

Lagos de ar frio no setor norte de Coimbra: análise integrada da dinâmica topoclimática e implicações para o ordenamento do território

Cold-air pools in the northern sector of Coimbra: an integrated analysis of the topoclimatologic dynamics and implications for spatial planning

André Lucas ^{*1}, José Miguel Lameiras ^{**2} e António M. Rochette Cordeiro ^{***3}

¹ *Mestrando em Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território, Departamento de Geografia e Turismo, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, 3004-504 Coimbra, Portugal*

² *Faculty of Sciences, University of Porto, 4169-007 Porto, Portugal, BIOPOLIS/CIBIO-Research Centre in Biodiversity and Genetic Resources, 4485-661 Vairão, Portugal*

³ *Faculty of Arts and Humanities, University of Coimbra, 3004-504 Coimbra, Portugal, Center for Interdisciplinary Studies (CEIS20), 3000-186 Coimbra, Portugal*

Resumo

Este artigo apresenta uma análise integrada da dinâmica dos lagos de ar frio nos três vales do setor norte de Coimbra (Coselhas, Eiras e a depressão de Souselas/Fornos), com base em três estudos individuais previamente publicados. O fenómeno forma-se exclusivamente sob condições anticiclónicas, por arrefecimento radiativo e drenagem catabática das vertentes envolventes, desenvolvendo-se em três fases distintas: formação, intensificação e dissipação. A análise sazonal, realizada exclusivamente no vale de Eiras, confirmou o carácter primariamente invernal do fenómeno, ausente em condições de céu encoberto e durante o verão. A estrutura vertical foi caracterizada com recurso a levantamentos de VANT, tendo sido identificadas inversões térmicas bem definidas em todos os vales, com altitudes do topo que refletem as características morfológicas específicas de cada depressão. Os três vales apresentam perfis funcionais distintos, urbano consolidado, periurbano em transformação e rural-industrial, com implicações diferenciadas para o ordenamento do território. O estudo sublinha a necessidade de integrar a topoclimatologia nos instrumentos de gestão territorial e de implementar sistemas de monitorização da qualidade do ar nos fundos de vale.

Palavras-chave: Lagos de ar frio. Inversão térmica. Topoclimatologia. Clima mediterrânico. Ordenamento do território. Coimbra.

Abstract

This article presents an integrated analysis of the dynamics of cold-air pools in three valleys located in the northern sector of Coimbra (Coselhas, Eiras, and the Souselas/Fornos

Cadernos de
Geografia

doi: https://doi.org/10.14195/0871-1623_53_4

Recebido a:
8 de maio de 2026
Aprovado a:
7 de julho de 2026

*Email: andrefrancisco724@gmail.com

**Email: jmlameiras@fc.up.pt

***Email: rochettecordeiro@fl.uc.pt

depression), based on three previously published individual studies. The phenomenon forms exclusively under anticyclonic conditions, through radiative cooling and katabatic drainage from the surrounding slopes, and develops in three distinct phases: formation, intensification, and dissipation. Seasonal analysis, conducted exclusively in the Eiras valley, confirmed the primarily winter character of the phenomenon, which is absent under overcast conditions and during the summer. The vertical structure was characterized using UAV-based surveys, which identified well-defined thermal inversions in all valleys, with inversion top altitudes reflecting the specific morphological characteristics of each depression. The three valleys exhibit distinct functional profiles—consolidated urban, peri-urban in transition, and rural-industrial—with differentiated implications for spatial planning. The study highlights the need to integrate topoclimatology into territorial management instruments and to implement air quality monitoring systems in valley bottoms.

Keywords: Cold-air pools. Thermal inversion. Topoclimatology. Mediterranean climate. Spatial planning. Coimbra.

1. Introdução

A climatologia urbana tem demonstrado de forma consistente que os espaços urbanos e periurbanos não constituem sistemas climáticos homogêneos, mas antes mosaicos complexos de microclimas, resultantes da interação entre processos atmosféricos, morfologia do relevo, uso e ocupação do solo e estrutura edificada (Lemoine-Rodríguez et al., 2022; Masson et al., 2020; Oke, 2006; Qian et al., 2022; Stewart & Oke, 2012). Estudos mais recentes reforçam a existência de uma elevada variabilidade térmica intraurbana, evidenciando o papel determinante da morfologia urbana, da heterogeneidade do uso do solo e da estrutura funcional da cidade na organização dos padrões climáticos locais (Silva et al., 2024; Wang et al., 2025). A compreensão desta variabilidade climática assume crescente relevância no contexto do desenvolvimento urbano sustentável, entendido como um sistema que integra de forma equilibrada as dimensões ambiental, social e económica do território (Purvis et al., 2019), e que encontra expressão normativa nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, designadamente no ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis) e no ODS 3 (saúde e bem-estar) (United Nations, 2015). Embora a maioria dos estudos em climatologia urbana se tenha centrado no fenómeno das ilhas de calor urbanas (Oke et al., 2017), outros processos associados à camada limite estável, como a formação de lagos de ar frio (Cold Air Pools – CAPs), assumem particular relevância em territórios com forte condicionamento topográfico. A caracterização destes fenómenos permite identificar áreas de maior vulnerabilidade ambiental e populacional, com impacto direto na qualidade do ar e no conforto térmico, apoiando decisões de planeamento territorial alinhadas com os objetivos de sustentabilidade (Baker et al., 2011; Oke et al., 2017).

Os lagos de ar frio constituem um fenómeno típico de noites sob influência anticlónica, caracterizadas por forte estabilidade atmosférica, céu limpo e ventos fracos, durante as quais o ar mais frio e denso se acumula nos fundos de vale e em depressões topográficas (Bacer et al., 2024; Ganho, 1999; Lopes, 1995; Pastore et al., 2024). Esta acumulação origina uma inversão térmica nas camadas mais baixas da

atmosfera, isto é, uma situação em que a temperatura aumenta com a altitude em vez de diminuir, contrariando o gradiente térmico vertical normal. A camada de ar frio aprisionada junto ao solo, delimitada superiormente pelo topo da inversão, constitui o lago de ar frio (Bacer et al., 2024; Bodine et al., 2009; Ganho, 1999; Lopes, 1995; Pastore et al., 2024). A sua formação resulta, em geral, de um processo combinado de arrefecimento radiativo da superfície e de drenagem gravitacional de ar frio proveniente das vertentes adjacentes, os chamados fluxos catabáticos, embora a importância relativa destes mecanismos continue a ser objeto de debate na literatura científica (Bodine et al., 2009; Burns & Chemel, 2014, 2015; Vosper et al., 2014; Whiteman, 2000). A localização dos lagos de ar frio em áreas topograficamente deprimidas tem sido estreitamente associada à topografia que influencia os processos de drenagem de ar frio ao longo das encostas (Bodine et al., 2009; Oke et al., 2017; Yoshino, 1984), sendo a espessura variável destas acumulações determinada pela maior ou menor intensificação da drenagem e pela rugosidade do solo (Lopes, 1995; Yoshino, 1984). Trabalhos recentes sublinham que, em muitos casos, a simples existência de uma morfologia favorável à redução da turbulência e à proteção contra a ventilação regional pode ser determinante para a formação de lagos de ar frio, reforçando a ideia de que estes fenómenos devem ser entendidos como sistemas topoclimáticos fortemente dependentes da geometria do vale ou da bacia onde se desenvolvem (Clements et al., 2003; Rauchöcker et al., 2024; Vosper et al., 2013).

A persistência da inversão térmica atua como uma barreira à dispersão vertical de poluentes (Anquetin et al., 1999; Baker et al., 2011; Lareau et al., 2013; Largeron & Staquet, 2016) e favorece simultaneamente o desconforto bioclimático, a formação de geada, gelo e nevoeiro (Price et al., 2011; Yoshino, 1984), com particular impacto em zonas urbanizadas onde estas condições afetam diretamente as populações residentes e as atividades aí instaladas (Nidzgorska-Lencewicz & Czarnecka, 2020; Pinto et al., 2008; Yavuz, 2025).

No contexto do clima mediterrânico, os estudos sobre lagos de ar frio são ainda escassos e a sua aplicação ao planeamento do território permanece incipiente. Na Península Ibérica, destacam-se os trabalhos desenvolvidos na bacia urbana de Madrid (Rasilla et al., 2023) e em diferentes regiões de Portugal, desde contextos de montanha na Serra da Estrela (Mora, 2009) e contextos rurais vitícolas no Alto Douro (Sanderson et al., 2022), até contextos de média montanha litoral na Arrábida e vales periurbanos e rurais na região de Lisboa (Alcoforado et al., 1993; Lopes, 1995). Em Coimbra, os estudos iniciaram-se no vale de Coselhas quando este se encontrava ainda numa fase de transição urbana (Ganho, 1998; Marques et al., 2007), tendo os trabalhos mais recentes documentado o mesmo vale já como espaço urbano algo consolidado (Cordeiro et al., 2023), e alargado o âmbito de análise ao vale periurbano de Eiras (Cordeiro et al., 2026) e à depressão de Souselas/Fornos, de carácter mais rural e industrial (Cordeiro, 2025). Apesar de incidirem sobre contextos territoriais diferenciados em termos de forma do relevo, grau de urbanização e fontes potenciais de poluição, estes três estudos recorreram a metodologias comparáveis, não tendo sido ainda objeto de uma abordagem integrada que permita compreender de forma sistemática a dinâmica dos lagos de ar frio nos diferentes contextos morfológicos do setor norte do município de Coimbra. Esta ausência de síntese limita a identificação

de padrões topoclimáticos comuns e reduz o potencial de transferência dos resultados para o domínio do planeamento e da gestão ambiental.

