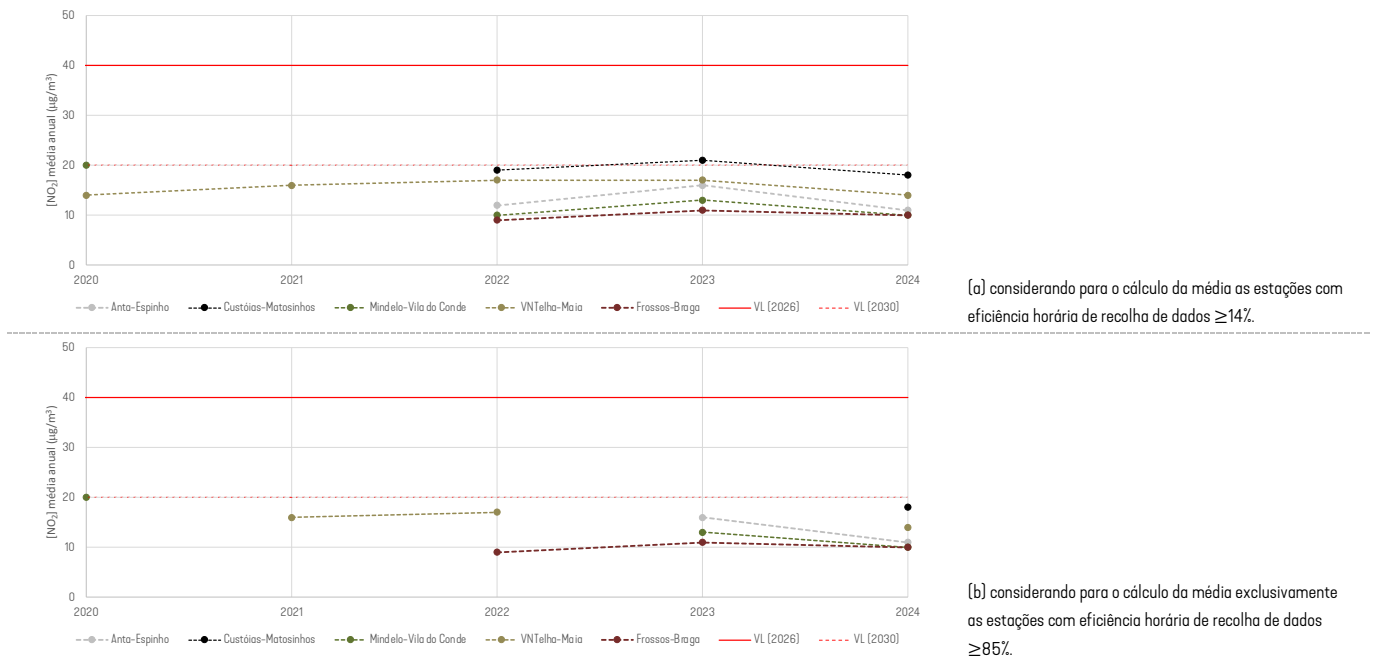


Figura 11: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), nas estações suburbanas de fundo nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

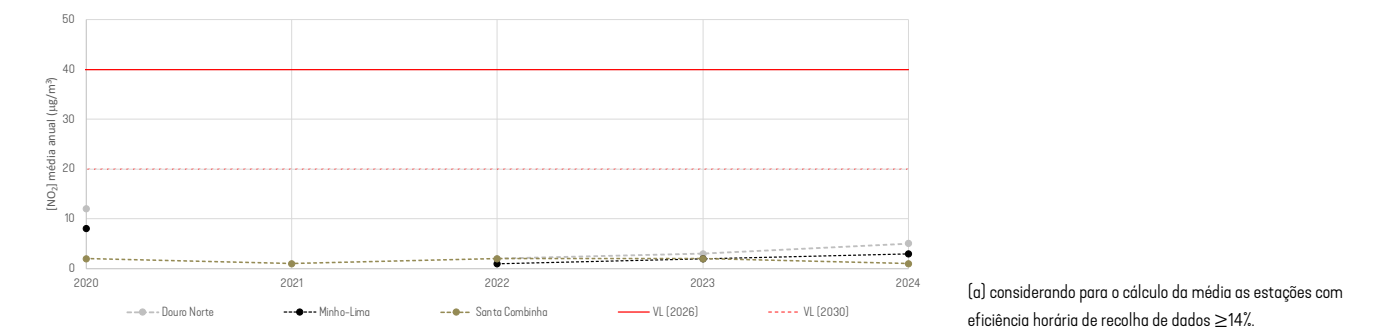
Estações rurais de fundo

Na Figura 12 é apresentada a variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações rurais de fundo, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), que inclui as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite a análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando níveis sistematicamente reduzidos de NO_2 ao longo de todo o período em análise, característicos de ambientes rurais afastados de fontes emissoras significativas.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência horária $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, confirma que, nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de NO_2 nas estações rurais de fundo mantêm-se sempre muito inferiores ao valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, não se observando qualquer situação de incumprimento do critério legal.

À semelhança do observado nas restantes tipologias de estação, nos anos de 2020 e 2021 a reduzida eficiência de recolha de dados, associada às condicionantes operacionais do período pandémico, limita a robustez estatística da informação disponível.



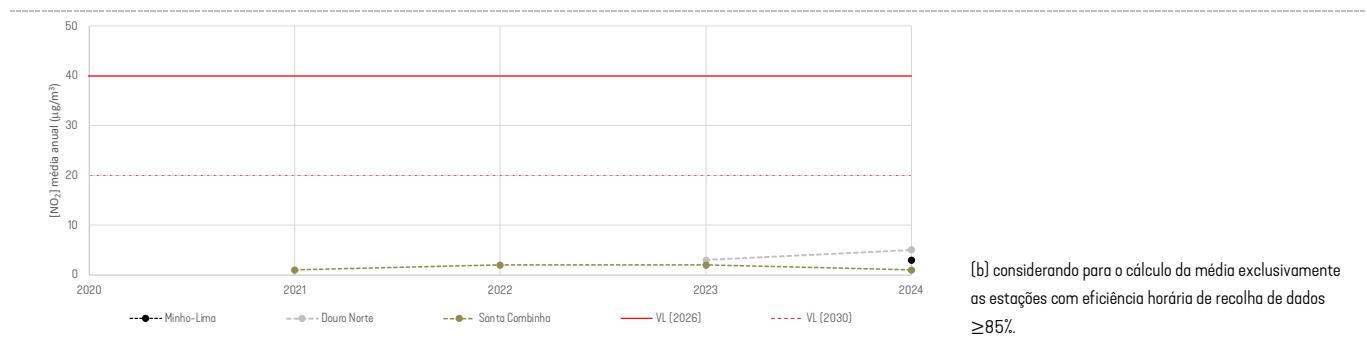


Figura 12: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO₂), nas estações rurais de fundo, no período de 2020 a 2024.

Análise

A concentração de NO₂ no ar ambiente depende da quantidade emitida diretamente pelas fontes de emissão (NO₂ primário), dos processos químicos de formação na atmosfera (NO₂ secundário) e dos mecanismos de remoção, nomeadamente por transformação química ou por deposição seca e húmida. Depende ainda do transporte horizontal das massas de ar, à escala local e regional, condicionado pela ação de ciclones e anticiclones, pela topografia e pelas descontinuidades de superfície, em particular a interface terra/mar, bem como da mistura vertical dos poluentes, fortemente influenciada pela estabilidade da atmosfera, que é determinada pelo perfil vertical de temperatura.

A queima de combustíveis fósseis a elevadas temperaturas constitui a principal fonte de emissão de óxidos de azoto (NO_x = NO + NO₂). O monóxido de azoto (NO), apesar de não ter valores-limite regulamentados no ar ambiente, desempenha um papel fundamental como precursor do dióxido de azoto (NO₂) e do ozono (O₃) troposférico.

A fração de NO₂ emitida diretamente (NO₂ primário) resultante da combustão de combustíveis fósseis depende do tipo de processo de combustão, sendo, no entanto, usualmente da ordem dos 5 a 10% do total de NO_x emitido. Verificam-se algumas exceções, nomeadamente em determinados veículos automóveis, especialmente a gasóleo, para os quais esta fração pode atingir valores da ordem dos 40 a 50%.

Nas áreas urbanas a principal fonte de emissão de NO₂ é o tráfego rodoviário, sendo que as concentrações deste poluente apresentam, habitualmente, uma variação similar à curva típica de tráfego, com um pico no início da manhã e um pico no final da tarde. A concentração mais elevada no pico do final da tarde está normalmente associada à maior estabilidade atmosférica junto à superfície e consequente menor dispersão vertical. Observa-se também um ciclo do dia da semana, pois o tráfego rodoviário nas zonas urbanas diminui nos dias de fim-de-semana, principalmente no domingo.

Nas estações urbanas da RMQAR-N, as concentrações de NO₂ apresentam este comportamento típico. Por sua vez, nas estações de fundo, as concentrações de NO₂ registadas são muito reduzidas e não evidenciam uma variação relevante ao longo do dia nem por dia da semana.

A estabilidade atmosférica na camada limite é fortemente condicionada pela intensidade da radiação solar, observando-se quer um ciclo horário (diurno-noturno), quer um ciclo sazonal. Relativamente ao ciclo sazonal, no verão observa-se, tipicamente, durante o período diurno, um forte gradiente de decréscimo da temperatura com a altitude, o que conduz a uma elevada instabilidade atmosférica e a uma mistura vertical intensa, que pode atingir altitudes superiores a um quilómetro. Durante o período noturno, verifica-se frequentemente a formação de uma inversão térmica (aumento da temperatura com a altitude), originando uma forte estabilidade atmosférica, com a mistura vertical limitada a poucas centenas de metros. No inverno, devido à menor intensidade da radiação solar, tanto o gradiente térmico diurno como a inversão térmica noturna apresentam, em geral, menor intensidade, resultando em condições de instabilidade e estabilidade atmosférica menos intensas.

Nas estações urbanas de tráfego a variação mensal da concentração de NO_2 é evidente. As concentrações de NO_2 são mais elevadas no período de inverno (outubro a março), em resultado da maior estabilidade atmosférica junto à superfície, associada à menor intensidade da radiação solar, e da consequente menor dispersão. A concentração média de NO_2 nos meses de maio a agosto é aproximadamente metade da concentração média observada nos meses de inverno. Nas estações urbanas e suburbanas de fundo, embora se identifique igualmente uma variação anual, esta é menos intensa.

Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor limite anual de proteção da saúde humana ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por estação, no período de 2020 a 2024, observaram-se situações de incumprimento apenas na estação de Frei Bartolomeu Mártires – S. Vitor.

As estações rurais de fundo (Minho – Lima e Douro Norte) apresentaram uma eficiência de recolha de dados muito reduzida no período de 2020 a 2024; no entanto, os dados recolhidos evidenciam valores de concentração de NO_2 reduzidos, inferior a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tanto na estação da Zona Norte Litoral como nas estações da Zona Norte Interior. As estações urbanas e suburbanas de fundo também apresentaram, em vários anos, uma eficiência de recolha de dados muito reduzida, ainda assim, os dados recolhidos apresentam valores reduzidos de concentração de NO_2 significativamente inferiores ao valor limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo da ordem dos $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor limite horário de proteção da saúde humana ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a não ultrapassar mais do que 18 vezes por ano civil), por estação, no período de 2020 a 2024 não se observaram situações de ultrapassagem.

PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO (PM₁₀)

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa os valores limite das concentrações de partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm (PM₁₀) no ar ambiente para proteção da saúde humana (Tabela 8).

Tabela 8: Valores-limite para a proteção da saúde humana relativos às partículas em suspensão (PM₁₀) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor	Observações
Valor limite diário	Um dia	35 µg/m³	A não exceder mais de 35 vezes por ano civil
Valor limite anual	Ano civil	40 µg/m³	Média anual

Nota: Os valores-limite aplicam-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com o método de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Figura 13 é apresentada a eficiência diária na recolha de dados de PM₁₀ na RMQAR-N, no período de 2020 a 2024. Verifica-se que a rede apresentou, de forma geral, uma eficiência reduzida na recolha de dados deste poluente, com particular destaque para os anos de 2020 e 2021, fortemente condicionados pelas restrições operacionais associadas à pandemia de COVID-19. Em 2021, 15 das 22 estações, apresentaram uma eficiência inferior a 14%, correspondendo ao valor mínimo considerado para efeitos de análise indicativa. No ano de 2022 a estação de Frossos deixou de medir PM₁₀, no entanto, também nos anos de 2020 e 2021 a eficiência do recolha foi nula.

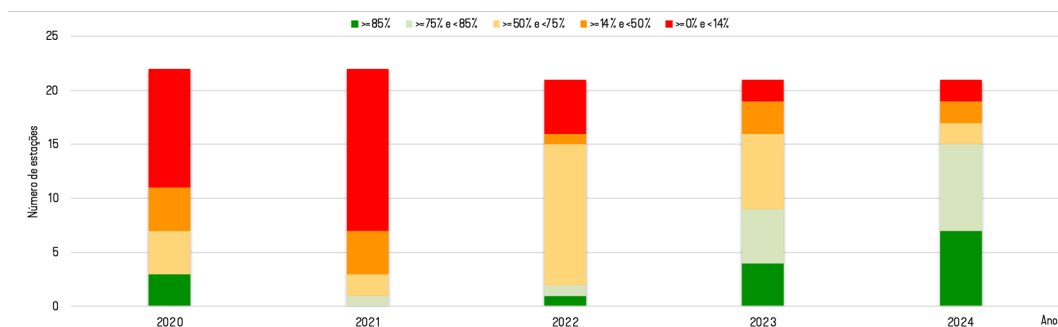


Figura 13: Eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão (PM₁₀) na RMQAR-N, em percentagem, no período de 2020 a 2024.