O presente artigo propõe uma leitura integrada dos lagos de ar frio nos três vales do setor norte de Coimbra, evidenciando o seu papel enquanto sistemas topoclimáticos estruturados e contribuindo para o avanço do conhecimento em climatologia urbana. Pretende-se, em particular: a) analisar a formação e a evolução diurna e sazonal do fenómeno, considerando a influência da topografia, do campo de vento e da estrutura da inversão térmica; b) caracterizar os territórios afetados em termos de ocupação do solo e estrutura demográfica; e c) avaliar as suas implicações ao nível da qualidade do ar, do conforto térmico e do ordenamento do território. Ao articular diferentes contextos morfológicos e funcionais, o estudo demonstra que a variabilidade destes processos resulta da interação entre topografia, uso do solo e condições atmosféricas, reforçando a necessidade de integrar a dimensão topoclimática no planeamento territorial.

2. Enquadramento geográfico

Os vales de Coselhas, Eiras e a depressão de Souselas/Fornos inserem-se no setor nordeste do município de Coimbra, cidade de média dimensão do centro-litoral de Portugal com cerca de 100.000 habitantes (Figura 1A), cujo território é marcado por fortes contrastes morfoestruturais. Coimbra ocupa uma posição de transição entre a Orla Mesocenozóica Ocidental, onde se desenvolvem a planície aluvial do rio Mondego e a plataforma pliocénica de baixa altitude nos setores ocidental, norte e sul, e, a leste, o Maciço Hespérico, onde se destaca o Maciço Marginal de Coimbra, com altitudes superiores a 500 m e vertentes que frequentemente apresentam declives acima de 25 °C (Cunha et al., 1999; Rebelo, 1999). A transição entre estas duas grandes unidades geomorfológicas é abrupta e estruturalmente condicionada, refletindo um forte controlo tectónico que determina a presença de pequenos vales encaixados na margem direita do rio Mondego, desenvolvidos ao longo da vertente ocidental do Maciço Marginal (Figura 1B). A Figura 1C representa as bacias hidrográficas da Ribeira de Coselhas, da Ribeira de Eiras e da Ribeira de Fornos, correspondendo às três unidades territoriais em análise no presente estudo.

Climaticamente, a região situa-se a ocidente dos relevos que as massas de ar oceânicas encontram à medida que se deslocam para leste, conferindo uma forte influência mediterrânica e mantendo um intenso impacto marítimo (Daveau, 1985; Ferreira, 2005; Ganho, 1999; Marques et al., 2007). Os invernos são chuvosos, com uma precipitação média anual ligeiramente inferior a 1000 mm, e as massas de ar frio afetam ocasionalmente a região. Os verões, pelo contrário, são tipicamente secos e quentes. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região enquadra-se no tipo Csb, embora este seja localmente modificado a leste pelo Maciço Marginal de Coimbra, no setor central pelo rio Mondego, pela sua planície aluvial e pelas características da morfologia urbana.

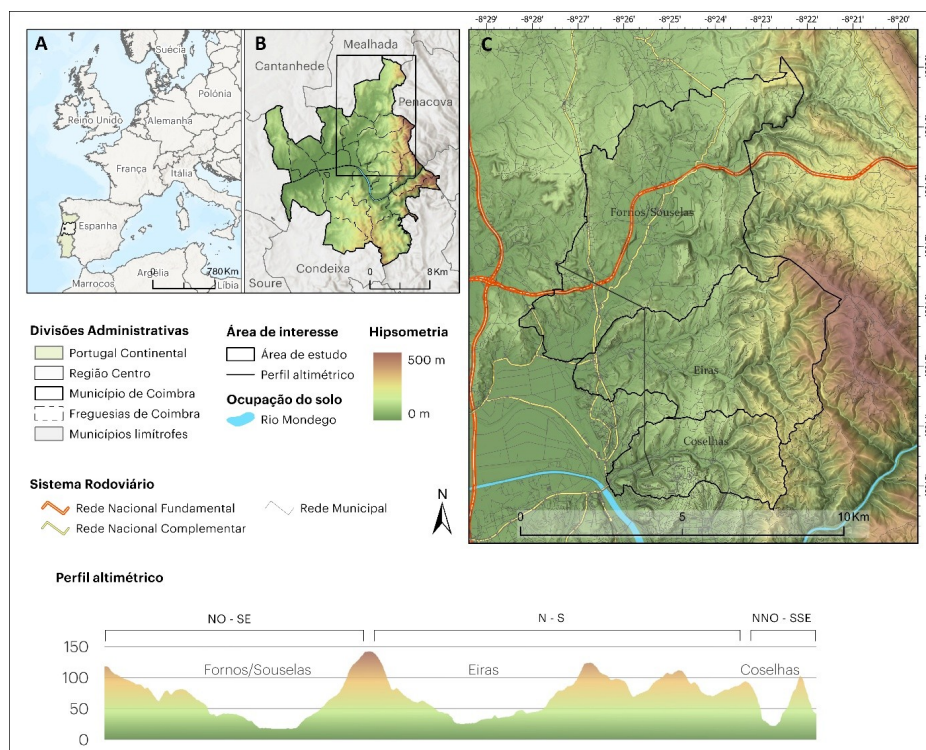


Figura 1. Enquadramento geográfico da área de estudo. (A) Localização de Portugal e de Coimbra na Europa e na Península Ibérica. (B) Município de Coimbra com indicação das três áreas de estudo. (C) Os três vales do setor norte de Coimbra – Coselhas, Eiras e Souselas/Fornos – e a sua envolvente morfológica.

A morfologia destes vales resulta de um forte condicionamento estrutural, sendo a falha Porto-Tomar o acidente tectónico dominante na organização do relevo regional. Com orientação geral NNW-SSE, esta falha define a transição entre o Maciço Hespérico e a Orla Mesoceno-zóica Ocidental e condiciona o traçado dos principais alinhamentos morfológicos do setor norte de Coimbra (Cunha et al., 1999; Rebelo, 1999; Tavares, 1999). É no quadro deste condicionamento estrutural que se desenvolvem os vales encaixados e as depressões tectónicas que caracterizam a área de estudo e que, como se verá, exercem um papel determinante nos padrões de drenagem e acumulação de ar frio documentados nos capítulos seguintes.

O vale de Coselhas desenvolve-se com orientação geral OSO-ENE, correspondendo a um vale estreito e estruturalmente condicionado, com altitudes do talvegue entre 12 e 100 m e cerca de 3 km de extensão. Em alguns setores apresenta pequenas aberturas de controlo tectónico e é ladeado por níveis planálticos situados a cerca de 100 m (as cumeadas), tanto na vertente norte como na sul, esta última densamente urbanizada desde meados do século XX, e onde a ilha de calor urbana se encontra significativamente desenvolvida, contrastando com o fundo de vale (Cordeiro et al., 2023; Marques et al., 2007).

O vale de Eiras configura uma depressão alongada com orientação aproximada OSO-ENE e cerca de 3 km de extensão. As altitudes do fundo de vale variam entre 25

e 50 m na secção central, enquanto o relevo envolvente se eleva de forma significativa: a norte, a crista de Logo de Deus atinge 100–150 m, e a leste o Maciço Marginal. A secção transversal do vale é assimétrica, com a vertente norte mais íngreme e a vertente sul mais suave, o que condiciona os padrões de drenagem de ar frio e os contrastes térmicos internos.

Por seu turno, a depressão de Souselas/Fornos apresenta orientação nordeste-sudoeste e configura uma bacia tectónica alongada, com fundo relativamente plano situado entre 20 e 50 m de altitude e cerca de 6 km de extensão longitudinal. Os limites da depressão são definidos por níveis estruturais bem individualizados: a oeste, os níveis da plataforma costeira (100–120 m); a norte, os níveis de Larçã e Pampilhosa do Botão (110–112 m); a sul, os níveis de Logo de Deus (125 m); e a leste, o Maciço Marginal de Coimbra.

A análise da ocupação do solo, com base na Carta de Ocupação do Solo (COS), evidencia perfis funcionais marcadamente distintos entre os três vales (Figura 2). O vale de Coselhas apresenta o grau de artificialização mais elevado, com cerca de 27% da área ocupada por uso residencial e 4,3% por equipamentos coletivos. No que respeita aos equipamentos sensíveis, representados na figura através de dados pontuais, este vale concentra seis unidades hospitalares – incluindo o principal polo hospitalar da região Centro (Hospital da Universidade de Coimbra e Hospital Pediátrico) – e 14 unidades escolares, evidenciando uma densidade de infraestruturas sensíveis significativamente superior à dos restantes vales. O vale de Eiras configura um território de transição periurbana, com 10,4% de área residencial e 2,6% de área industrial e logística. Embora o comércio e os serviços representem apenas cerca de 1% da ocupação total, este vale concentra um número significativo de superfícies comerciais de grande dimensão, coexistindo com equipamentos escolares localizados no fundo de vale. Por sua vez, a depressão de Fornos/Souselas insere-se num contexto mais ruralizado, apresentando apenas 9,1% de área residencial. A presença industrial assume aqui particular relevância, representando 3,1% da área total, destacando-se a instalação de uma unidade de produção de cimento e respetiva pedreira, classificada, nos últimos anos, como a sexta instalação industrial mais poluente de Portugal. Nesta depressão identificam-se igualmente alguns equipamentos escolares.

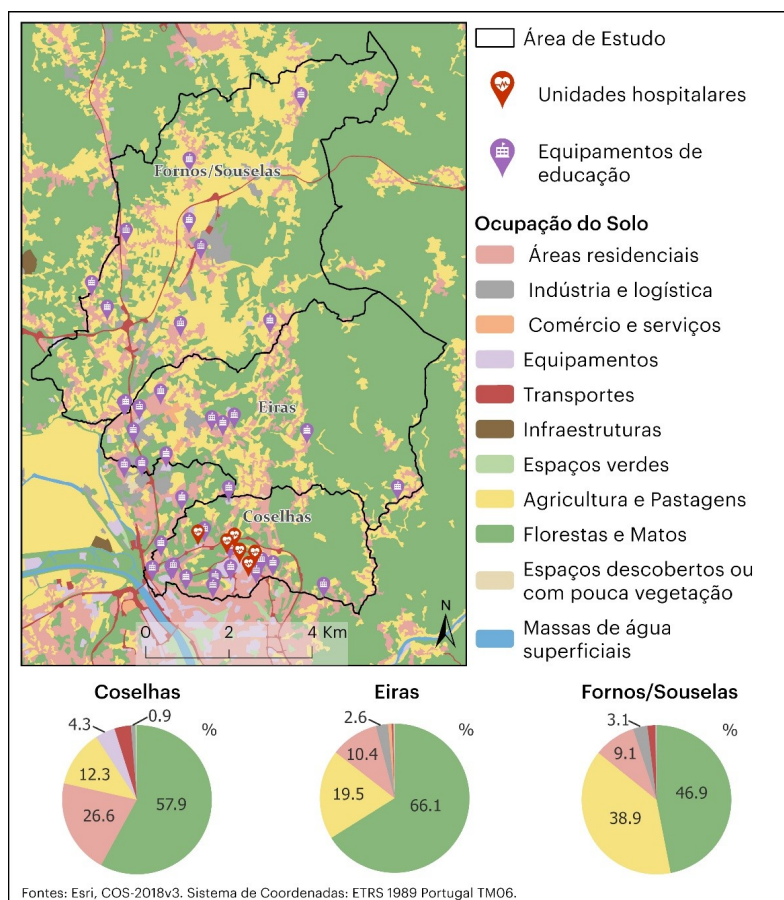


Figura 2. Ocupação do solo nos três vales do setor norte de Coimbra, com localização das unidades hospitalares e dos equipamentos de educação.

No que respeita à estrutura demográfica (Figura 3), a análise baseou-se nos dados dos Censos, cuja incompatibilidade espacial com os limites das bacias hidrográficas foi resolvida mediante interpolação areal dasimétrica (Comber & Zeng, 2019; Mennis & Hultgren, 2006). O vale de Coselhas é o que apresenta maior densidade, com cerca de 1000 hab/km², concentrada sobretudo no setor sul, em maior continuidade com o tecido urbano consolidado de Coimbra. O vale de Eiras regista uma densidade de aproximadamente 399 hab/km², com maior concentração no Bairro de Santa Apolónia, a noroeste, e na localidade de Eiras. A depressão de Fornos/Souselas é a área de estudo com menor densidade populacional, cerca de 190 hab/km², reflexo do seu carácter predominantemente rural, com a população distribuída de forma dispersa por diversas pequenas localidades.

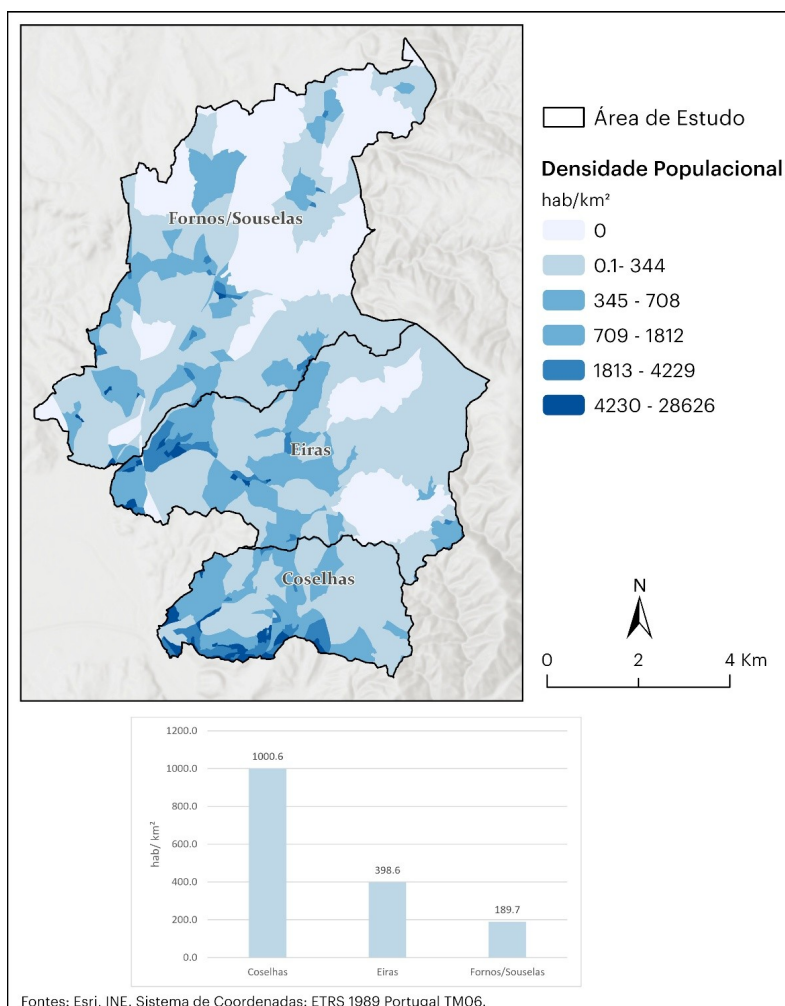


Figura 3. Densidade populacional por subsecção estatística nos três vales do setor norte de Coimbra, obtida por interpolação areal dasimétrica, com representação gráfica da estrutura demográfica por bacia hidrográfica.

Em síntese, os três vales constituem compartimentos topográficos distintos, mas geneticamente relacionados, cuja organização resulta de um forte controlo estrutural e da interação entre litologia, tectónica e dinâmica de vertente. Apesar da proximidade espacial e da génese comum associada à margem ocidental do Maciço Marginal de Coimbra, apresentam diferenças marcadas ao nível da morfologia, do grau de confinamento topográfico, da ocupação do solo e da estrutura demográfica. Estas particularidades refletem-se diretamente no funcionamento climático local, condicionando os padrões de drenagem, acumulação e estagnação de ar frio, bem como a intensidade e frequência das inversões térmicas. A diversidade de contextos de uso do solo, desde áreas densamente urbanizadas com infraestruturas sensíveis até territórios de carácter mais rural e industrial, introduz, simultaneamente, níveis diferenciados de vulnerabilidade e exposição aos fenómenos climáticos locais, constituindo

este enquadramento geográfico e morfofuncional um elemento fundamental para a compreensão integrada dos processos térmicos analisados nos capítulos seguintes.

3. Metodologia

O presente estudo assume-se como um artigo de síntese, integrando de forma comparativa os resultados de três estudos individuais previamente publicados sobre os vales de Coselhas, Souselas/Fornos e Eiras (Cordeiro, 2025; Cordeiro et al., 2023, 2026). Embora os três estudos partilhem um enquadramento conceptual comum, cada um deles foi desenvolvido com objetivos específicos, o que se refletiu nos períodos e horários de medição adotados (Figura 4). Nos vales de Coselhas e de Souselas/Fornos, o objetivo principal consistiu na caracterização do funcionamento diário dos lagos de ar frio ao longo do ciclo noturno–diurno, privilegiando a análise da sua formação, maturação e dissipação. Por sua vez, no vale de Eiras, o enfoque incidiu sobretudo na avaliação da sazonalidade do fenómeno, comparando situações atmosféricas contrastantes ao longo do ano.

A par das opções metodológicas relativas à recolha de dados, importa clarificar a delimitação espacial das áreas de estudo. Esta foi efetuada com base nas bacias hidrográficas das ribeiras que drenam cada um dos vales, extraídas a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) em ambiente SIG. A opção por esta unidade de análise justifica-se por razões de ordem morfológica e funcional: as bacias hidrográficas são delimitadas pelas linhas de fecho que separam as áreas de drenagem, correspondendo precisamente aos limites topográficos que condicionam os padrões de escoamento e acumulação de ar frio. Trata-se, portanto, de um critério objetivo, reproduzível e diretamente ancorado na morfologia do terreno, que serviu igualmente de unidade de referência para a caracterização da ocupação do solo e da estrutura demográfica dos três vales, permitindo uma análise territorialmente coerente e comparável. Uma vez que parte das bacias se estende para além dos limites administrativos do município de Coimbra, procedeu-se ao recorte de cada bacia pela área municipal, de forma a circunscrever a análise ao território de estudo e garantir a coerência com os três estudos anteriores nos quais este trabalho se baseia (Cordeiro, 2025; Cordeiro et al., 2023, 2026).

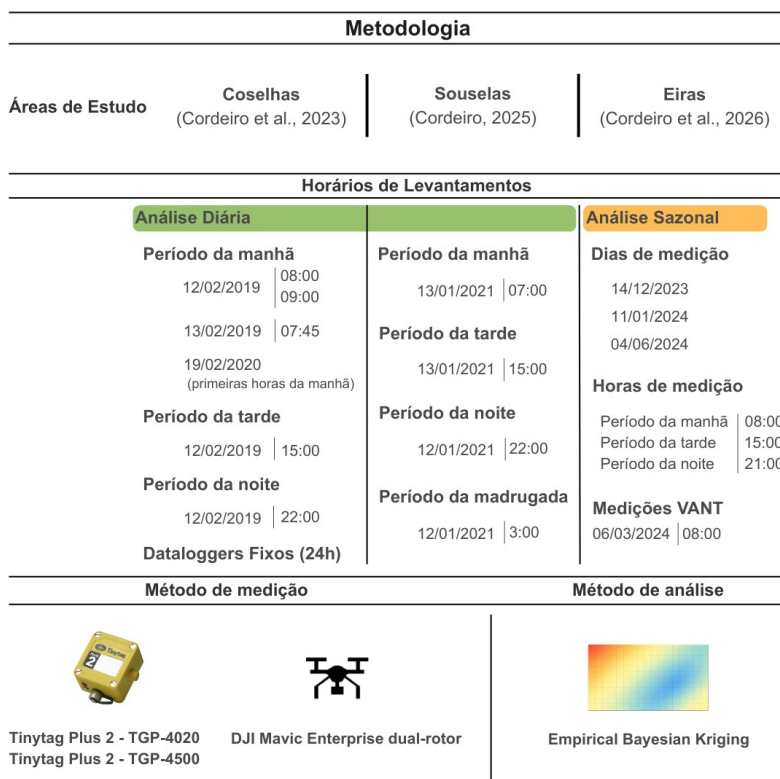


Figura 4. Esquema de síntese da metodologia adotada nos três estudos, com indicação dos períodos e horários de medição, instrumentação utilizada e procedimentos de análise espacial.