Na Tabela 9 é apresentada a eficiência diária na recolha de dados de PM₁₀ por estação, no período de 2020 a 2024. Para várias destas estações observa-se uma eficiência reduzida em diversos anos o que limita uma análise robusta das tendências evolutivas das concentrações de PM₁₀ nessas estações.

Na Tabela 10 é apresentada a concentração média anual (base diária) de PM₁₀ e, na Tabela 11, são apresentadas as excedências ao valor-limite diário de 50 µg/m³, por estação, no período de 2020 a 2024.

A avaliação da conformidade legal é efetuada exclusivamente para os anos em que a eficiência diária de recolha de dados é igual ou superior a 85%, em conformidade com os critérios de representatividade temporal definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de PM₁₀ cumprem com os valores-limite.

Tabela 9: Eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão (PM₁₀), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Eficiência diária na recolha de dados de PM ₁₀ (%), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	5	0	70	77	78
		Custóias - Matosinhos	0	0	56	84	58
		Leça do Balio-Matosinhos	45	72	62	50	0
		Mindelo - Vila do Conde	4	12	67	82	84
		VNTelha - Maia	54	31	65	70	75
	Urb. Fundo	Avintes	42	0	69	94	84
		Ermesinde - Valongo	0	0	52	87	93
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	71	34	16
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	0	0	62	81	81
		Francisco Sá Carneiro - Campanha	0	0	95	70	85
		João Gomes Laranjo - S. Hora	88	46	55	87	77
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	42	12	22	73	88
	Urb. Industrial	Seara-Matosinhos	71	0	71	91	90
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	10	0	61	73	80
		Paços de Ferreira	73	0	59	52	67
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	91	57	78	77	93
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	0	0	0	52	95
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	61	22	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	1	79
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	90	46	10	49	90
		Santa Combinha	26	81	0	36	31

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: ■ >=85% ■ >=75% e <85% ■ >=50% e <75% ■ >=14% e <50% ■ >=0% e <14%

Tabela 10: Concentração média anual de partículas em suspensão (PM₁₀), base diária, por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Concentração média anual (base diária) de PM ₁₀ (µg/m³), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	23	---	23	21	20
		Custóias - Matosinhos	---	---	17	18	18
		Leça do Balio-Matosinhos	20	17	31	27	---
		Mindelo - Vila do Conde	20	22	17	20	19
		VNTelha - Maia	17	16	23	21	22
	Urb. Fundo	Avintes	18	---	22	18	20
		Ermesinde - Valongo	---	---	25	23	19
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	---	---	22	24	25
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	---	---	18	17	19
		Francisco Sá Carneiro - Campanha	---	---	27	29	25
		João Gomes Laranjo - S. Hora	16	15	20	19	15
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	23	31	21	23	25
	Urb. Industrial	Seara-Matosinhos	13	---	24	21	23
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	20	---	17	21	20
		Paços de Ferreira	21	---	20	21	18
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	16	15	21	20	23
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	---	---	---	32	23
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	7	21	---	---	---
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	---	---	---	13	7
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	9	13	27	8	9
		Santa Combinha	10	10	---	10	10

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores-limite definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Tabela 11: Excedências ao valor limite diário de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentração média diária de partículas em suspensão (PM_{10}), por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Excedências por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Agglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	0	0	13	5	7
		Custóias - Matosinhos	0	0	4	10	6
		Leça da Balia-Matosinhos	0	0	27	16	0
		Mindelo - Vila do Conde	0	2	6	8	6
		VNTelha - Maia	0	0	13	5	11
	Urb. Fundo	Avintes	0	0	10	4	11
		Ermesinde - Valongo	0	0	6	14	11
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	9	2	3
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	0	0	4	10	6
		Francisco Sá Carneiro - Campanha	0	0	19	15	16
		João Gomes Laranjo - S. Hora	2	0	1	4	7
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	0	6	5	4	14
	Urb. Industrial	Seara-Matosinhos	2	0	12	6	7
Agglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	0	0	1	14	10
		Paços de Ferreira	0	0	9	15	6
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	0	0	14	13	14
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	0	0	0	15	16
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	0	0	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	0	4	5	0	4
		Santa Combinha	0	3	0	0	1

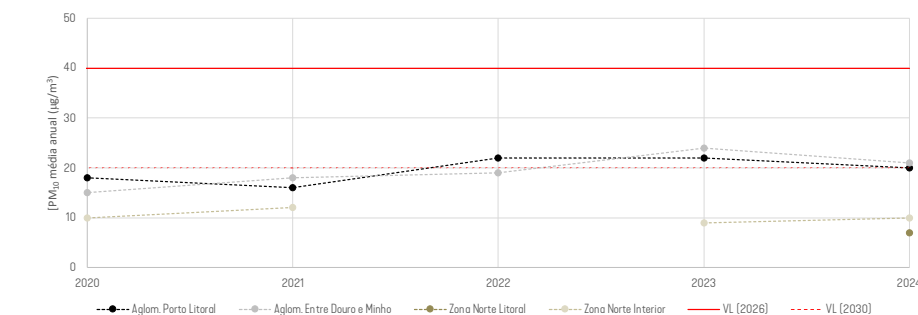
Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores-limite definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%.

Na Figura 14 é apresentada a tendência evolutiva das concentrações médias anuais (base diária) de PM_{10} agregadas por aglomeração e zona, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a) apresenta a evolução considerando, para o cálculo da média, as estações com eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 14%, sendo utilizado para a análise descritiva das tendências temporais. As médias apresentadas correspondem a médias aritméticas simples das concentrações médias anuais das estações incluídas.

O gráfico inferior (b) apresenta a evolução das concentrações médias anuais de PM_{10} considerando exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 85%, sendo este o único a utilizar para efeitos de avaliação da conformidade legal com o valor-limite anual de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Considerando as concentrações médias agregadas por aglomeração ou zona, verifica-se o cumprimento do valor-limite anual de proteção da saúde humana de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em todos os anos estatisticamente válidos do período analisado.



(a) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$.

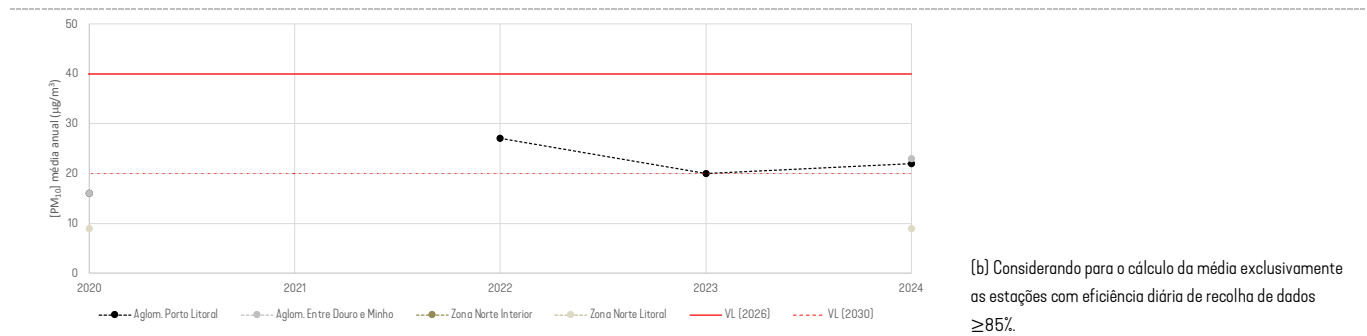


Figura 14: Variação da concentração média anual partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, por aglomeração e zona, no período de 2020 a 2024.

Os perfis temporais apresentados na Figura 15 a Figura 18 (horário, por dia da semana e mensal) foram construídos com base nas estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 14% e também considerando exclusivamente as estações com eficiência $\geq 85\%$, com o objetivo de demonstrar a consistência e a robustez dos padrões temporais observados. Estes perfis destinam-se exclusivamente à caracterização do comportamento temporal típico de partículas em suspensão (PM_{10}), não se destinando à avaliação da conformidade legal.

Perfil horário

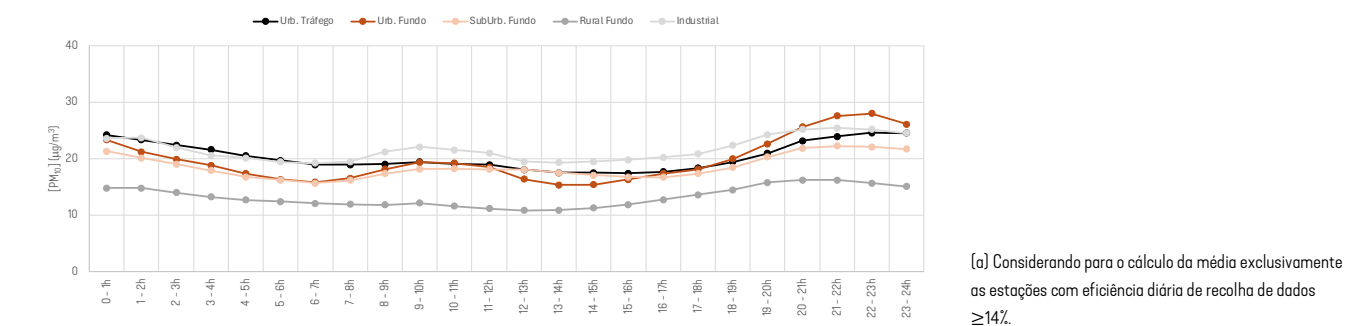
Por tipo de estação

Na Figura 15 é apresentado o perfil horário da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a) apresenta o perfil considerando as estações com eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 14%, sendo utilizado para a caracterização descritiva do comportamento horário das concentrações.

O gráfico inferior (b) apresenta o perfil considerando exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 85%, garantindo maior robustez estatística dos resultados.

A variação horária da concentração de PM_{10} evidencia um pico no início da manhã e um segundo pico no final da tarde, embora menos acentuados do que os observados para o dióxido de azoto (NO_2). As concentrações mais elevadas no final da tarde encontram-se associadas à maior estabilidade atmosférica junto à superfície e à consequente redução da dispersão dos poluentes, podendo ainda estar parcialmente relacionadas com o aumento das emissões associadas ao aquecimento doméstico no período vespertino.



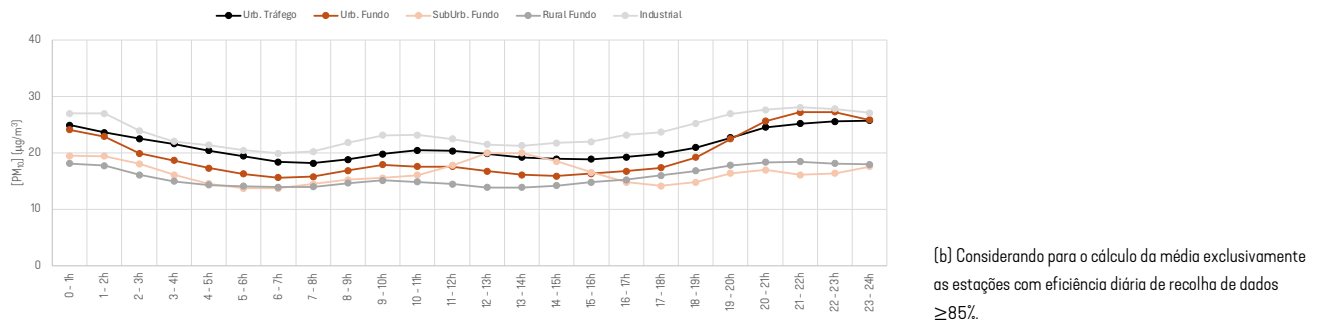


Figura 15: Perfil horário da concentração média partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024.

Comparação verão-inverno

Na Figura 16 é apresentado o perfil horário da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}) da Região Norte, por estação do ano, no período de 2020 a 2024

A concentração de PM_{10} é mais elevada no período de inverno (outubro a março) devido à maior estabilidade atmosférica junto à superfície, resultante de uma menor intensidade da radiação solar, e à consequente menor dispersão, podendo ainda estar parcialmente associada ao incremento das emissões provenientes do aquecimento doméstico.

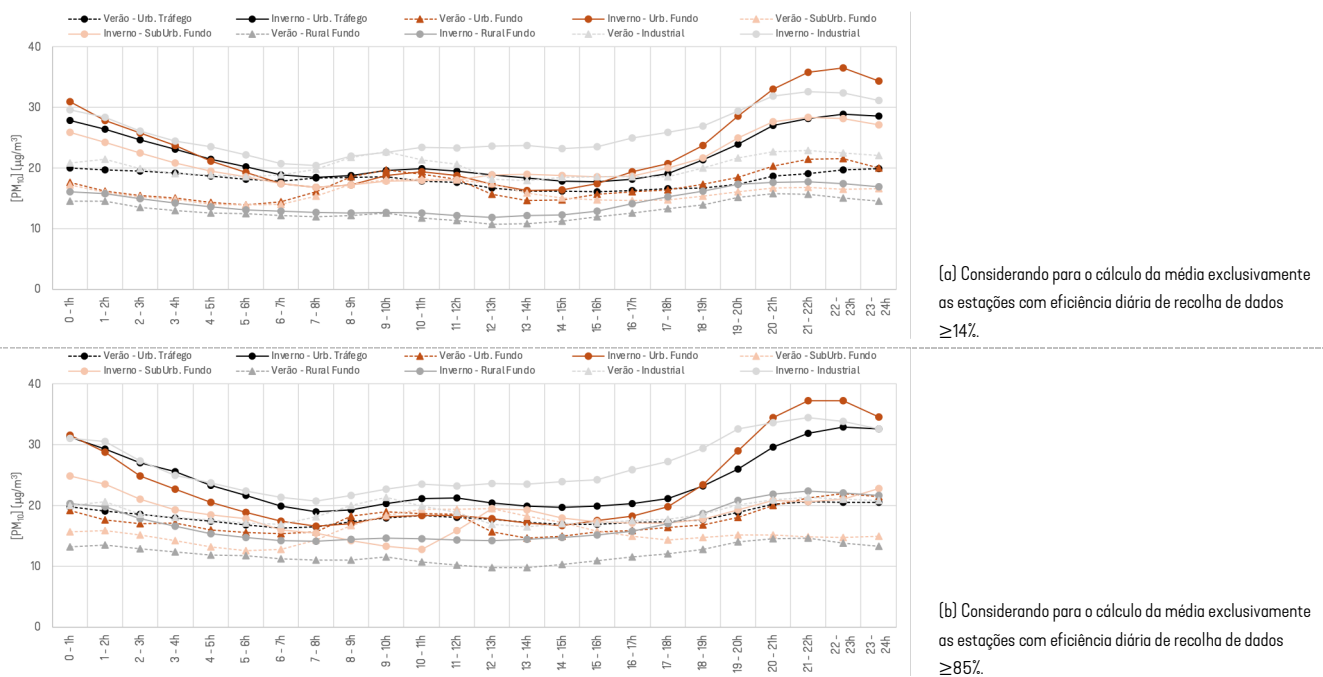


Figura 16: Perfil horário da concentração média partículas em suspensão (PM_{10}), na Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2020 a 2024. Verão - intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; inverno - intervalo de 1 de outubro a 31 de março.