Apesar das diferenças de enfoque e de organização temporal dos três estudos, foi adotada uma metodologia de recolha de dados homogênea, assente em dois componentes principais: medições de temperatura à superfície através de percursos móveis e levantamentos verticais com recurso a veículos aéreos não tripulados (VANT). Em todos os casos, a temperatura do ar foi medida ao nível próximo da superfície, através de percursos móveis com recurso a registadores Tinytag Plus 2 (modelos TGP-4020 e TGP-4500), posicionados a aproximadamente 1,5 m acima do solo. Os percursos foram previamente definidos de modo a abranger os fundos de vale, as vertentes intermédias e os setores topograficamente mais elevados, assegurando a representatividade das diferentes unidades morfológicas. Em cada ponto de observação, o veículo permanecia imobilizado durante cerca de 60 a 90 segundos, assegurando a estabilização do sensor e a fiabilidade do registo térmico.

Em Coselhas, as campanhas de medição foram realizadas nos dias 12 e 13 de janeiro de 2019, com o objetivo de efetuar levantamentos distribuídos ao longo de todo o fundo do vale. As medições incluíram observações no período noturno (22:00), no período da manhã (07:45, 08:00 e 09:00) e durante a tarde (cerca das 15:00), permitindo caracterizar a evolução térmica ao longo do ciclo diário. Posteriormente, realizou-se um novo levantamento no dia 19 de fevereiro de 2020, centrado exclusivamente no setor do talvegue, com o objetivo de aprofundar a análise da estrutura

térmica no núcleo do lago de ar frio. Esta campanha decorreu nos momentos imediatamente anteriores à exposição solar direta das encostas do vale. Para além das medições móveis, foram igualmente instalados sensores fixos, possibilitando uma análise temporal contínua e mais abrangente das condições térmicas.

Na depressão de Souselas, foi adotada uma estratégia temporal mais detalhada, com medições realizadas no período noturno (entre as 22:00 e as 23:00), na madrugada (cerca das 03:00), no período da manhã (aproximadamente às 07:00) e durante a tarde (cerca das 15:00). Esta distribuição horária permitiu captar as diferentes fases de formação, intensificação e dissipação do lago de ar frio ao longo do ciclo diário. As campanhas decorreram nos dias 12 e 13 de janeiro de 2021, sob condições atmosféricas estáveis, favoráveis à acumulação de ar frio na depressão.

No vale de Eiras, embora o fenómeno em análise seja o mesmo, o objetivo do estudo é distinto, centrando-se na avaliação da sazonalidade do lago de ar frio. As medições foram realizadas exclusivamente em três momentos do dia – manhã (08:00), tarde (15:00) e noite (21:00) – em três dias com condições atmosféricas contrastantes, de modo a avaliar a resposta térmica do vale em diferentes contextos sazonais. A primeira campanha decorreu em 14 de dezembro de 2023, durante a estação fria, sob influência anticiclónica e céu limpo, condições favoráveis à formação e estabilização de lagos de ar frio. A segunda campanha, realizada em 11 de janeiro de 2024, correspondeu a uma situação de inverno atmosféricamente desfavorável, caracterizada por nebulosidade persistente e maior instabilidade. A terceira campanha teve lugar em 4 de junho de 2024, em período estival, sob condições estáveis, mas com forte aquecimento diurno, permitindo avaliar a expressão do fenómeno num contexto térmico distinto. Esta estratégia possibilitou analisar não apenas a ocorrência do lago de ar frio, mas também a sua atenuação ou ausência em diferentes enquadramentos atmosféricos e sazonais. As campanhas de levantamento com VANT foram realizadas na manhã de 6 de março de 2024, sob condições frias e céu limpo, semelhantes às registadas em 14 de dezembro. A Figura 5 sintetiza a localização dos pontos de medição à superfície e dos perfis VANT realizados nos três vales, permitindo uma leitura espacialmente integrada das campanhas de campo.

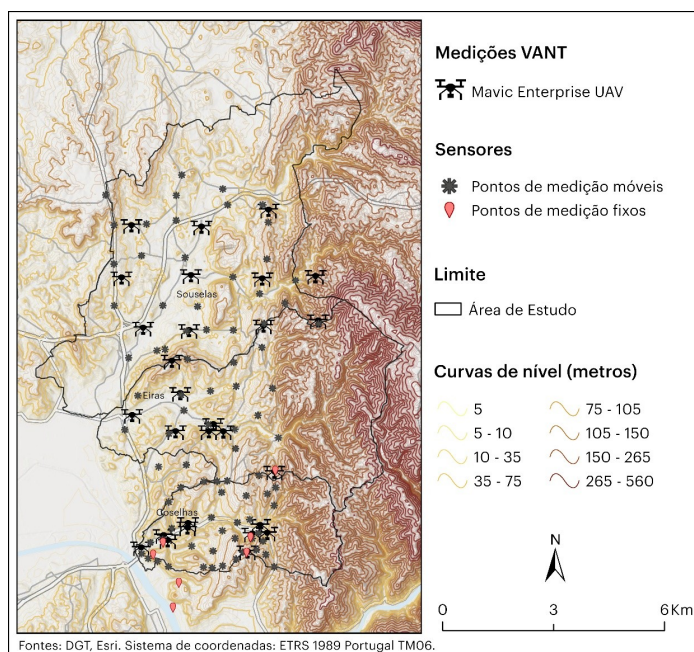


Figura 5. Localização dos pontos de medição à superfície e dos perfis VANT nos três vales do setor norte de Coimbra.

De modo a caracterizar a estrutura vertical da camada atmosférica inferior, foram realizados levantamentos com recurso a VANT, aos quais foram acoplados sensores de temperatura, permitindo a obtenção de perfis térmicos verticais de elevada resolução. Estes perfis possibilitaram a identificação da inversão térmica, a determinação da sua altitude e a estimativa da espessura da camada fria associada ao lago de ar frio. A metodologia associada ao uso do VANT e do sensor de temperatura (Tinytag Plus 2 – TGP-4020) constitui um elemento central desta abordagem, baseando-se em registos de temperatura e gerando perfis verticais contínuos durante a descida controlada do sensor a uma velocidade aproximada de 1 m/s. O sensor foi posicionado a cerca de 10 m abaixo da aeronave, de modo a minimizar a interferência aerodinâmica induzida pelos rotores. A ascensão foi realizada a uma distância superior a 10 m do ponto de descida, com uma permanência de aproximadamente dois minutos à altitude máxima, assegurando a estabilização térmica do sensor antes do início do perfil descendente. Os sensores apresentam uma resolução de 0,02 °C e uma taxa de resposta térmica de $\pm 0,01$ °C/°C, evidenciando elevada sensibilidade às variações térmicas e garantindo consistência metrológica nos perfis verticais obtidos. Adicionalmente, foi possível estimar a intensidade e direção do vento com base nos parâmetros de voo do VANT, através da análise do ângulo e da velocidade da aeronave em diferentes níveis altimétricos, utilizando o algoritmo de vento – Wind Algorithm v2.2 – AIRDATA.

O tratamento e a análise dos dados seguiram procedimentos uniformes nos três estudos. Todos os registos de temperatura foram georreferenciados e integrados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A espacialização do campo

térmico à superfície foi realizada através do método Empirical Bayesian Kriging (EBK), implementado no ArcGIS Pro, um método de interpolação geoestatística que tem demonstrado robustez na interpolação de variáveis ambientais com distribuição espacial irregular (Gribov & Krivoruchko, 2020). A aplicação deste método permitiu gerar superfícies térmicas contínuas para os diferentes momentos de observação, identificar os núcleos de ar mais frio, quantificar os gradientes térmicos associados à morfologia do relevo e analisar a relação entre os fundos de vale e os setores topograficamente mais elevados.

4. Resultados comparativos: dinâmica dos lagos de ar frio nos três vales do setor norte de Coimbra

A análise integrada dos três sistemas topográficos evidencia a existência de padrões comuns na formação e evolução dos lagos de ar frio, simultaneamente modulados por diferenças morfológicas, funcionais e antrópicas que conferem a cada vale um comportamento topoclimático específico. Importa ressaltar que as campanhas foram realizadas em datas distintas, pelo que a comparação direta de valores absolutos de temperatura entre os três vales não é metodologicamente adequada; o que se compara são os padrões de funcionamento e as estruturas térmicas documentadas em cada contexto.

4.1. Formação dos lagos de ar frio e condições sinópticas

A formação dos lagos de ar frio foi observada nos três vales estudados, com intensidade e padrões de distribuição espacial dependentes da configuração topográfica e das condições meteorológicas locais. O fenómeno desenvolve-se preferencialmente sob situações anticiclónicas, caracterizadas pela presença de um sistema de alta pressão que favorece céu limpo, ventos sinópticos fracos e ausência de nebulosidade significativa. Estas condições são geralmente interdependentes e propícias à formação do fenómeno: o céu limpo permite que a superfície perca calor por radiação de onda longa durante a noite, sem interferência de nuvens; os ventos fracos limitam a turbulência mecânica, favorecendo a estratificação térmica; e o arrefecimento noturno contribui para o desenvolvimento de gradientes térmicos suficientemente intensos para sustentar a inversão. A formação resulta da atuação conjunta de dois mecanismos principais: o arrefecimento radiativo *in situ* do fundo do vale e a drenagem gravitacional de ar frio proveniente das vertentes envolventes, em particular do Maciço Marginal de Coimbra. O ar arrefecido junto à superfície torna-se mais denso, desloca-se para as zonas topograficamente mais baixas e acumula-se, contribuindo para o estabelecimento da inversão térmica, que é progressivamente reforçada pelos escoamentos descendentes ao longo das encostas durante a noite (Lopes, 1995; Vosper et al., 2013).