Perfil dia da semana

Na Figura 17 é apresentado o perfil por dia da semana da concentração média diária de PM_{10} , por tipo de estação, no período de 2020 a 2024.

De forma geral, a variação da concentração média diária de PM_{10} ao longo dos dias da semana não evidencia um padrão semanal marcado, ao contrário do que se observa tipicamente para poluentes diretamente associados ao tráfego rodoviário, como o dióxido de azoto (NO_2).

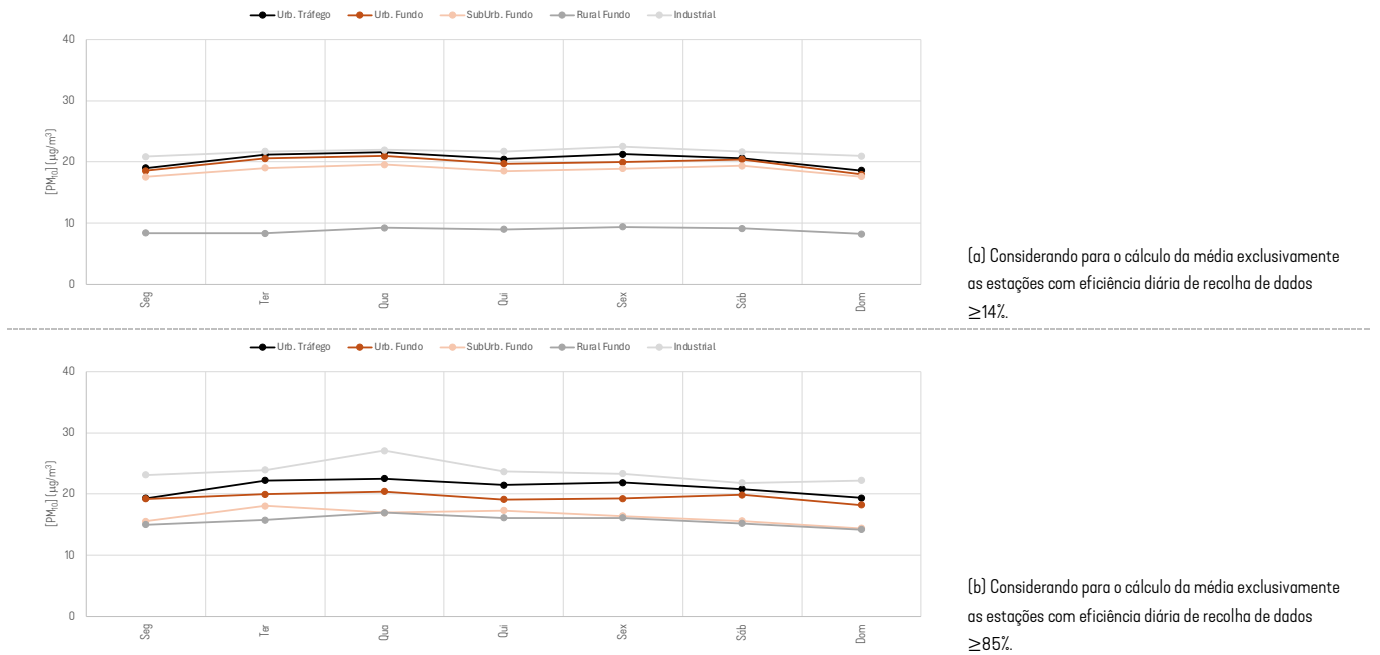
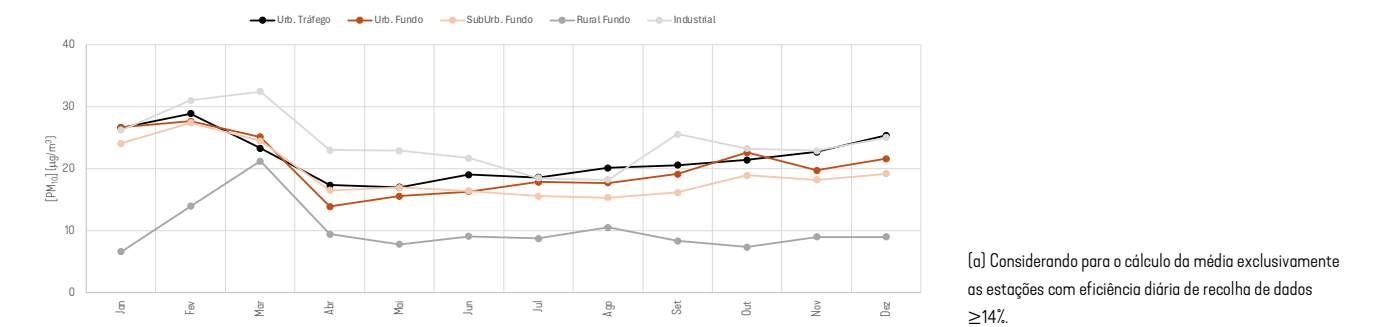


Figura 17: Perfil por dia da semana da concentração média diária de partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024.

Perfil mensal

Na Figura 18 é apresentado o perfil mensal da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}), da Região Norte, no período de 2020 a 2024.

De forma geral, as concentrações médias mensais de PM_{10} são mais elevadas durante o período de inverno (outubro a março), em resultado da maior estabilidade atmosférica junto à superfície, associada à menor intensidade da radiação solar, o que conduz a uma redução da mistura vertical e da dispersão dos poluentes. No entanto, a variabilidade sazonal observada é menos pronunciada do que a verificada para o dióxido de azoto (NO_2), refletindo o carácter mais difuso e multifatorial das fontes de PM_{10} .



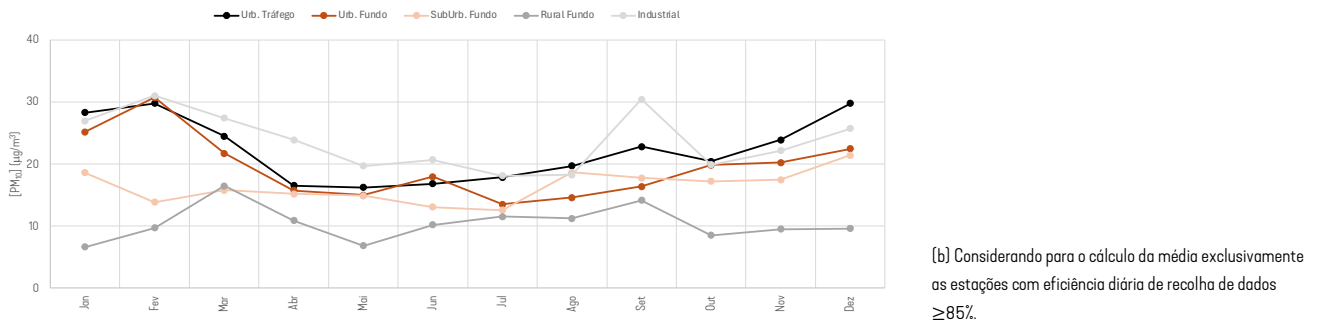


Figura 18: Perfil mensal da concentração média partículas em suspensão (PM_{10}), na Região Norte, no período de 2020 a 2024.

Estações urbanas de tráfego

Na Figura 19 é apresentada a variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações urbanas de tráfego das aglomerações, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), que inclui os anos com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite a análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando uma variabilidade interanual associada quer às condições meteorológicas, quer à intensidade das fontes emissoras locais, nomeadamente o tráfego rodoviário e os fenómenos de ressuspensão de partículas.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente os anos com eficiência diária $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, mostra que, nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de PM_{10} nas estações urbanas de tráfego se mantêm inferiores ao valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, não se observando situações de incumprimento deste critério legal.

A reduzida eficiência de recolha de dados limita a robustez estatística da avaliação formal da conformidade legal.

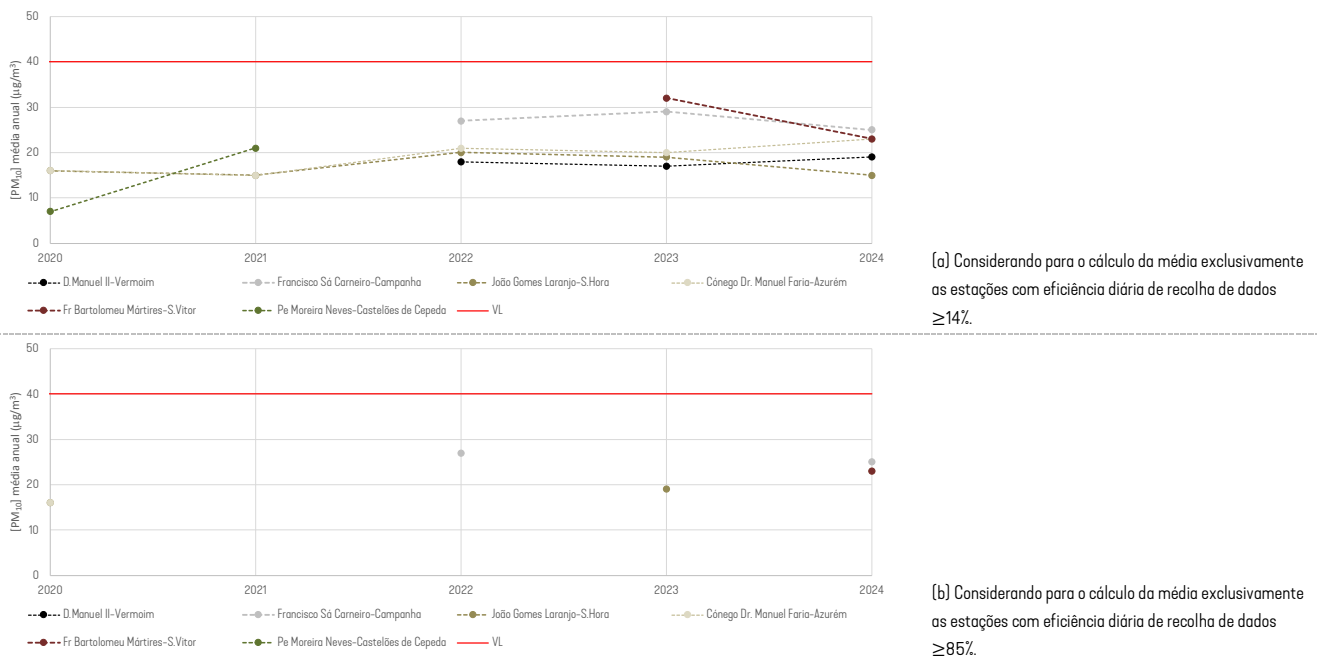


Figura 19: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações urbanas de tráfego nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

Estações urbanas de fundo

Na Figura 20 é apresentada a variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), que integra os anos com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite uma análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando valores globalmente moderados e uma variabilidade interanual predominantemente condicionada por fatores meteorológicos.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente os anos com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, apresenta apenas um número muito reduzido de estações e de anos estatisticamente válidos, o que limita significativamente a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de PM_{10} mantêm-se abaixo do valor-limite anual de $40 \mu g/m^3$, não se observando situações de incumprimento do critério legal.

A reduzida eficiência de recolha de dados em vários anos condiciona, de forma relevante, a robustez estatística da avaliação formal da conformidade legal.

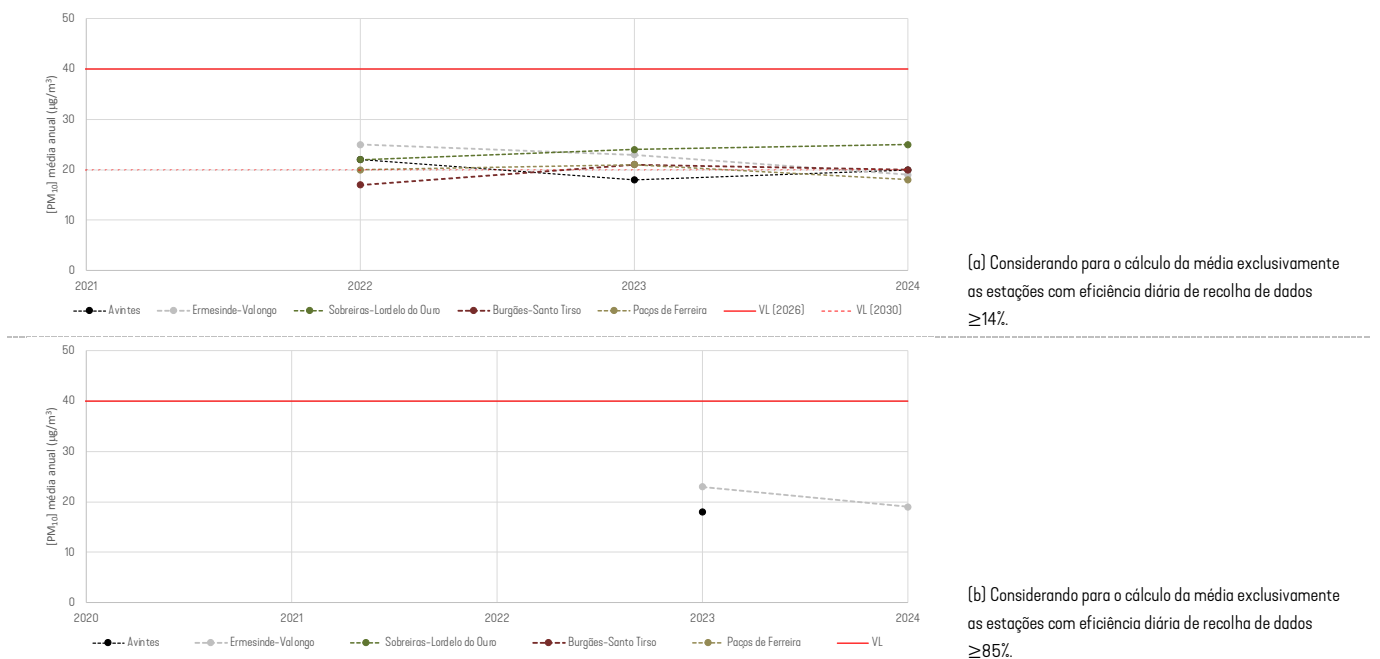


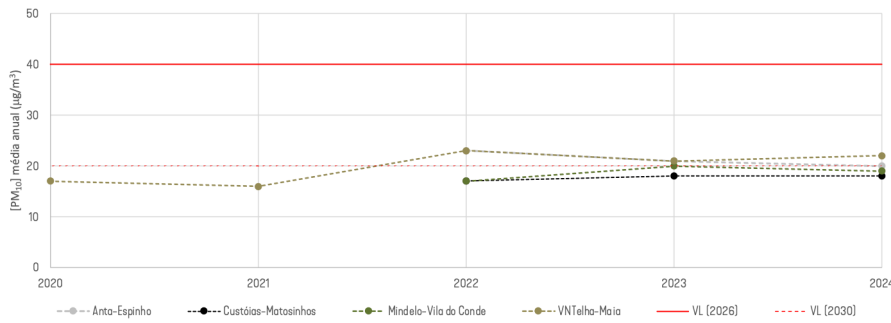
Figura 20: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações urbanas de fundo nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

Estações suburbanas de fundo

Na Figura 21 é apresentada a variação da concentração média anual de PM_{10} , base diária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), que integra as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite uma análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando valores globalmente moderados e uma variabilidade interanual predominantemente condicionada por fatores meteorológicos.

Não é apresentada representação gráfica para o critério de eficiência $\geq 85\%$, uma vez que nenhuma das estações suburbanas de fundo atingiu esse limiar no período de 2020 a 2024, impossibilitando a avaliação formal da conformidade legal.



(a) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$.

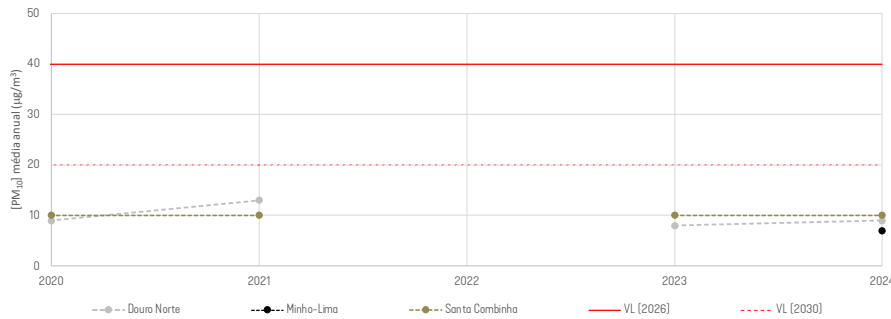
Figura 21: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações suburbanas de fundo nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

Estações rurais de fundo

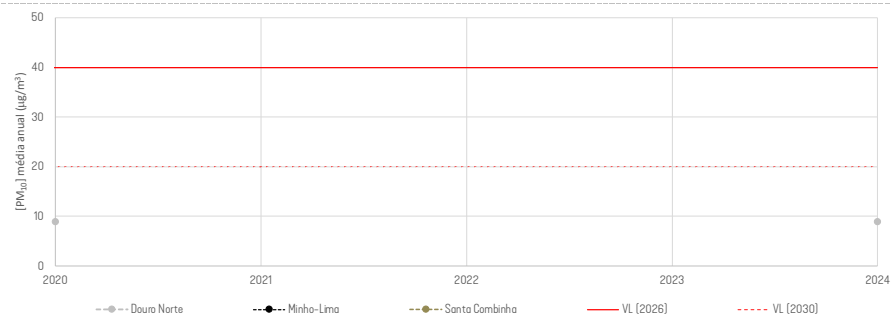
Na Figura 22 é apresentada a variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações rurais de fundo, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), considerando as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$, evidencia valores globalmente baixos ao longo de todo o período em análise, característicos de ambientes afastados de fontes emissoras significativas.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$ e é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, apresenta um número muito reduzido de anos estatisticamente válidos (dois), o que limita a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de PM_{10} mantêm-se claramente abaixo do valor-limite anual de $40 \mu g/m^3$, não se observando situações de incumprimento do critério legal.



(a) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$.



(b) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 22: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações rurais de fundo, no período de 2020 a 2024.

Análise

A concentração de partículas em suspensão (PM_{10}) no ar ambiente depende da quantidade emitida diretamente pelas fontes de emissão (PM_{10} primário), dos processos químicos de formação na atmosfera (PM_{10} secundário) e dos mecanismos de remoção, nomeadamente por transformação química ou por deposição seca e húmida. As reações químicas de formação têm como precursores poluentes como os óxidos de azoto (NO_x), o dióxido de enxofre (SO_2) e os compostos orgânicos voláteis (COV), que podem originar, respetivamente, nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}) e aerossóis orgânicos secundários.

A concentração de PM_{10} no ar ambiente depende ainda do transporte horizontal das massas de ar, à escala local, regional e transcontinental, condicionado pela ação de ciclones e anticiclones, pela topografia e pelas descontinuidades de superfície, em particular a interface terra/mar, bem como da mistura vertical dos poluentes, fortemente influenciada pela estabilidade da atmosfera, que é determinada pelo perfil vertical de temperatura.

Existem diversas fontes de PM_{10} , quer naturais, quer antropogénicas. Das fontes antropogénicas realça-se o tráfego rodoviário (que inclui emissões diretas do escape dos veículos, emissões provenientes dos processos de abrasão — desgaste de pneus, travões e da superfície da estrada — e da ressuspensão de poeiras nas rodovias), os processos industriais (quer pela queima de combustíveis fósseis, quer por emissões difusas associadas ao processo ou ao armazenamento e gestão de matérias-primas ou de produto acabado), a queima de biomassa para aquecimento doméstico, as obras de construção civil, a exploração de massas minerais e a atividade agrícola (quer diretamente, quer através da emissão de substâncias precursoras, como o amoníaco, NH_3 , que originará partículas de amónio, NH_4^+).

Das fontes naturais destacam-se as partículas emitidas por fogos florestais ou as resultantes da ação do vento sobre o solo e superfícies aquáticas. Salienta-se ainda a relevância das partículas provenientes das áreas desérticas (nomeadamente do deserto do Saara) e das emissões ocasionais associadas a erupções vulcânicas.

Devido à grande diversidade de fontes e aos múltiplos processos de formação, a composição das partículas em suspensão no ar ambiente é muito variável. A fração mais grosseira das PM_{10} contém elementos abundantes da crosta terrestre e sais marinhos, tais como alumínio, cálcio, ferro, potássio e sílica, bem como elementos resultantes de emissões antropogénicas, tais como arsénio, cádmio, chumbo e benzo[a]pireno.

A fração fina das PM_{10} é sobretudo constituída por sulfatos (SO_4^{2-}), sódio (Na^+), amónio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-), cálcio (Ca^{2+}), potássio (K^+), cloreto (Cl^-), carbono orgânico, carbono elementar e magnésio (Mg^{2+}), provenientes da formação química, da queima de combustíveis fósseis e de processos industriais.

Nas áreas urbanas, os transportes rodoviários são uma das principais fontes emissoras de PM_{10} , observando-se as maiores concentrações na proximidade de vias com tráfego intenso. Estas partículas resultam não só das emissões diretas do escape dos veículos, mas também dos processos de abrasão (desgaste de pneus, travões e da superfície da estrada) e da ressuspensão de poeiras nas estradas. Em geral, os veículos a gasóleo emitem uma quantidade superior de partículas finas, por veículo, quando comparados com os veículos a gasolina. A queima de biomassa para aquecimento doméstico assume igualmente um peso significativo nas emissões durante o período de inverno, sobretudo no final da tarde e início da noite.

Nas áreas urbanas, a curva típica de tráfego rodoviário apresenta um pico no início da manhã e um pico no final da tarde. Nas estações da RMQAR-N, a variação da concentração de PM_{10} evidencia igualmente um pico no início da manhã e um pico no final da tarde, embora este último seja, em geral, menos acentuado do que no caso do dióxido de azoto (NO_2). A concentração mais elevada no pico do final da tarde está associada à maior estabilidade atmosférica junto à superfície e à consequente menor dispersão, estando também potencialmente relacionada com as emissões resultantes do aquecimento doméstico.

Embora o tráfego rodoviário apresente um ciclo do dia da semana nas zonas urbanas, diminuindo nos dias de fim de semana, principalmente ao domingo, nas estações urbanas da RMQAR-N as concentrações de PM_{10} não evidenciam uma variação significativa em função do dia da semana.

Tal como referido, a estabilidade atmosférica na camada limite é fortemente condicionada pela intensidade da radiação solar, observando-se quer um ciclo horário (diurno-noturno), quer um ciclo sazonal. Relativamente ao ciclo sazonal, no verão observa-se, tipicamente, durante o período diurno, um forte gradiente de decréscimo da temperatura com a altitude, o que conduz a uma elevada instabilidade atmosférica e a uma mistura vertical intensa, que pode atingir altitudes superiores a um quilómetro. Durante o período noturno, verifica-se frequentemente a formação de uma inversão térmica (aumento da temperatura com a altitude), originando uma forte estabilidade atmosférica, com a mistura vertical limitada a poucas centenas de metros. No inverno, devido à menor intensidade da radiação solar, tanto o gradiente térmico diurno como a inversão térmica noturna apresentam, em geral, menor intensidade, resultando em condições de instabilidade e estabilidade atmosférica menos intensas.

Nas estações da RMQAR-N, para o período em análise, a concentração de PM_{10} é, de forma geral, mais elevada no período de inverno (outubro a março); no entanto, a diferença é menos significativa do que a observada para o NO_2 .

Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor-limite anual de proteção da saúde humana ($40 \mu g/m^3$), por estação, no período de 2020 a 2024, observou-se o cumprimento em todas as estações da RMQAR-N, nos anos estatisticamente válidos.

Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor-limite diário de proteção da saúde humana ($50 \mu g/m^3$, a não ultrapassar mais do que 35 vezes por ano civil), por estação, no período de 2020 a 2024, não se observaram em nenhuma estação mais do que 35 ultrapassagens do referido valor-limite. Foram, no entanto, observadas ultrapassagens nos anos de 2022 a 2024 em todas as estações da RMQAR-N.

Salienta-se, contudo, que a eficiência de recolha de dados foi globalmente reduzida (apenas cerca de 14% das estações/ano apresentaram uma eficiência superior a 85%), o que limita significativamente a robustez estatística da avaliação da conformidade legal.

OZONO (O₃)

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa o objetivo a longo prazo, o valor-alvo e os limiares de informação e de alerta para as concentrações de ozono(O₃) no ar ambiente, para proteção da saúde humana (Tabela 12).

Tabela 12: Objetivo a longo prazo, valor-alvo e limiares de informação e de alerta para o ozono (O₃) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor	Observações
Objetivo a longo prazo	Valor máximo diário das médias octo-horárias, calculadas por períodos consecutivos de oito horas, num ano civil.	120 µg/m ³	-
Valor-alvo	Valor máximo diário das médias octo-horárias, calculadas por períodos consecutivos de oito horas, num ano civil.	120 µg/m ³	A não exceder mais de 25 vezes em média, por ano civil, num período de três anos
Limiar de informação	Uma hora	180 µg/m ³	-
Limiar de alerta	Uma hora	240 µg/m ³	-

Nota: Os valores-limite aplicam-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com o método de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Figura 23 é apresentada a eficiência horária na recolha de dados de ozono (O₃) na Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N), no período de 2020 a 2024.

Verifica-se que a rede apresentou, de forma geral, uma eficiência reduzida na recolha de dados deste poluente. Em particular, no ano de 2021, apenas uma estação obteve uma eficiência horária de recolha de dados superior a 85%, limitando significativamente a robustez estatística da avaliação.