Na depressão de Souselas/Fornos, a formação do lago de ar frio revelou-se particularmente intensa, favorecida pela ampla extensão da depressão tectónica e pela proteção conferida pelas encostas envolventes (Cordeiro, 2025). No vale de Coselhas, a configuração encaixada favoreceu igualmente uma acumulação significativa de ar

frio, com um lago persistente durante toda a madrugada (Cordeiro et al., 2023). No vale de Eiras, o lago de ar frio apresentou-se claramente identificável, ainda que com expressão espacial distinta face aos outros dois vales, em resultado da sua morfologia mais aberta (Cordeiro et al., 2026).

4.2. Dinâmica sazonal

A análise sazonal foi realizada exclusivamente no vale de Eiras¹, único caso em que o desenho metodológico incluiu campanhas em contextos climáticos contrastantes.

Os resultados demonstram que a intensidade, a extensão e a existência do fenómeno são significativamente superiores nos meses frios. O papel inibidor da nebulosidade foi confirmado experimentalmente: na campanha de 11 de janeiro de 2024, realizada durante uma situação de céu encoberto com precipitação fraca, não se registou qualquer acumulação de ar frio no fundo do vale durante a manhã. A cobertura de nuvens reduziu as perdas radiativas noturnas da superfície, impedindo o arrefecimento necessário à estratificação. Apenas após a dissipação parcial da nebulosidade e com a chegada da noite seguinte sob céu limpo surgiu uma inversão incipiente, com o fundo do vale a atingir cerca de 5 °C e a crista de Logo de Deus a registar valores em torno dos 8 °C (Cordeiro et al., 2026).

No verão, embora as noites claras e estáveis favorecessem alguma perda de calor radiativo, as temperaturas noturnas mais elevadas reduzem o potencial de arrefecimento junto à superfície, a que acresce a menor duração da noite e a radiação solar mais intensa logo após o nascer do sol. Nas campanhas estivais de 4 de junho de 2024, realizadas sob condições anticiclónicas com céu limpo, não se formou qualquer estrutura térmica estável associada ao lago de ar frio no vale de Eiras, confirmando o carácter primariamente invernal do fenómeno (Cordeiro et al., 2026).

4.3. Dinâmica diurna: formação, intensificação e dissipação

Nos três vales analisados, a evolução diurna dos lagos de ar frio segue um padrão estruturado em três fases: formação inicial no início da noite, intensificação durante a madrugada e início da dissipação após o nascer do sol (Figura 6).

A fase de formação inicia-se ao final da tarde e início da noite, com o arrefecimento radiativo da superfície a desencadear a estratificação térmica e a drenagem gravitacional de ar frio para os fundos de vale. A expressão térmica do lago manifesta-se simultaneamente através de dois padrões complementares: a acumulação de ar frio no fundo das depressões e a formação de cinturas térmicas nos níveis mais elevados que enquadram os vales, onde as temperaturas noturnas são mais elevadas, resultado direto do escoamento do ar frio e denso para as zonas mais baixas.

A fase de intensificação ocorre durante a madrugada, quando as temperaturas atingem os seus valores mínimos e o gradiente térmico vertical se acentua de forma mais pronunciada. No vale de Coselhas, as medições ao longo de percursos móveis

¹ Complementarmente às campanhas de inverno documentadas em Cordeiro et al. (2023), foi também realizada no vale de Coselhas uma observação de verão, que não constituiu objetivo inicial do estudo de base nem foi publicada no artigo correspondente.

e pelos sensores fixos revelaram diferenças entre o fundo do vale e as cumeadas que atingiram regularmente os 8°C nas horas mais frias, chegando a registrar-se uma diferença de quase 10°C entre os pontos de observação STO e LI 1, duas estações separadas por apenas 104 m de diferença altimétrica (Cordeiro et al., 2023). Na depressão de Souselas, os percursos móveis das campanhas de janeiro de 2021 evidenciaram uma amplitude térmica de cerca de $8,1^{\circ}\text{C}$ entre os pontos mais frios do interior da bacia e os níveis de Santa Luzia, registrando-se os mínimos mais expressivos nos setores onde os vales do Resmungão e do Botão desembocam na depressão (Cordeiro, 2025). No vale de Eiras, a diferença entre o fundo do vale e a crista de Logo de Deus rondou os 3°C no início da manhã de 14 de dezembro de 2023, com as temperaturas mais baixas concentradas nos setores mais abrigados do centro da depressão (Cordeiro et al., 2026). Os dados de Souselas permitem ilustrar com particular clareza a fase de maturação: os percursos do início da noite e da madrugada revelaram um padrão de temperatura notavelmente semelhante, com uma variação de apenas cerca de $0,2^{\circ}\text{C}$ entre os dois momentos no interior da bacia, o que indica que o lago atinge uma fase de relativa estabilidade em que os ganhos de ar frio por drenagem e arrefecimento radiativo compensam as perdas por mistura e radiação ascendente do próprio lago (Cordeiro, 2025).

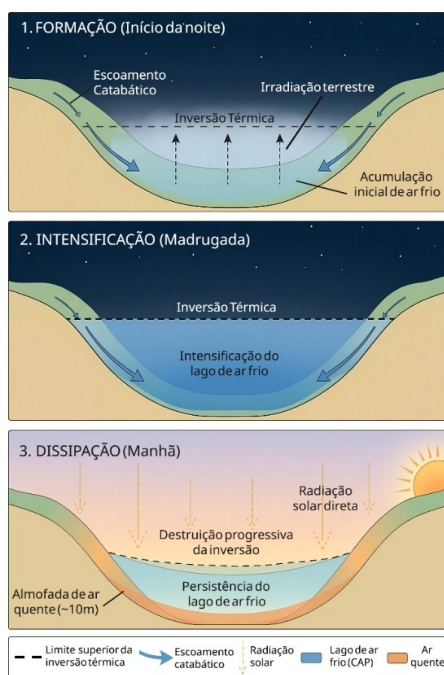


Figura 6. Representação esquemática das três fases do ciclo diurno de um lago de ar frio: (1) formação no início da noite, com acumulação inicial de ar frio no fundo de vale por arrefecimento radiativo e escoamento catabático das vertentes; (2) intensificação durante a madrugada, com aprofundamento do lago e reforço da camada de inversão térmica; (3) dissipação na manhã, com destruição progressiva da inversão pela radiação solar direta e persistência de uma almofada de ar quente junto às encostas ($\approx 10\text{ m}$). A linha tracejada assinala o limite superior da inversão térmica.

A fase de dissipação inicia-se após o nascer do sol, com o aquecimento radiativo das superfícies a promover a convecção, que destrói progressivamente a estratificação térmica a partir da base. Um aspeto notável observado nos três setores foi a formação de uma delgada almofada de ar mais quente, com cerca de 10 m de espessura, junto à superfície: o solo aquece rapidamente, criando localmente uma camada de ar mais quente junto à superfície, enquanto a massa de ar fria do lago persiste por cima desta, com espessura reduzida, mas ainda mensurável (Cordeiro et al., 2023).

4.4. Estrutura vertical e camada de inversão

A camada de inversão térmica revelou-se um elemento fundamental na formação e manutenção dos lagos de ar frio nos três vales estudados, atuando como uma barreira que isola a massa de ar frio junto ao solo e impede a sua mistura com as camadas superiores mais quentes. A Figura 7 ilustra a estrutura vertical típica de um perfil de temperatura em contexto de lago de ar frio, tal como obtido através dos levantamentos com VANT.

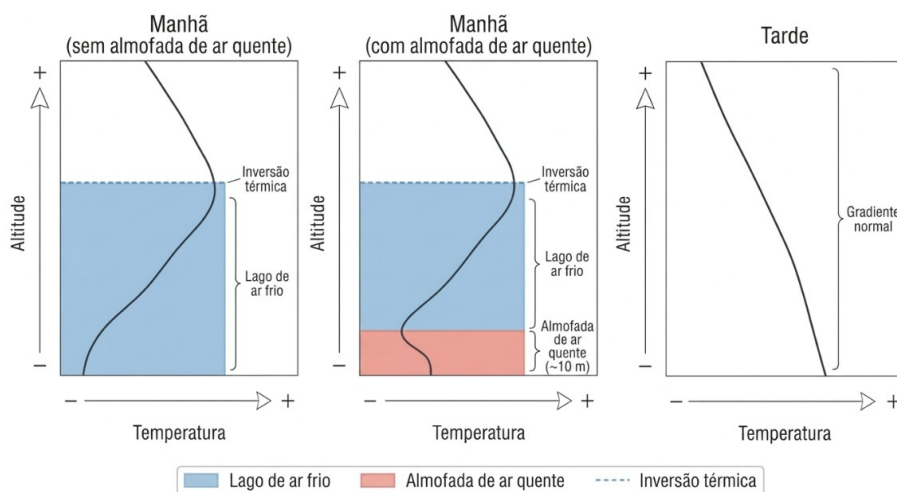


Figura 7. Esquema ilustrativo da estrutura vertical de temperatura em contexto de lago de ar frio, com representação da inversão térmica, da massa de ar frio acumulada no fundo de vale e da almofada de ar quente junto às encostas na fase de dissipação matinal.