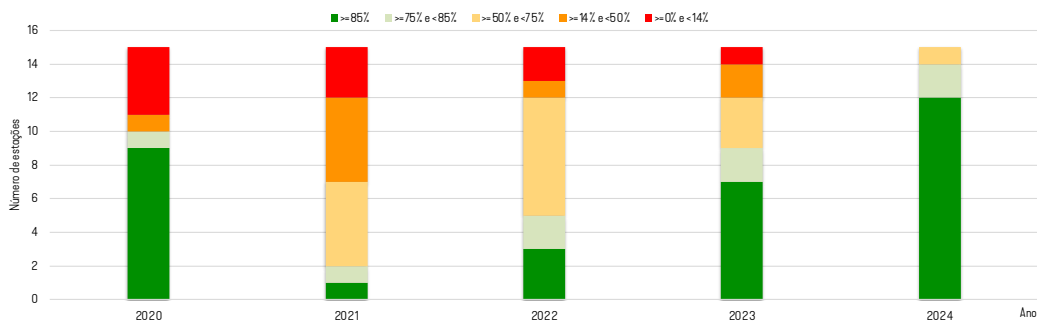


Figura 23: Eficiência horária na recolha de dados de ozono (O₃) na RMQAR-N, em percentagem, no período de 2020 a 2024.

Na Tabela 13 é apresentada a eficiência na recolha horária de dados de O₃ por estação, no período de 2020 a 2024. Para várias estações verifica-se a ocorrência de anos com eficiência inferior a 85%, o que limita a realização de análises robustas de conformidade legal e de tendências temporais, sobretudo quando esses períodos se repetem ao longo dos anos.

Na Tabela 14 é apresentada a concentração média anual de O₃, base horária, por estação, no período de 2020 a 2024. A concentração média anual de O₃ não está sujeita a avaliação de conformidade legal, sendo utilizada apenas como indicador descritivo.

Tabela 13: Eficiência horária na recolha de dados de ozono (O₃), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Eficiência horária na recolha de dados de O ₃ (%), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	0	0	0	0	100
		Custóias - Matosinhos	0	0	65	83	90
		Leça do Balio-Matosinhos	32	82	100	85	91
		Mindelo - Vila do Conde	98	21	74	87	91
		VNTelha - Maia	100	43	84	93	99
	Urb. Fundo	Avintes	75	39	80	33	84
		Ermesinde - Valongo	0	17	35	69	98
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	100	73	71	48	99
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	0	0	72	93	96
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	98	53	65	92	92
		Paços de Ferreira	99	23	59	75	74
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	100	72	92	56	94
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	88	56	3	50	97
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	97	66	67	96	84
		Santa Combinha	89	100	100	87	97

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: ■ >=85% ■ >=75% e <85% ■ >=50% e <75% ■ >=14% e <50% ■ >=0% e <14%

Tabela 14: Concentração média anual de ozono (O₃), base horária, por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Concentração média anual de O ₃ (µg/m³), base horária, por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	---	---	---	---	50
		Custóias - Matosinhos	---	---	50	53	48
		Leça do Balio-Matosinhos	34	32	44	43	52
		Mindelo - Vila do Conde	48	33	52	59	47
		VNTelha - Maia	47	38	53	55	58
	Urb. Fundo	Avintes	52	51	47	52	42
		Ermesinde - Valongo	---	70	66	61	70
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	51	49	53	50	52
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	---	---	57	61	56
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	38	34	40	39	36
		Paços de Ferreira	49	42	36	40	41
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	20	29	13	18	41
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	45	57	91	74	76
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	78	45	82	88	80
		Santa Combinha	67	69	68	63	60

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

O Decreto-Lei n.º 102/2010 estabelece para o ozono (O₃) um objetivo a longo prazo (OLP) de 120 µg/m³, correspondente ao máximo diário da média móvel de 8 horas, a atingir a longo prazo. Define ainda um valor-alvo, igualmente de 120 µg/m³, a não exceder mais do que 25 dias por ano, em média, num período de três anos.

Na Tabela 15 apresentam-se as excedências ao Objetivo de Longo Prazo (OLP) (120 µg/m³) e, na Tabela 16, a concentração de O₃ correspondente ao 26.º máximo diário da média móvel de 8h, por estação, no período de 2020 a 2024.

No período em análise observaram-se várias excedências ao OLP em diferentes estações e anos, verificando-se, assim, o não cumprimento deste objetivo indicativo em diversas situações.

Relativamente ao valor-alvo, na estação do Douro Norte verificaram-se mais de 25 ultrapassagens do valor máximo diário da média móvel de 8 horas na média do triénio 2022-2023-2024, configurando o não cumprimento do valor-alvo estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Tabela 15: Excedências ao Objetivo de Longo Prazo (OLP) (120 µg/m³), por estação, no período de 2020 a 2024.

			Excedências ao OLP (120 µg/m³), por ano.				
Aglomeraco/Zona	Tipo	Estaco	2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	---	---	---	---	1
		Custias - Matosinhos	0	0	0	2	0
		Leç do Balio-Matosinhos	3	0	4	0	1
		Mindelo - Vila do Conde	0	0	4	23	0
		VNTelha - Maia	3	0	8	3	3
	Urb. Fundo	Avintes	0	0	5	0	2
		Ermesinde - Valongo	0	4	10	9	22
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	5	0	2	0	0
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	0	0	10	9	2
	Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burges - Santo Tirso	2	0	4	4
Paçs de Ferreira			18	1	0	0	1
Suburb. Fundo		Frossos - Braga	0	0	0	0	3
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	8	14
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	28	0	47	45	37
		Santa Cominha	9	2	17	0	1

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%, sendo os valores apresentados a vermelho e a negrito indicativos de excedência do valor-limite.

Tabela 16: Concentração de ozono (O₃) (µg/m³), correspondente ao 26.º máximo diário da média móvel de 8h, por estação, no período de 2020 a 2024.

			Concentração de O ₃ (µg/m³), 26.º máximo diário (8h), por ano.				
Aglomeracoo/Zona	Tipo	Estacoo	2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	---	---	---	---	98
		Custoias - Matosinhos	0	0	91	96	93
		Leça do Balio-Matosinhos	64	63	93	91	100
		Mindelo - Vila do Conde	84	52	95	118	86
		VNTelha - Maia	91	68	106	101	105
	Urb. Fundo	Avintes	95	97	97	86	88
		Ermesinde - Valongo	0	101	104	108	119
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	104	85	98	90	95
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	0	0	105	112	102
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgoes - Santo Tirso	93	72	91	101	90
		Paços de Ferreira	116	87	81	85	83
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	51	61	41	45	99
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	76	85	0	108	115
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	121	68	132	128	123
		Santa Cominha	107	105	112	96	97

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Relativamente aos limiares de informação de alerta o Decreto-Lei n.º 102/2010 estabelece para o ozono (O₃) os limiares de informação [180 µg/m³, 1 hora] e de alerta [240 µg/m³, 1 hora].

Na Tabela 17 e Tabela 18 são apresentadas, respetivamente, as excedências ao limiar de informação e ao limiar de alerta, por estação, no período de 2020 a 2024. No período em análise observaram-se várias excedências ao limiar de informação em diferentes estações e anos. Em relação ao limiar de alerta, registou-se apenas uma excedência, ocorrida na estação de Douro Norte, no ano de 2022.

Tabela 17: Excedências ao limiar de informação do ozono (O₃) [180 µg/m³], por estação, no período de 2020 a 2024.

			Excedências ao limiar de informação (180 µg/m³), por ano.				
Aglomeraco/Zona	Tipo	Estaco	2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	---	---	---	---	0
		Custias - Matosinhos	0	0	1	0	0
		Leça do Balio-Matosinhos	0	0	3	0	0
		Mindelo - Vila do Conde	0	0	3	4	0
		VNTelha - Maia	0	0	5	0	0
	Urb. Fundo	Avintes	0	0	4	0	0
		Ermesinde - Valongo	0	0	10	1	0
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	0	0	0
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	0	0	4	0	0
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burges - Santo Tirso	0	0	1	0	0
		Paços de Ferreira	5	2	0	0	0
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	0	0	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	1	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	6	0	9	11	3
		Santa Cominha	0	0	0	0	0

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Tabela 18: Excedências ao limiar de alerta do ozono (O₃) [240 µg/m³], por estação, no período de 2020 a 2024.

			Excedências ao limiar de alerta (240 µg/m³), por ano.				
Aglomeraco/Zona	Tipo	Estaco	2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	---	---	---	---	0
		Custias - Matosinhos	0	0	0	0	0
		Leça do Balio-Matosinhos	0	0	0	0	0
		Mindelo - Vila do Conde	0	0	0	0	0
		VNTelha - Maia	0	0	0	0	0
	Urb. Fundo	Avintes	0	0	0	0	0
		Ermesinde - Valongo	0	0	0	0	0
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	0	0	0
	Suburb. Industrial	Meco-Perafita	0	0	0	0	0
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burges - Santo Tirso	0	0	0	0	0
		Paços de Ferreira	0	0	0	0	0
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	0	0	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	0	0	1	0	0
		Santa Cominha	0	0	0	0	0

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Na Figura 24 é apresentada a tendência evolutiva das concentrações médias anuais de ozono (O_3), base horária, agregadas por aglomeração e zona.

O gráfico superior (a), que considera as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite uma análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando uma variabilidade interanual moderada entre zonas e aglomerações, compatível com a influência das condições meteorológicas e dos processos fotoquímicos que governam a formação do ozono troposférico.

O gráfico inferior (b), que integra exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$, apresenta um número reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de O_3 situam-se em níveis globalmente mais reduzidos nas aglomerações e relativamente mais elevados nas zonas.

A reduzida eficiência de recolha de dados ao longo do período em análise condiciona a avaliação quantitativa da evolução temporal do ozono à escala regional, devendo os resultados ser interpretados com cautela.

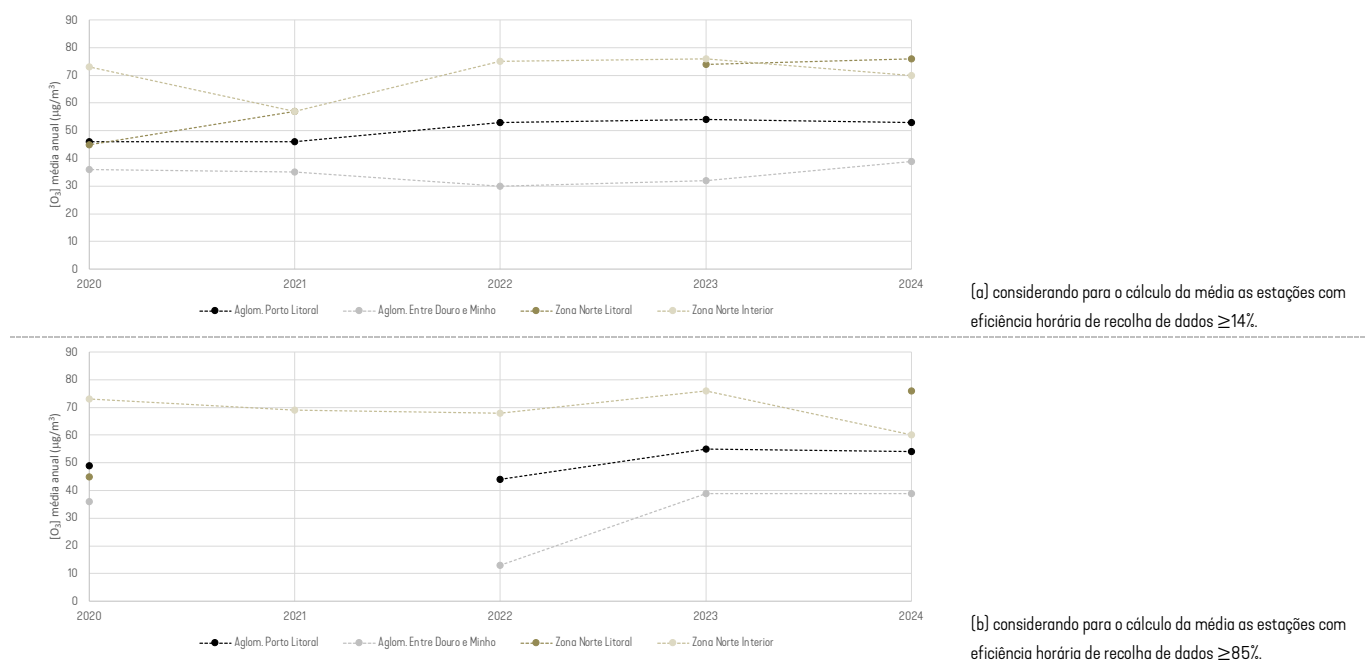


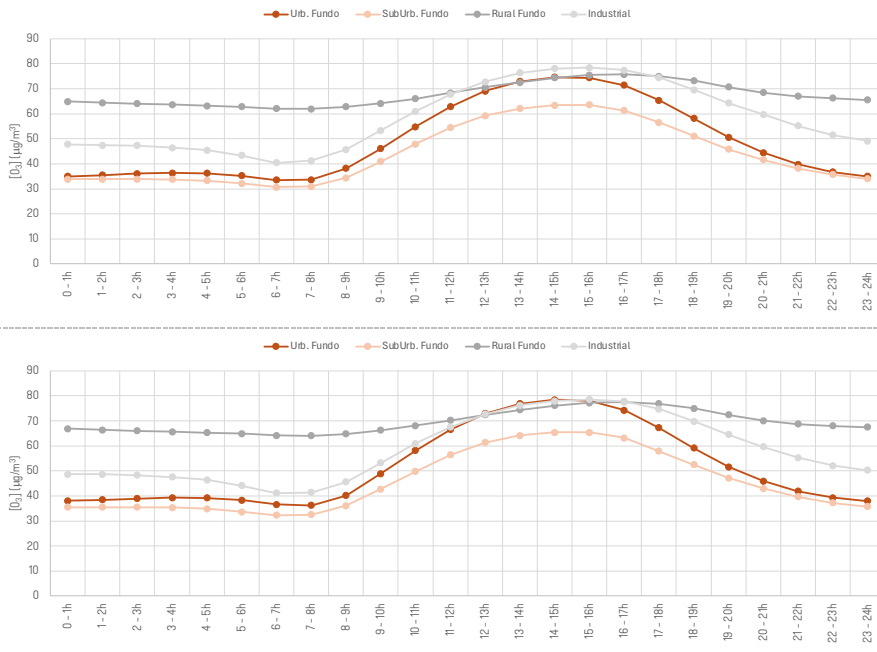
Figura 24: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, por aglomeração e zona, no período de 2020 a 2024.

Perfil horário

Por tipo de estação

Na Figura 25 é apresentado o perfil horário da concentração média anual de O_3 , por tipo de estação, no período de 2020 a 2024. A variação da concentração de O_3 apresenta um pico de concentração mais elevada durante a tarde, particularmente nas estações urbanas e suburbanas de fundo e nas industriais. Este pico de concentração é compatível com a produção de O_3 durante o período diurno e o seu consumo mais acentuado no período noturno.

Nas estações rurais de fundo, a variação entre o período diurno e noturno é menos pronunciada, refletindo a menor intensidade dos processos de consumo noturno associados à menor concentração de óxidos de azoto nestes ambientes.



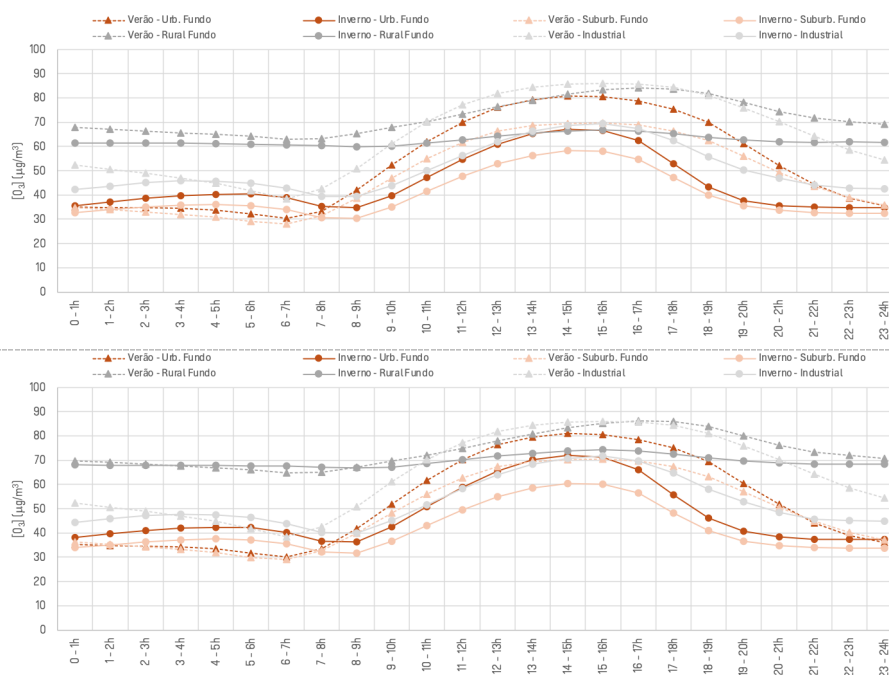
(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

(b) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 25: Perfil horário da concentração média anual de ozono (O_3), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024.

Comparação verão-inverno

Na Figura 26 é apresentado o perfil horário da concentração média de PM_{10} da RN, por estação do ano, no período de 2020 a 2024. As concentrações de O_3 são, de forma geral, mais elevadas no período de verão (abril a setembro), refletindo condições mais favoráveis à sua formação fotoquímica, associadas à maior intensidade da radiação solar e a temperaturas mais elevadas. No período de inverno (outubro a março), observam-se concentrações médias horárias mais reduzidas, compatíveis com uma menor taxa de produção fotoquímica do ozono.



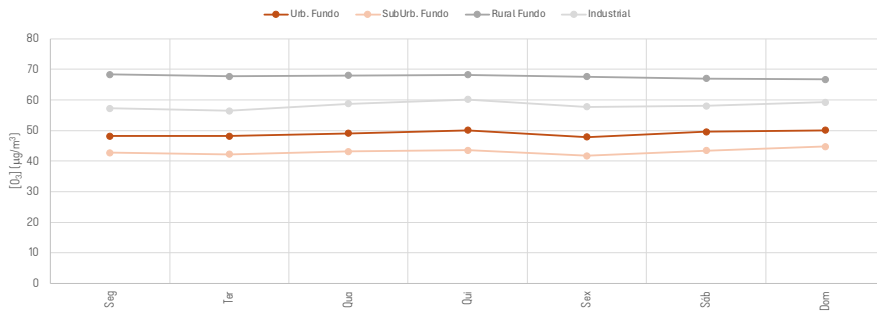
(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

(b) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

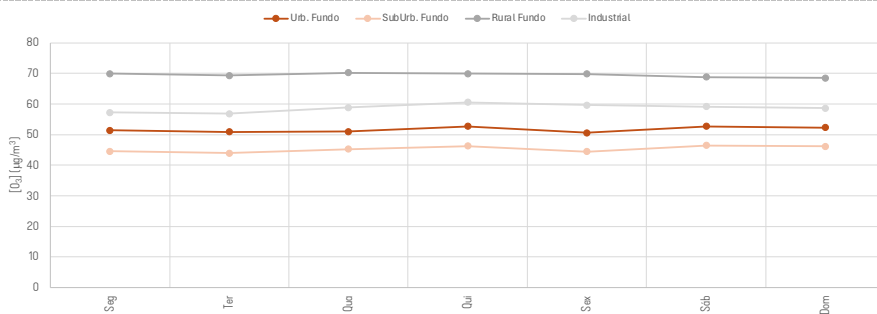
Figura 26: Perfil horário da concentração média de ozono (O_3), na Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2020 a 2024. Verão - intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; inverno - intervalo de 1 de outubro a 31 de março.

Perfil dia da semana

Na Figura 27 é apresentado o perfil por dia da semana da concentração média diária de O_3 , por tipo de estação, no período de 2020 a 2024. Não se observa um padrão de variação significativo ao longo dos dias da semana, o que é consistente com o carácter secundário do ozono troposférico, cuja formação depende sobretudo das condições meteorológicas e dos processos fotoquímicos, mais do que da variação semanal direta das emissões.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

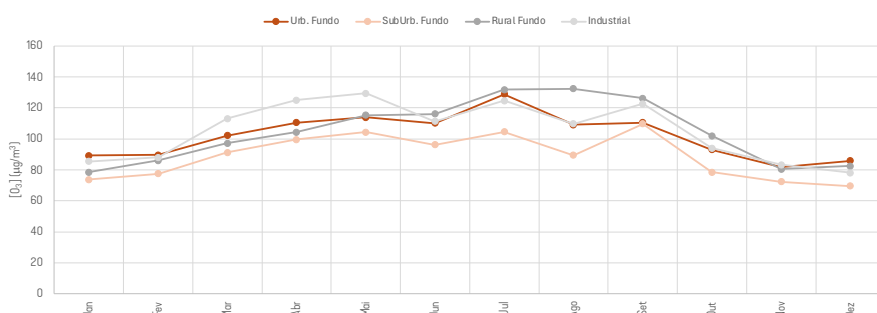


(b) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 27: Perfil por dia da semana da concentração média diária de ozono (O_3), por tipo de estação, no período de 2020 a 2024.

Perfil mensal

Na Figura 28 é apresentado o perfil do máximo mensal dos máximos diários da média móvel de 8 horas de ozono (O_3) da Região Norte, no período de 2020 a 2024. Verifica-se que os meses da primavera e do verão apresentam, em geral, valores máximos mais elevados do que os observados nos meses de inverno, comportamento compatível com a maior intensidade da radiação solar e com condições mais favoráveis à formação fotoquímica do ozono.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

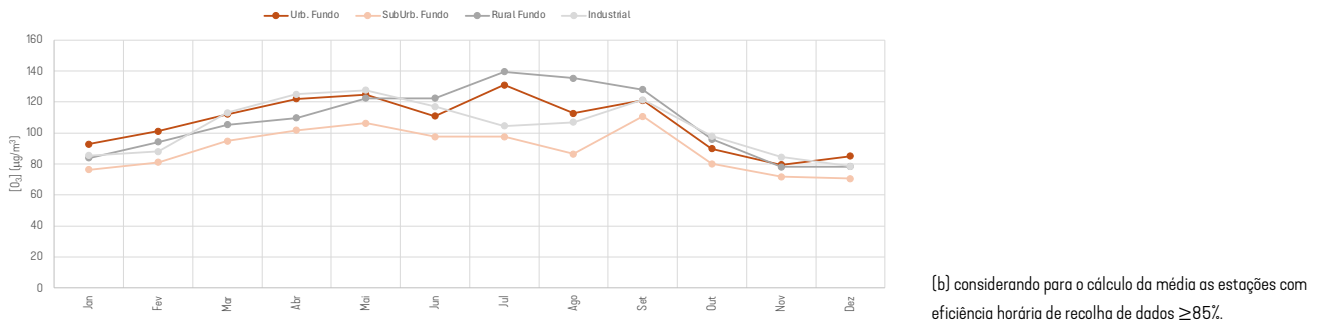


Figura 28: Perfil do máximo mensal dos máximos octo-horários de ozono (O_3), no período de 2020 a 2024.

Estações urbanas de fundo

Na Figura 29 é apresentada a variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), considerando as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, evidencia valores globalmente reduzidos ao longo do período em análise, com alguma variabilidade interanual.

O gráfico inferior (b), que integra exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$ e é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, apresenta um número reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de O_3 situam-se em níveis globalmente reduzidos e relativamente estáveis, sendo a avaliação formal da conformidade legal baseada exclusivamente nos indicadores definidos para o valor máximo diário da média móvel de 8 horas.

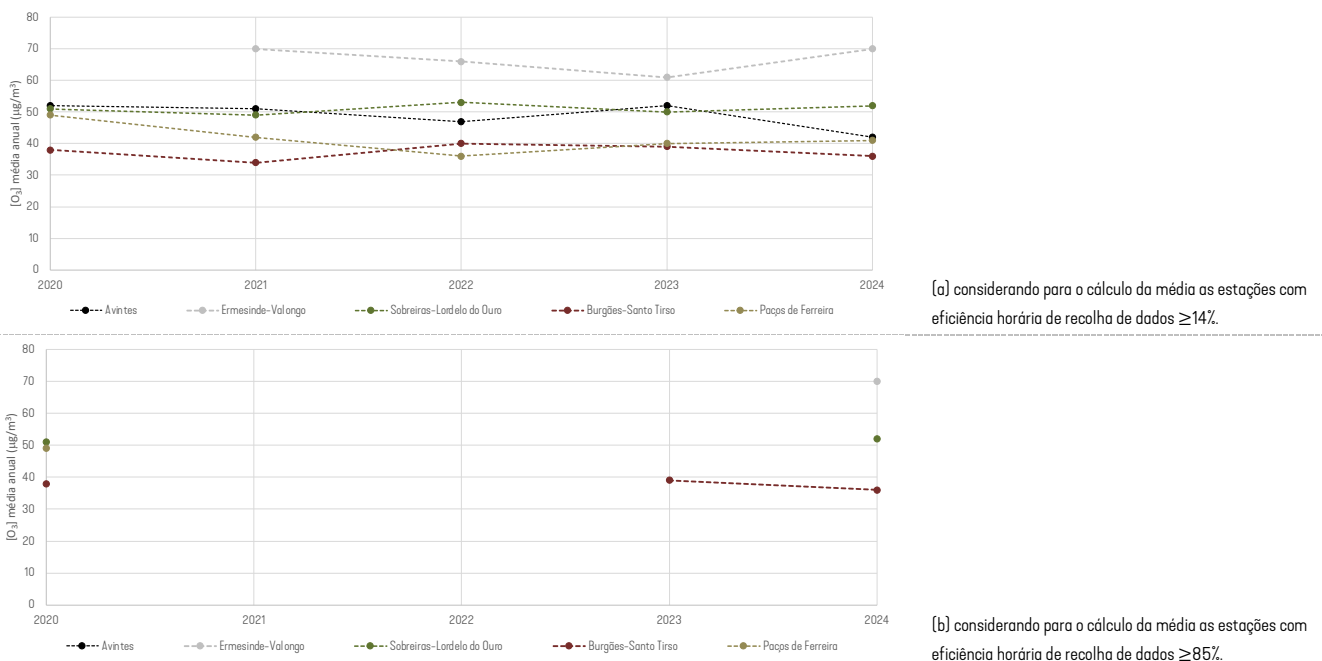


Figura 29: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações urbanas de fundo nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

Estações suburbanas de fundo

Na Figura 30 é apresentada a variação da concentração média anual de O_3 , base horária, nas estações suburbanas de fundo nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), considerando as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, evidencia valores globalmente reduzidos ao longo do período em análise, com alguma variabilidade interanual.

O gráfico inferior (b), que integra exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$, apresenta um número reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da avaliação. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de O_3 situam-se em níveis globalmente reduzidos, sendo a avaliação formal da conformidade legal baseada exclusivamente nos indicadores definidos para o valor máximo diário da média móvel de 8 horas.