Nos perfis verticais obtidos com recurso a VANT, identificou-se de forma consistente a presença de uma inversão térmica bem definida, com espessuras e altitudes variáveis consoante o vale. No vale de Coselhas, os perfis das manhãs de 12 e 13 de fevereiro de 2019 mostraram uma camada de inversão com cerca de 100 m de espessura no início da manhã, com o topo situado a cerca de 120 m de altitude (Cordeiro et al., 2023). Na depressão de Souselas, os 11 perfis obtidos simultaneamente no início da manhã de 13 de janeiro de 2021 revelaram uma inversão bem definida, com o topo a situar-se entre 100 e 125 m nas zonas centrais da depressão, subindo para 150–175 m e mesmo para 200–225 m nos níveis mais elevados já no contexto do Maciço Marginal, refletindo a contribuição adicional da drenagem catabática pro-

veniente dos relevos envolventes (Cordeiro, 2025). No vale de Eiras, os sete perfis obtidos no início da manhã de 6 de março de 2024 evidenciaram uma inversão com topo consistente a aproximadamente 275 m em quase todos os locais amostrados (Cordeiro et al., 2026).

Estes resultados evidenciam que a altura da inversão não depende exclusivamente da profundidade do vale, mas resulta da interação entre morfologia, grau de confinamento topográfico e intensidade da drenagem catabática proveniente dos relevos envolventes. A Figura 8 apresenta os perfis transversais de temperatura nos três vales, obtidos a partir dos levantamentos de VANT, permitindo caracterizar simultaneamente a estrutura vertical do lago de ar frio, a sua extensão horizontal e o limite superior da camada de inversão em cada contexto morfológico. Na depressão de Souselas/Fornos, o lago de ar frio estende-se ao longo de toda a depressão. No vale de Eiras, o lago prolonga-se preferencialmente para sul, onde o relevo da vertente é irregular e pouco elevado, ao passo que a vertente de Logo de Deus, a norte, apresenta os contrastes térmicos mais acentuados. No vale de Coselhas, o lago de ar frio surge visivelmente confinado, reflexo do seu carácter estreito e encaixado. Importa, contudo, reiterar que a comparação direta entre os três painéis deve ser feita com cautela, dado que as campanhas foram realizadas em datas e condições atmosféricas algo distintas (Cordeiro, 2025; Cordeiro et al., 2023, 2026).

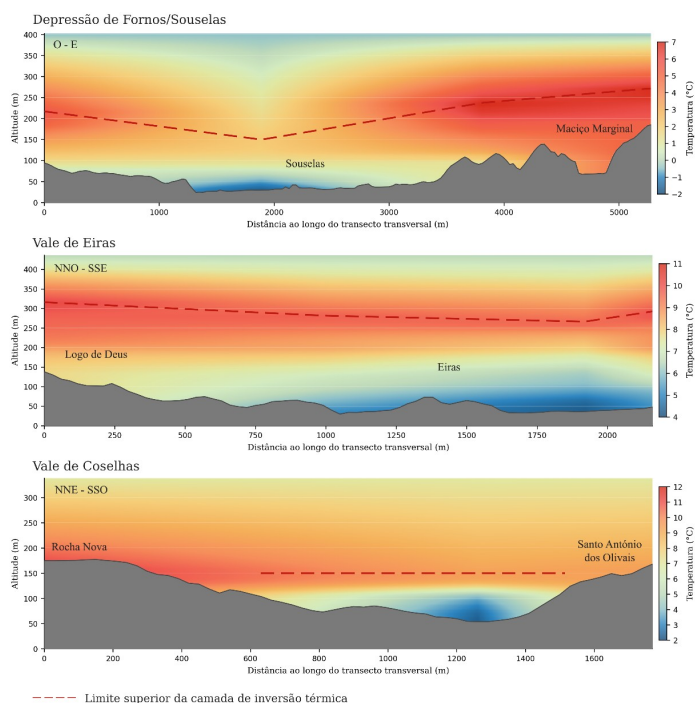


Figura 8. Distribuição da temperatura à superfície e em altitude nos três vales do setor norte de Coimbra, obtida a partir dos levantamentos de VANT (de cima para baixo: depressão de Fornos/Souselas, vale de Eiras e vale de Coselhas). A linha tracejada a vermelho assinala o limite superior da camada de inversão térmica.

4.5. Regimes de ventos

A análise dos perfis verticais obtidos com VANT permitiu caracterizar os regimes de vento nos três vales durante os períodos de formação dos lagos de ar frio, constituindo um dos elementos mais reveladores do desacoplamento entre a camada atmosférica aprisionada no interior do vale e a atmosfera livre acima da inversão.

Durante os períodos de formação e maturação dos lagos de ar frio, os ventos à superfície nos fundos dos vales apresentaram velocidades extremamente baixas, frequentemente inferiores a 2 km/h. No vale de Coselhas, as velocidades registadas abaixo das cumeadas (120–140 m) situaram-se entre 0 e 10 km/h, com direções algo erráticas nos setores centrais e uma ligeira componente de Sul nos setores mais a jusante, e de Este (0–4 km/h) nos setores a montante, denunciando a chegada do ar drenado pelas encostas (Cordeiro et al., 2023). Na depressão de Souselas, as velocidades no interior da bacia raramente excederam os 5–6 km/h, com os perfis centrais a registar valores entre 0 e 2 km/h; a direção predominante nos primeiros 30–60 m foi de Sul, com exceções de noroeste e nordeste em alguns perfis, enquanto acima dos 100 m os ventos passaram a ser consistentemente de Este, atingindo 13–15 km/h nos setores periféricos e ultrapassando os 20 km/h nas vertentes do Maciço Marginal (Cordeiro, 2025). No vale de Eiras, os ventos no núcleo central nunca ultrapassaram os 7 km/h desde a superfície até ao topo da inversão (275 m), com velocidades entre 0 e 2 km/h nos setores de menor altitude, e direção dominante de Este, consistente com a orientação do vale e com o regime sinóptico anticiclónico (Cordeiro et al., 2026).

Nos perfis verticais, verificou-se que acima da camada de inversão a velocidade do vento aumentava substancialmente, podendo atingir valores de 7 a 11 km/h. A inversão atua como barreira, impedindo a mistura vertical e a penetração desta ventilação para o interior dos lagos de ar frio. Esta ausência de movimento de ar no interior dos vales é simultaneamente uma causa, decorrente da proteção exercida pelo relevo circundante, e um forte indicador da presença do fenómeno: ventos mais fortes introduziriam turbulência mecânica que destruiria progressivamente a estratificação, enquanto a estagnação permite que o arrefecimento radiativo e a drenagem catabática continuem a reforçar o lago ao longo de toda a noite sem interferência (Cordeiro et al., 2026).

4.6. Síntese comparativa e papel da morfologia e do uso do solo

A análise comparativa demonstra que os lagos de ar frio no setor norte de Coimbra constituem um sistema topoclimático coerente, cuja variabilidade interna resulta da interação entre fatores geomorfológicos e antrópicos. Apesar das diferenças observadas, os três vales partilham um mecanismo comum de funcionamento, dominado pelo arrefecimento radiativo noturno e pela drenagem catabática. A expressão espacial deste mecanismo é, no entanto, fortemente condicionada pela geometria do vale e pelo grau de artificialização do território, o que se traduz em níveis diferenciados de intensidade térmica, persistência da inversão e vulnerabilidade ambiental.

O uso do solo introduz uma modulação adicional dos processos térmicos em cada vale. Em Coselhas, a forte artificialização e a presença de uma ilha de calor urbana

no sector das cumeadas dos cinturões térmicos condicionam o arrefecimento noturno e os gradientes térmicos locais. Em Eiras, o carácter periurbano em transformação traduz-se numa coexistência de superfícies impermeáveis e áreas vegetadas, com implicações na variabilidade térmica local. Em Souselas/Fornos, o contexto rural-industrial favorece a expressão do fenómeno com menor interferência urbana, mas com implicações relevantes ao nível da acumulação de poluentes atmosféricos durante os episódios de inversão.

Esta diversidade de comportamentos reforça a necessidade de uma abordagem territorial diferenciada na análise e gestão dos fenómenos topoclimáticos, particularmente em contextos urbanos e periurbanos onde os impactos sobre a população e as atividades económicas são mais significativos.

5. Discussão: implicações topoclimáticas, ambientais e territoriais dos lagos de ar frio em contexto urbano e periurbano

Os resultados obtidos parecem reforçar a ideia de que os lagos de ar frio no setor norte de Coimbra constituem um fenómeno topoclimático recorrente e estrutural, cuja expressão espacial resulta de uma forte dependência da morfologia do relevo, mas também da crescente interferência antrópica associada à urbanização. Esta dualidade, entre controlo geomorfológico e modulação humana, coloca estes sistemas no cruzamento entre climatologia física e geografia do território, exigindo uma abordagem integrada.

5.1. Lagos de ar frio como sistemas topoclimáticos estruturados

A consistência dos padrões observados nos três vales reforça a ideia de que os lagos de ar frio devem ser entendidos como sistemas topoclimáticos organizados, e não como fenómenos episódicos ou locais. Tal como evidenciado em estudos internacionais, a formação destes sistemas resulta da combinação entre arrefecimento radiativo da superfície e drenagem catabática, processos que operam de forma particularmente eficiente em contextos de forte estabilidade atmosférica e reduzida ventilação.

Os resultados mostram, contudo, que a simples presença de uma depressão topográfica não é condição suficiente para explicar a variabilidade observada em cada vale. A altura da superfície de inversão, a intensidade térmica e a persistência do fenómeno parecem depender de uma configuração mais complexa, que integra a geometria tridimensional do vale, a relação com o relevo envolvente e a capacidade de isolamento face à circulação atmosférica regional. Esta leitura está em linha com abordagens recentes que enfatizam o papel da topografia enquanto fator determinante na organização da camada limite estável, influenciando diretamente a formação, espessura e estabilidade dos lagos de ar frio (Clements et al., 2003; Rauchöcker et al., 2024; Vosper et al., 2013).