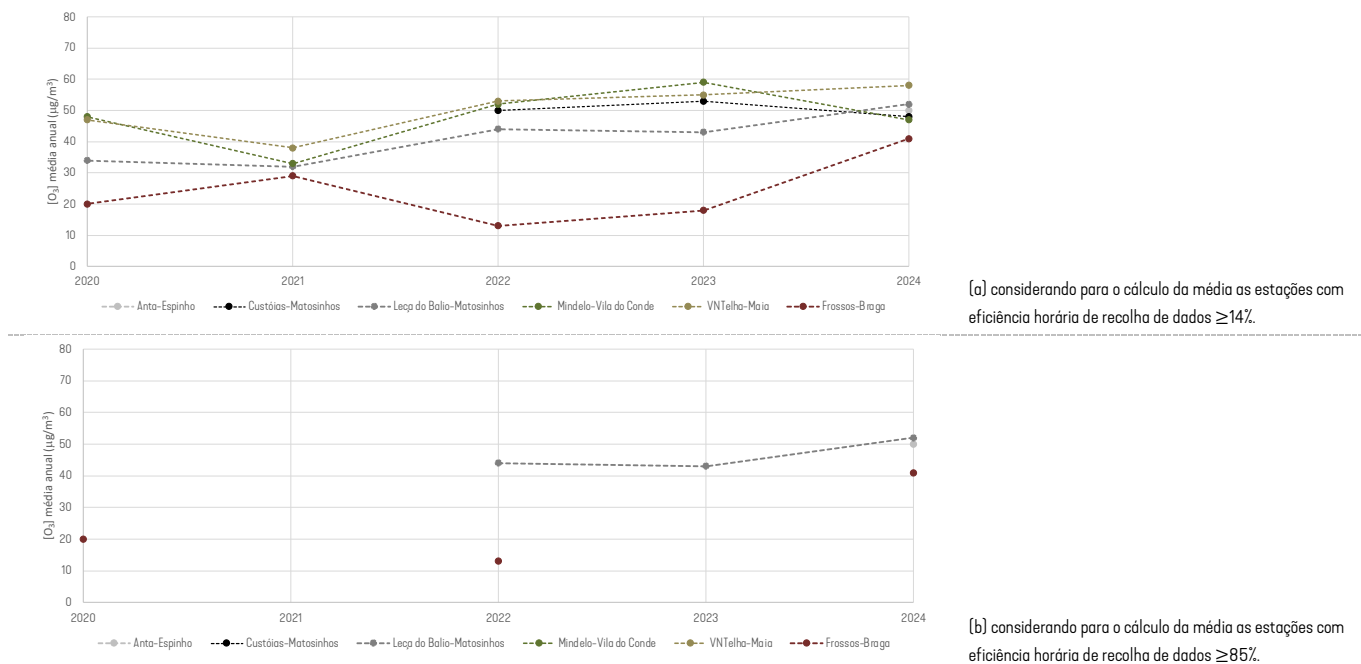


Figura 30: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações suburbanas de fundo nas aglomerações, no período de 2020 a 2024.

Estações rurais de fundo

Na Figura 31 é apresentada a variação da concentração média anual (base horária) de O_3 , nas estações rurais de fundo, no período de 2020 a 2024.

O gráfico superior (a), considerando as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, evidencia valores globalmente mais elevados na estação do Douro Norte, quando comparada com as restantes estações em análise.

O gráfico inferior (b), que integra exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$, apresenta igualmente um número muito reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da avaliação. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de O_3 situam-se em níveis globalmente reduzidos, sendo a avaliação formal da conformidade legal baseada exclusivamente nos indicadores definidos para o valor máximo diário da média móvel de 8 horas.

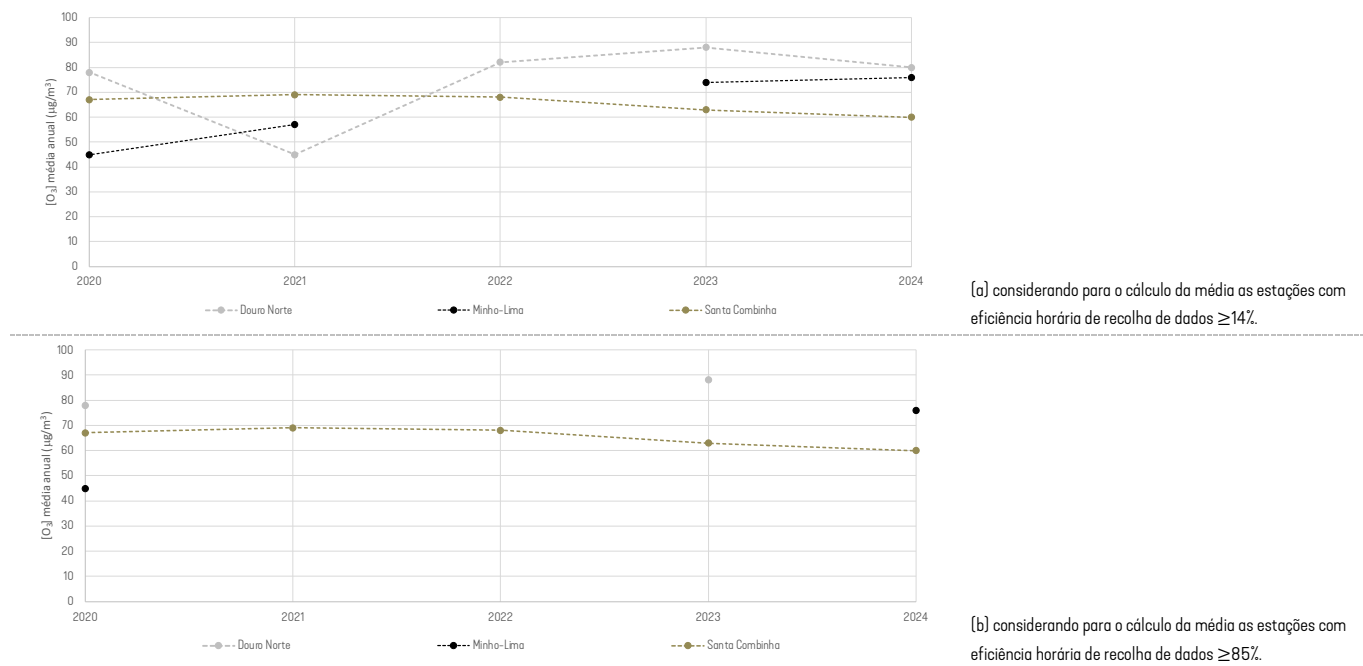


Figura 31: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações rurais de fundo, no período de 2020 a 2024.

Análise

A concentração de ozono (O_3) no ar ambiente depende essencialmente dos processos químicos de formação na atmosfera e dos mecanismos de remoção, nomeadamente por transformação química ou por deposição seca e húmida.

Em condições troposféricas, o O_3 é formado fotoquimicamente a partir da fotólise do dióxido de azoto (NO_2) e reage rapidamente com o monóxido de azoto (NO). Este ciclo de três reações, geralmente designado por ciclo fotoquímico básico, resulta num equilíbrio entre o NO , o NO_2 e o O_3 , sem formação ou perda líquida de O_3 . No entanto, na presença de compostos orgânicos voláteis (COV), as reações de degradação destes compostos conduzem à formação de radicais intermédios, nomeadamente o radical peróxido ($RO_2\cdot$) e o radical hidropéroxido ($HO_2\cdot$). Uma vez que a conversão de NO em NO_2 , resultante das reações com estes radicais, não consome O_3 , a fotólise subsequente do NO_2 representa uma fonte líquida de O_3 . Os NO_x e os COV assumem, assim, um papel determinante como principais precursores do ozono troposférico.

Os processos de formação e consumo de O_3 na troposfera são particularmente complexos, devido à grande diversidade de COV emitidos e às múltiplas espécies que resultam da oxidação dos COV primários e secundários. Os principais oxidantes dos COV na atmosfera são o radical hidroxilo ($OH\cdot$), o O_3 e o radical nitrato ($NO_3\cdot$), este último com maior relevância durante o período noturno. A principal fonte atmosférica de $OH\cdot$ resulta da reação de átomos de oxigénio eletronicamente excitados (O^1D), produzidos pela fotólise do O_3 , com o vapor de água.

A concentração de O_3 no ar ambiente é igualmente influenciada pelo transporte horizontal das massas de ar, à escala local, regional e transcontinental, condicionado pela ação de ciclones e anticiclones, pela topografia e pelas descontinuidades de superfície, em particular a interface terra/mar, bem como da mistura vertical dos poluentes, fortemente influenciada pela estabilidade da atmosfera, que é determinada pelo perfil vertical de temperatura. Salienta-se ainda a contribuição da intrusão de O_3 estratosférico, associada a movimentos de subsidência de massas de ar provenientes da estratosfera.

Nas áreas urbanas, os transportes rodoviários constituem importantes emissores de NO , o qual, ao reagir localmente com o O_3 , promove o seu consumo. Este mecanismo conduz, habitualmente, a concentrações mais reduzidas de O_3 nas áreas urbanas, quando comparadas com as áreas rurais. As áreas localizadas a sotavento das zonas urbanas são frequentemente afetadas pelo O_3 regional, que se vai

formando à medida que as massas de ar, ricas em substâncias precursoras (NO_x e COV), se deslocam e reagem fotoquimicamente, dando origem à formação de ozono.

Assim, a variação da concentração de O_3 apresenta um perfil horário característico, com um pico durante o período da tarde, e uma variação sazonal bem definida, com concentrações mais elevadas na primavera e no verão.

Nas estações da RMQAR-N, o perfil horário apresenta este comportamento típico, com um pico de concentração de O_3 mais elevado durante a tarde nas estações urbanas e suburbanas de fundo, bem como nas estações industriais. Nas estações rurais de fundo, a variação entre o período diurno e noturno é menos evidente, uma vez que os processos de consumo noturno são menos eficazes.

Verifica-se, igualmente, que nas estações da RMQAR-N os meses da primavera e do verão apresentam máximos diários da média móvel de 8 horas superiores aos observados nos meses de inverno.

Relativamente ao enquadramento regulamentar, o Decreto-Lei n.º 102/2010 estabelece para o O_3 um objetivo a longo prazo (OLP) de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondente ao máximo diário da média móvel de 8 horas, a atingir a longo prazo. Define ainda um valor-alvo, igualmente de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a não exceder mais do que 25 dias por ano, em média, num período de três anos. Estão também definidos os limiares de informação ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 hora) e de alerta ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 hora).

Nas estações da RMQAR-N observaram-se excedências ao máximo diário da média móvel de 8 horas em várias estações e anos, verificando-se, assim, situações de não atingimento deste objetivo.

Na estação de Douro Norte verificaram-se mais de 25 ultrapassagens do máximo diário da média móvel de 8 horas na média do triénio 2022–2023–2024, tendo sido, assim, ultrapassado o valor-alvo definido no Decreto-Lei n.º 102/2010.

No período em análise observaram-se várias excedências ao limiar de informação e apenas uma excedência ao limiar de alerta, registada na estação de Douro Norte, no ano de 2022.

Salienta-se, contudo, que a eficiência de recolha de dados foi globalmente reduzida ao longo do período em análise, particularmente nos anos de 2020 e 2021, o que limita significativamente a robustez estatística da avaliação e exige uma interpretação cautelosa dos resultados.

PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO (PM_{2,5})

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa o valor limite das concentrações de partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm (PM_{2,5}) no ar ambiente para proteção da saúde humana (Tabela 19).

Tabela 19: Valor-limite para a proteção da saúde humana relativo às partículas em suspensão (PM_{2,5}) no ar ambiente, estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor	Observações
Valor limite anual	Ano civil	25 µg/m³	Média anual

Nota: O valor-limite aplica-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com o método de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Figura 32 é apresentada a eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão (PM_{2,5}) na RMQAR-N, no período de 2020 a 2024. Verifica-se que a rede apresentou, uma eficiência reduzida na recolha de dados deste poluente, com particular destaque para os anos de 2020 e 2021, fortemente condicionados pelas restrições operacionais associadas à pandemia de COVID-19.

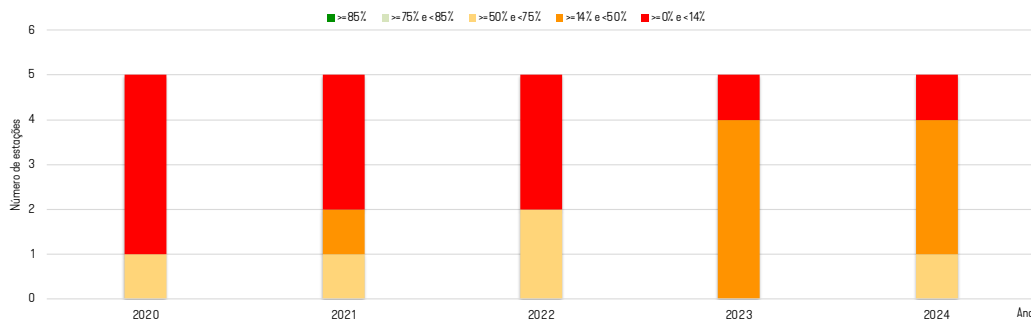


Figura 32: Eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão (PM_{2,5}) na RMQAR-N, em percentagem, no período de 2020 a 2024.

Na Tabela 20 é apresentada a eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão (PM_{2,5}) por estação, no período de 2020 a 2024. Para várias destas estações observa-se uma eficiência reduzida em diversos anos o que limita uma análise robusta das tendências evolutivas das concentrações de PM_{2,5} nessas estações.

Na Tabela 21 e Figura 33 é apresentada a concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{2,5}) e, por estação, no período de 2020 a 2024.

Em nenhum ano e estação se verificou uma eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 85%, em conformidade com os critérios de representatividade temporal definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Nos anos com uma eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 14%, as concentrações médias anuais de PM_{2,5} são inferiores ao valor-limite anual de 25 µg/m³.

Tabela 20: Eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão ($PM_{2,5}$), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.