5.2. Variabilidade intraurbana e complexidade térmica

Um dos aspetos mais relevantes evidenciados pelo caso de estudo é a forte variabilidade térmica intraurbana, mesmo em áreas geograficamente próximas. A coe-

xistência de três sistemas com comportamentos distintos, urbano consolidado, periurbano e rural-industrial, demonstra que o território do município não constitui um sistema climático homogêneo, mas antes um mosaico de unidades topoclimáticas diferenciadas (Oke et al., 2017; Stewart & Oke, 2012).

Neste contexto, o vale de Coselhas assume particular interesse, ao evidenciar uma possível interação entre dois processos térmicos de sentido oposto: a acumulação de ar frio induzida pela topografia e o aquecimento associado à ilha de calor urbana, bem documentada neste vale em estudos anteriores (Ganho, 1998; Marques et al., 2007).

5.3. Estabilidade atmosférica e qualidade do ar

A persistência das inversões térmicas nos vales tem implicações diretas na dispersão de poluentes atmosféricos, constituindo um dos aspetos mais críticos do fenómeno em contexto urbano e periurbano. Nos sistemas mais confinados e menos ventilados a acumulação de ar frio traduz-se numa forte limitação da mistura vertical, favorecendo a concentração de poluentes nas camadas próximas da superfície. Este efeito é particularmente relevante em contextos onde coexistem fontes emissoras significativas, como unidades industriais ou tráfego rodoviário intenso, podendo gerar situações de degradação da qualidade do ar com impacto direto na saúde pública (Anquetin et al., 1999; Baker et al., 2011; Largeron & Staquet, 2016).

Em Souselas/Fornos, esta relação assume particular relevância: a camada de inversão térmica, situada entre 100 e 125 m de altitude, posiciona-se acima do ponto de emissão da unidade industrial de produção de cimento instalada na depressão. Esta configuração, associada às reduzidas velocidades do vento no interior da bacia, inferiores a 2 km/h na maior parte dos perfis analisados (Cordeiro, 2025), sugere condições desfavoráveis à dispersão vertical de poluentes durante os episódios de lago de ar frio, com potenciais implicações para a qualidade do ar e a saúde respiratória das populações residentes. Importa sublinhar que esta relação decorre de um raciocínio baseado na estrutura térmica vertical observada, e não de medições diretas de concentração de poluentes, que não foram efetuadas em nenhum dos três estudos de base.

Mesmo em contextos menos industrializados, como Eiras ou Coselhas, a retenção de poluentes associada às inversões térmicas pode afetar populações vulneráveis, nomeadamente em episódios de frio intenso, nevoeiro ou estagnação atmosférica prolongada. Estas conclusões estão em consonância com a literatura internacional, que identifica os lagos de ar frio como ambientes propícios à acumulação de poluentes e à formação de condições atmosféricas adversas, sobretudo em períodos de inverno anticiclónico (Lareau et al., 2013; Nidzgorska-Lencewicz & Czarnecka, 2020; Yavuz, 2025).

5.4. Lagos de ar frio, conforto térmico e risco ambiental

Para além das implicações na qualidade do ar, os lagos de ar frio influenciam diretamente o conforto bioclimático das populações, contribuindo para a intensificação de condições de frio extremo à escala local. Nos fundos de vale, onde o ar

frio se acumula, podem ocorrer diferenças térmicas significativas relativamente às áreas envolventes, expondo os residentes a níveis acrescidos de desconforto térmico (Yoshino, 1984). Este fenómeno assume particular relevância em contextos urbanos densamente habitados, como Coselhas, onde a presença de equipamentos sensíveis, hospitalares e escolares, aumenta a exposição de populações vulneráveis. A ocorrência frequente de nevoeiro, geada e gelo em fundos de vale reforça ainda os riscos associados à mobilidade e à segurança (Price et al., 2011).

5.5. Implicações para o planeamento e gestão territorial

Os resultados obtidos reforçam a necessidade de integrar a dimensão topoclimática nos instrumentos de planeamento territorial, particularmente em áreas urbanas e periurbanas sujeitas a forte pressão urbanística. A identificação de zonas propensas à acumulação de ar frio permite delimitar áreas de maior vulnerabilidade climática e ambiental, onde a localização de novos usos do solo deve ser cuidadosamente ponderada. Em particular, os fundos de vale sujeitos a inversões térmicas frequentes devem ser considerados áreas sensíveis para a instalação de equipamentos críticos, o desenvolvimento de novas áreas residenciais de elevada densidade e a localização de atividades emissoras de poluentes.

A preservação de corredores de ventilação e a manutenção de áreas verdes nos setores topograficamente mais favoráveis podem contribuir para melhorar a circulação do ar e reduzir a estagnação atmosférica, constituindo medidas de adaptação com relevância crescente no contexto das alterações climáticas (Oke et al., 2017). A escala local revela-se, neste contexto, fundamental: pequenas variações na morfologia ou no uso do solo podem traduzir-se em diferenças significativas no funcionamento climático, o que exige abordagens de planeamento mais finas e territorialmente diferenciadas.

5.6. Limitações e perspetivas de investigação futura

Apesar da consistência dos resultados, importa reconhecer algumas limitações associadas à natureza dos dados utilizados, nomeadamente a heterogeneidade dos períodos de medição e dos objetivos específicos dos estudos de base. Embora esta diversidade permita uma leitura mais abrangente do fenómeno, introduz também desafios ao nível da comparabilidade direta entre os diferentes sistemas, limitação que foi explicitamente reconhecida ao longo deste artigo. Futuras investigações poderão beneficiar da implementação de redes de monitorização contínua e integrada, que permitam acompanhar a evolução dos lagos de ar frio em diferentes condições atmosféricas e ao longo de ciclos sazonais completos. A integração de dados empíricos com modelação numérica de alta resolução constitui igualmente uma via promissora para aprofundar a compreensão dos mecanismos envolvidos, bem como para desenvolver uma análise sistemática de vulnerabilidade e risco que quantifique a exposição das populações residentes em função da frequência e intensidade dos episódios de lago de ar frio.

6. Conclusão

O presente estudo permitiu demonstrar que os lagos de ar frio no setor norte de Coimbra constituem um fenómeno topoclimático estruturante, recorrente sob condições anticiclónicas de inverno, e fortemente condicionado pela interação entre morfologia do relevo, dinâmica atmosférica e organização do território. A análise comparativa dos vales de Coselhas, Eiras e Souselas/Fornos evidenciou que, apesar da proximidade geográfica, estes sistemas apresentam comportamentos diferenciados, refletindo a influência combinada de fatores físicos e antrópicos. Os resultados confirmam que a formação dos lagos de ar frio parece assentar em mecanismos consistentes (arrefecimento radiativo e drenagem catabática), cuja expressão varia em função da geometria dos vales e do grau de confinamento topográfico. A altura da inversão térmica, a intensidade dos gradientes térmicos e a persistência do fenómeno revelam diferenças significativas entre os três contextos analisados, destacando-se o vale de Eiras pela maior espessura do lago de ar frio e a depressão de Souselas/-Fornos pela elevada intensidade térmica e forte capacidade de retenção de ar frio. A análise evidenciou igualmente que o uso do solo e o grau de artificialização introduzem uma modulação relevante destes processos. Em contextos urbanos consolidados, como Coselhas, a presença de uma ilha de calor urbana introduz uma complexidade adicional nos padrões térmicos locais, condicionando a expressão espacial do lago de ar frio. Em áreas periurbanas e rurais, a menor interferência antrópica permite uma expressão mais nítida dos mecanismos topoclimáticos, embora com implicações acrescidas ao nível da acumulação de poluentes e da qualidade do ar.

Neste sentido, os lagos de ar frio assumem uma dupla dimensão no contexto urbano e periurbano: por um lado, constituem sistemas naturais de organização térmica do território, geradores de microclimas diferenciados; por outro, configuram áreas de vulnerabilidade ambiental, associadas à persistência de inversões térmicas, à estagnação atmosférica e à concentração de poluentes nas camadas inferiores da atmosfera. Estas condições podem traduzir-se em impactos diretos no conforto térmico, na saúde pública e na segurança, particularmente em zonas densamente habitadas ou com presença de equipamentos sensíveis. Os resultados obtidos reforçam, assim, a necessidade de integrar a dimensão topoclimática nos instrumentos de planeamento e gestão territorial. A identificação de áreas propensas à acumulação de ar frio deve constituir um elemento de suporte à tomada de decisão, nomeadamente na localização de novos usos do solo, na definição de estratégias de mitigação de riscos climáticos e na promoção de soluções baseadas na natureza que favoreçam a ventilação e a qualidade ambiental.

Do ponto de vista científico, este trabalho contribui para uma leitura integrada dos lagos de ar frio em contexto urbano e periurbano, ultrapassando abordagens fragmentadas e evidenciando a importância de considerar estes fenómenos no quadro mais amplo da climatologia urbana. A diversidade de comportamentos identificada no setor norte de Coimbra demonstra que pequenas variações morfológicas e funcionais podem traduzir-se em diferenças significativas no funcionamento climático local, reforçando a necessidade de análises à escala fina.

Por fim, importa sublinhar que a heterogeneidade metodológica dos estudos de base constitui simultaneamente uma limitação e uma oportunidade: se, por um lado, condiciona a comparabilidade direta de alguns resultados, por outro, permite uma abordagem mais abrangente do fenómeno, integrando diferentes escalas temporais e estratégias de observação. Futuras investigações deverão apostar na monitorização contínua e integrada destes sistemas, bem como na articulação com modelos numéricos de alta resolução, de modo a aprofundar a compreensão dos processos envolvidos e a apoiar de forma mais robusta a sua aplicação ao planeamento territorial.

Bibliografia

- Alcoforado, M. J., Andrade, E., Neves, M., & Vieira, G. (1993). Climas locais da Arrábida no Inverno. *Finisterra*, 28(55/56), 215–228. <https://doi.org/10.18055/Finis1870>
- Anquetin, S., Guilbaud, C., & Chollet, J.-P. (1999). Thermal valley inversion impact on the dispersion of a passive pollutant in a complex mountainous area. *Atmospheric Environment*, 33(24), 3953–3959. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00137-5)
- Bacer, S., Beaumet, J., Ménégos, M., Gallée, H., Le Bouëdec, E., & Staquet, C. (2024). Impact of climate change on persistent cold-air pools in an alpine valley during the 21st century. *Weather and Climate Dynamics*, 5(1), 211–229. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-211-2024>
- Baker, K. R., Simon, H., & Kelly, J. T. (2011). Challenges to Modeling “Cold Pool” Meteorology Associated with High Pollution Episodes. *Environmental Science & Technology*, 45(17), 7118–7119. <https://doi.org/10.1021/es202705v>
- Bodine, D., Klein, P. M., Arms, S. C., & Shapiro, A. (2009). Variability of Surface Air Temperature over Gently Sloped Terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(6), 1117–1141. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1933.1>
- Burns, P., & Chemel, C. (2014). Evolution of Cold-Air-Pooling Processes in Complex Terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 150(3), 423–447. <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9885-z>
- Burns, P., & Chemel, C. (2015). Interactions Between Downslope Flows and a Developing Cold-Air Pool. *Boundary-Layer Meteorology*, 154, 57–80. <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9958-7>
- Clements, C. B., Whiteman, C. D., & Horel, J. D. (2003). Cold-Air-Pool Structure and Evolution in a Mountain Basin: Peter Sinks, Utah. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 42, 752–768. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2)
- Comber, A., & Zeng, W. (2019). Spatial interpolation using areal features: A review of methods and opportunities using new forms of data with coded illustrations. *Geography Compass*, 13(10), e12465. <https://doi.org/10.1111/gec3.12465>
- Cordeiro, A. M. (2025). Formation and Dynamics of Night-Time Cold Air Pools in Peri-Urban Topographic Basins: A Case Study of Coimbra, Portugal. *Meteorology*, 4(1), 4. <https://doi.org/10.3390/meteorology4010004>
- Cordeiro, A. M., Lucas, A., & Lameiras, J. M. (2026). Topographic Influence on Cold-Air Pool Formation: A Case Study of the Eiras Valley (Coimbra, Portugal). *Atmosphere*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/atmos17020165>
- Cordeiro, A. M., Ornelas, A., & Silva, D. D. (2023). The importance of topography in the formation of cold-air pooling in urban spaces. The example of the city of

- Coimbra (Portugal). *Theoretical and Applied Climatology*, 152(1), 227–239. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04401-8>
- Cunha, L., Soares, A., Tavares, A., & Marques, J. (1999). O «julgamento» geomorfológico de Coimbra: O testemunho dos depósitos quaternários. *Cadernos de Geografia*, 15–26. https://doi.org/10.14195/0871-1623_99_3
- Daveau, S. (Ed.). (1985). *Mapas climáticos de Portugal*. Centro de Estudos Geográficos.
- Ferreira, D. B. (2005). O Ambiente Climático. Em C. A. Medeiros (Ed.), *Geografia de Portugal, vol. 1: Ambiente Físico* (p. 495). Círculo de Leitores.
- Ganho, N. (1999). Clima urbano e a climatologia urbana: Fundamentos e aplicação ao ordenamento urbano. *Cadernos de Geografia*, 18. https://doi.org/10.14195/0871-1623_18_6
- Ganho, N. (1998). *O clima urbano de Coimbra: Estudo de climatologia local aplicada ao ordenamento urbano* [tese de dout., Universidade de Coimbra]. <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/618>
- Gribov, A., & Krivoruchko, K. (2020). Empirical Bayesian kriging implementation and usage. *Science of The Total Environment*, 722, 137290. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137290>
- Lareau, N. P., Crosman, E., Whiteman, C. D., Horel, J. D., Hoch, S. W., Brown, W. O. J., & Horst, T. W. (2013). The Persistent Cold-Air Pool Study. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 51–63. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00255.1>
- Largerón, Y., & Staquet, C. (2016). Persistent inversion dynamics and wintertime PM10 air pollution in Alpine valleys. *Atmospheric Environment*, 135, 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.045>
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., & Zepp, H. (2022). Intraurban heterogeneity of space-time land surface temperature trends in six climate-diverse cities. *Science of The Total Environment*, 804, 150037. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150037>
- Lopes, A. (1995). Drenagem e acumulação de ar frio em noites de arrefecimento radiativo. Um exemplo no vale de Barcarena (Oeiras). *Finisterra*, 30(59/60). <https://doi.org/10.18055/Finis1820>
- Marques, D., Ganho, N., & Cordeiro, A. (2007). Clima local e ordenamento urbano: O exemplo de Coimbra. *Cadernos de Geografia*, 26/27, 313–323. https://doi.org/10.14195/0871-1623_27_26
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., & Voogt, J. (2020). Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 411–444. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>
- Mennis, J., & Hultgren, T. (2006). Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation. *Cartography and Geographic Information Science*, 33, 179–194. <https://doi.org/10.1559/152304006779077309>
- Mora, C. (2009). Padrões térmicos no alto vale do Zêzere. Condicionantes topográficas e meteorológicas. *Finisterra*, 44(87), 55–69.
- Nidzgorska-Lencewicz, J., & Czarnecka, M. (2020). Thermal Inversion and Particulate Matter Concentration in Wrocław in Winter Season. *Atmosphere*, 11(12), 1351. <https://doi.org/10.3390/atmos11121351>
- Oke, T. (2006). Towards Better Scientific Communication in Urban Climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 179–190. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0153-0>
-

- Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Pastore, M. A., Classen, A. T., D'Amato, A. W., English, M. E., Rand, K., Foster, J. R., & Adair, E. C. (2024). Frequent and strong cold-air pooling drives temperate forest composition. *Ecology and Evolution*, 14(4), e11126. <https://doi.org/10.1002/ece3.11126>
- Pinto, D., Gaspar, P., Ganho, N., & Cordeiro, A. (2008). Poluição atmosférica e clima urbano de Coimbra: Alguns dados preliminares. *Cadernos de Geografia*, 325–332. https://doi.org/10.14195/0871-1623_27_27
- Price, J. D., Vosper, S., Brown, A., Ross, A., Clark, P., Davies, F., Horlacher, V., Claxton, B., McGregor, J. R., Hoare, J. S., Jemmett-Smith, B., & Sheridan, P. (2011). COLPEX: Field and Numerical Studies over a Region of Small Hills. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 1636–1650. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3032.1>
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 14. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>
- Qian, Y., Chakraborty, T., Li, J., Li, D., He, C., Sarangi, C., Chen, F., Yang, X., & Leung, L. (2022). Urbanization Impact on Regional Climate and Extreme Weather: Current Understanding, Uncertainties, and Future Research Directions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1371-9>
- Rasilla, D. F., Martilli, A., Allende, F., & Fernández, F. (2023). Long-term evolution of cold air pools over the Madrid basin. *International Journal of Climatology*, 43(1), 38–56. <https://doi.org/10.1002/joc.7700>
- Rauchöcker, A., Rudolph, A., Stiperski, I., & Lehner, M. (2024). Cold-air pool development in a small Alpine valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(760), 1243–1266. <https://doi.org/10.1002/qj.4644>
- Rebelo, F. (1999). Condicionismos físico-geográficos na origem e no desenvolvimento da cidade de Coimbra. *Cadernos de Geografia*, 11–13.
- Sanderson, M. G., Teixeira, M., & Graça, A. (2022). Cold-Air Pooling in the Upper Douro Valley: An Observational Study. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61, 1893–1904. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0263.1>
- Silva, T., Lopes, A., Vasconcelos, J., Chokhachian, A., Wagenfeld, M., & Santucci, D. (2024). Thermal stress and comfort assessment in urban areas using Copernicus Climate Change Service Era 5 reanalysis and collected microclimatic data. *International Journal of Biometeorology*, 68(5), 949–963. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02639-z>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Tavares, A. O. (1999). *Condicionantes físicas ao planeamento. Análise da susceptibilidade no espaço do Concelho de Coimbra* [tese de dout., Universidade de Coimbra].
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development* (rel. técn.). United Nations. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Vosper, S., Hughes, J., Lock, A., Sheridan, P., Ross, A., Jemmett-Smith, B., & Brown, A. (2014). Cold-pool formation in a narrow valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140, 699–714. <https://doi.org/10.1002/qj.2160>
- Vosper, S., Sheridan, P. F., & Brown, A. R. (2013). Characteristics of cold pools observed in narrow valleys and dependence on external conditions. *Quarterly Journal of the*
-

- Royal Meteorological Society*, 140(679), 715–728. <https://doi.org/10.1002/qj.2159>
- Wang, Z., Zhou, R., & Yu, Y. (2025). The impact of urban morphology on land surface temperature under seasonal and diurnal variations: Marginal and interaction effects. *Building and Environment*, 272, 112673. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112673>
- Whiteman, C. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195132717.001.0001>
- Yavuz, V. (2025). Unveiling the impact of temperature inversions on air quality: A comprehensive analysis of polluted and severe polluted days in Istanbul. *Acta Geophysica*, 73(1), 969–986. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01417-0>
- Yoshino, M. M. (1984). Thermal belt and cold air drainage on the mountain slope and cold air lake in the basin at quiet, clear night. *GeoJournal*, 8(3), 235–250. <https://doi.org/10.1007/BF00446473>
-