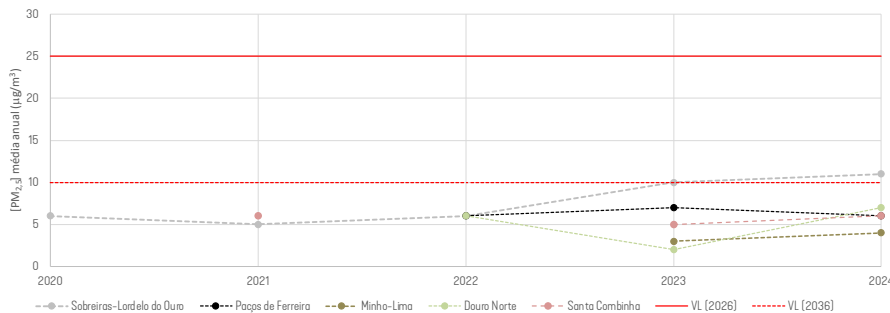
Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Eficiência diária na recolha de dados de $PM_{2,5}$ (%), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Urb. fundo	Sobreiras - Lordelo do Ouro	56	53	64	22	59
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. fundo	Paços de Ferreira	0	0	51	57	62
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	15	33
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	9	0	56	45	24
		Santa Combinha	11	43	0	19	25

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: ■ $\geq 85\%$ ■ $\geq 75\%$ e $< 85\%$ ■ $\geq 50\%$ e $< 75\%$ ■ $\geq 14\%$ e $< 50\%$ ■ $\geq 0\%$ e $< 14\%$

Tabela 21: Concentração média anual de partículas em suspensão ($PM_{2,5}$), base diária, por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Concentração média anual de $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Aglom. Porto Litoral	Urb. fundo	Sobreiras - Lordelo do Ouro	6	5	6	10	11
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. fundo	Paços de Ferreira	---	---	6	7	6
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	---	---	---	3	4
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	---	---	6	2	7
		Santa Combinha	---	6	---	5	6

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores-limite definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.



Nota: Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$.

Figura 33: Variação da concentração média anual partículas em suspensão ($PM_{2,5}$), base diária, por estação, no período de 2020 a 2024.

BENZENO (C_6H_6)

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa o valor limite de Benzeno (C_6H_6) no ar ambiente para proteção da saúde humana Tabela 22.

Tabela 22: Valor-limite para a proteção da saúde humana relativo ao Benzeno (C_6H_6) no ar ambiente, estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor
Valor limite anual	Ano civil	5 $\mu g/m^3$

Nota: O valor-limite aplica-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com o método de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Tabela 23 é apresentada a eficiência diária na recolha de dados de Benzeno (C_6H_6) na estação Seara-Matosinhos, única estação da RMQAR-N que mediu benzeno, no período de 2020 a 2024. Observa-se uma eficiência reduzida em diversos anos o que limita uma análise robusta das tendências evolutivas das concentrações de Benzeno (C_6H_6).

Na Tabela 24 é apresentada a concentração média anual Benzeno (C_6H_6) na estação Seara-Matosinhos, no período de 2020 a 2024.

Em nenhum ano se verificou uma eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 85%, em conformidade com os critérios de representatividade temporal definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Nos anos com uma eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 14%, as concentrações médias anuais de Benzeno (C_6H_6) são inferiores ao valor-limite anual de $5 \mu g/m^3$.

Tabela 23: Eficiência diária na recolha de dados de Benzeno (C_6H_6), em percentagem, no período de 2020 a 2024.

Agglomeração/Zona	Tipo	Estação	Eficiência diária na recolha de dados de C_6H_6 (%), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Agglom. Porto Litoral	Urb. Industrial	Seara - Matosinhos	0	0	30	51	68

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: ■ >=85% ■ >=75% e <85% ■ >=50% e <75% ■ >=14% e <50% ■ >=0% e <14%

Tabela 24: Concentração média anual de Benzeno (C_6H_6), no período de 2020 a 2024.

Agglomeração/Zona	Tipo	Estação	Concentração média anual de C_6H_6 ($\mu g/m^3$), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Agglom. Porto Litoral	Urb. Industrial	Seara-Matosinhos	---	---	0	0,26	0,3

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores-limite definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Os valores são apresentados, em termos de arredondamento, tal como estão disponibilizados na plataforma QUALAR.

DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO_2)

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa os valores-limite de dióxido de enxofre (SO_2) no ar ambiente para proteção da saúde humana Tabela 25.

Tabela 25: Valores-limite para a proteção da saúde humana relativo ao dióxido de enxofre (SO_2) no ar ambiente, estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor	Observações
Valor limite diário	Um dia	$125 \mu g/m^3$	A não exceder mais de 3 vezes por ano civil
Valor limite horário	Uma hora	$350 \mu g/m^3$	A não exceder mais de 24 vezes por ano civil

Nota: Os valores-limite aplicam-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com o método de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Tabela 26 é apresentada a eficiência diária na recolha de dados de dióxido de enxofre (SO_2) por estação, no período de 2020 a 2024. A eficiência de recolha de dados foi muito reduzida o que limita uma análise robusta das tendências evolutivas das concentrações de dióxido de enxofre (SO_2).

Na Tabela 27 e Tabela 28 são apresentados o 4.º valor máximo diário e o 25.º máximo horário de concentração (SO_2), respetivamente, por estação, no período de 2020 a 2024.

As estações Meco-Perafita e Douro Norte apenas efetuaram a monitorização de SO₂ no ano de 2020. Em nenhum ano e estação se verificou uma eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%, em conformidade com os critérios de representatividade temporal definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Nos anos com uma eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 14%, não se observaram valores próximos do valor-limite diário de 125 µg/m³ e valor limite horário de 350 µg/m³.

Tabela 26: Eficiência horária na recolha de dados de dióxido de enxofre (SO₂), em percentagem, por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Eficiência horária na recolha de dados de SO ₂ (%), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Agglom. Porto Litoral	Urb. Industrial	Seara - Matosinhos	49	0	0	2	0
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	53	---	---	---	---
Zona Norte Interior	Rural	Douro Norte	10	---	---	---	---

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: ■ ≥85% ■ ≥75% e <85% ■ ≥50% e <75% ■ ≥14% e <50% ■ ≥0% e <14%

Tabela 27: O 4.º valor máximo diário de concentração de dióxido de enxofre (SO₂), por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	4.º valor máximo diário de SO ₂ (µg/m ³), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Agglom. Porto Litoral	Urb. Industrial	Seara - Matosinhos	48	---	---	4	---
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	26	---	---	---	---
Zona Norte Interior	Rural	Douro Norte	10	---	---	---	---

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores-limite definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%.

Tabela 28: O 25.º valor máximo horário de concentração de dióxido de enxofre (SO₂), por estação, no período de 2020 a 2024.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	25.º valor máximo horário de SO ₂ (µg/m ³), por ano				
			2020	2021	2022	2023	2024
Agglom. Porto Litoral	Urb. Industrial	Seara - Matosinhos	63	---	---	9	---
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	34	---	---	---	---
Zona Norte Interior	Rural	Douro Norte	10	---	---	---	---

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores-limite definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%.

SÍNTESE

A análise do dióxido de azoto (NO_2) na Região Norte, no período de 2020 a 2024, evidencia padrões de variação temporal compatíveis com a influência do tráfego rodoviário, dos regimes de estabilidade atmosférica e da variabilidade sazonal associada à radiação solar. Nas estações urbanas de tráfego observaram-se situações pontuais de incumprimento do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto nas estações urbanas, suburbanas e rurais de fundo as concentrações de NO_2 se mantiveram, de forma geral, significativamente abaixo do critério legal. Os perfis temporais horários, semanais e sazonais confirmam o comportamento típico de um poluente de origem predominantemente rodoviária, com picos associados aos períodos de maior intensidade de tráfego e concentrações mais elevadas durante o inverno. Globalmente, a evolução observada aponta para uma tendência de redução das concentrações médias de NO_2 ao longo do período analisado. Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor-limite anual de proteção da saúde humana ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), no período de 2020 a 2024, observou-se incumprimento apenas na estação de Frei Bartolomeu Mártires – S. Vitor.

A análise das partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico inferior a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) evidencia padrões de variação temporal compatíveis com a influência de fontes predominantemente antropogénicas e de fatores meteorológicos, nomeadamente ao nível da estabilidade atmosférica, do transporte e da ressuspensão de partículas. As concentrações de PM_{10} apresentam, de forma geral, valores mais elevados no período de inverno, embora com uma sazonalidade menos pronunciada do que a observada para o NO_2 , não se identificando um padrão semanal marcado, em consonância com o carácter misto das fontes emissoras deste poluente. Nos anos estatisticamente válidos, verificou-se o cumprimento generalizado do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e do valor-limite diário de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (a não exceder mais de 35 vezes por ano civil), em todas as estações da RMQAR-N. Globalmente, a evolução observada sugere a manutenção das concentrações médias de PM_{10} em níveis compatíveis com os critérios legais de proteção da saúde humana.

A análise do ozono (O_3) na Região Norte evidencia padrões temporais característicos de um poluente secundário, com concentrações mais elevadas durante o período da tarde e nos meses da primavera e do verão, em resultado de condições mais favoráveis à sua formação fotoquímica. Verificam-se igualmente diferenças espaciais consistentes, com valores tendencialmente mais elevados nas zonas e nas estações rurais de fundo, quando comparados com as aglomerações urbanas. Ao nível do enquadramento regulamentar, o Objetivo de Longo Prazo (OLP) de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondente ao máximo diário da média móvel de 8 horas, não foi atingido de forma consistente ao longo do período em análise, observando-se excedências em diversas estações e anos. Relativamente ao valor-alvo, verificou-se o seu incumprimento na estação de Douro Norte, no triénio 2022–2023–2024, devido à ultrapassagem do número máximo admissível de 25 dias por ano, em média, com excedências ao referido indicador. No que respeita aos limiares de proteção da saúde, observaram-se várias excedências ao limiar de informação ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 hora) e apenas uma excedência ao limiar de alerta ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 hora), registada na estação de Douro Norte no ano de 2022, não se tendo observado a repetição deste tipo de episódio nos anos subsequentes.

A monitorização de partículas em suspensão ($\text{PM}_{2,5}$) caracterizou-se por uma eficiência global de recolha de dados reduzida, não tendo sido atingido, em nenhum ano e estação, o critério de representatividade temporal de 85% estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010. Esta limitação compromete a avaliação formal da conformidade legal e a análise robusta de tendências temporais de longo prazo. Ainda assim, nos anos e estações em que a eficiência diária de recolha de dados foi igual ou superior a 14%, os valores observados de concentração média anual de $\text{PM}_{2,5}$ foram sempre inferiores ao valor-limite anual de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, não se identificando assim situações de incumprimento do quadro legal aplicável. Os resultados disponíveis apontam para níveis globalmente reduzidos de $\text{PM}_{2,5}$ na região, devendo, contudo, esta interpretação ser considerada com cautela face às limitações de representatividade dos dados.

A monitorização de benzeno (C_6H_6) esteve limitada a uma única estação (Seara-Matosinhos) e caracterizou-se por eficiências de recolha de dados insuficientes para efeitos de avaliação formal da conformidade legal, não tendo sido atingido em nenhum ano o critério de representatividade temporal de 85% definido no Decreto-Lei n.º 102/2010. Nos anos em que a eficiência diária de recolha de dados foi igual ou superior a 14%, as concentrações médias anuais de benzeno observadas foram inferiores ao valor-limite anual de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,

não se evidenciando situações de risco para a saúde humana associadas a este poluente. Apesar dos valores registados indicarem níveis reduzidos de C_6H_6 , a análise das tendências temporais permanece condicionada pela limitada cobertura espacial e temporal da monitorização.

Relativamente ao dióxido de enxofre (SO_2), no período de 2021 a 2024, a monitorização esteve limitada a uma única estação (Seara-Matosinhos) apresentou eficiências horárias de recolha de dados muito reduzidas, não tendo sido atingido, em nenhum ano e estação, o critério de representatividade temporal de 85% definido no Decreto-Lei n.º 102/2010. Esta limitação impede a avaliação formal da conformidade legal e a análise consistente de tendências evolutivas. Nos anos em que a eficiência diária de recolha de dados foi igual ou superior a 14%, os valores observados do 4.º máximo diário e do 25.º máximo horário de SO_2 situaram-se substancialmente abaixo dos valores-limite diário ($125 \mu g/m^3$) e horário ($350 \mu g/m^3$), não se identificando situações de proximidade aos limiares legais. Os resultados disponíveis sugerem que o SO_2 não constitui um poluente crítico na região durante o período analisado, devendo esta conclusão ser interpretada à luz das limitações de representatividade dos dados.

Salienta-se, por fim, que a eficiência de recolha de dados foi globalmente reduzida ao longo do período considerado, em particular nos anos de 2020 e 2021, o que limita a robustez estatística da avaliação efetuada. Assim, embora os padrões temporais e espaciais observados sejam consistentes com o comportamento esperado dos principais poluentes atmosféricos analisados, os resultados devem ser interpretados com prudência, sobretudo no que respeita à avaliação quantitativa da evolução temporal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência para o Clima, I.P. (2025). Emissões de Poluentes Atmosféricos por Concelho 2023: Gases acidificantes e eutrofizantes, precursores de ozono, partículas, metais pesados, poluentes orgânicos persistentes e gases com efeito de estufa. Agência para o Clima, I.P.

CCDR-N; DCEA-FCT/UNL (2009). Reavaliação das Zonas e Aglomerações da Região Norte. CCDR Norte Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte e DCEA-FCT/UNL Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente – Faculdade de Ciências e Tecnologia/ Universidade Nova de Lisboa. Abril 2009.

CCDR-N; FCT/UNL (2021). Reavaliação das Zonas e Aglomerações de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte. Porto: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N) e NOVA School of Science and Technology – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Abril de 2021.

CCDR-N; Quaternaire Portugal (2024). Avaliação Ambiental Estratégica do Programa Regional de Ordenamento do Território do NORTE [PROT-NORTE], Relatório Ambiental Preliminar. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte. 4 outubro de 2024.

Instituto do Ambiente; DCEA-FCT/UNL (2002). Avaliação preliminar da qualidade do ar em Portugal – SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀ e Pb. Alfragide: Instituto do Ambiente, Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território. Julho de 2002.

