

MAIS DE 40 ANOS
A CONVERTER
CONHECIMENTO
EM VALOR

Estudo de Avaliação de Impactes Microclimáticos de Centrais Fotovoltaicas

Revisão Bibliográfica e Análise do Caso de Estudo da
Central Fotovoltaica da Amareleja



28/09/2026

0. CONTROLO DOCUMENTAL

0.1 IDENTIFICAÇÃO DO DOCUMENTO

Projeto	Estudo de Avaliação de Impactes Microclimáticos de Centrais Fotovoltaicas
Nome do Documento	Estudo de Avaliação de Impactes Microclimáticos de Centrais Fotovoltaicas Revisão Bibliográfica e Análise do Caso de Estudo da Central Fotovoltaica da Amareleja
Nome do Ficheiro	ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTES MICROCLIMÁTICOS DE CENTRAIS FOTOVOLTAICAS _ V4.DOCX

0.2 AUTOR(ES)

Nome	Entidade	Iniciais
Henrique Monteiro	INEGI	HM
Ricardo Barbosa	INEGI	RB

Índice

1.	Introdução	7
2.	Revisão Bibliográfica	9
2.1.	Primeiros estudos sobre o fenómeno	9
2.2.	Balanço energético e modelação dos efeitos microclimáticos	15
2.3.	Evidências em contextos distintos	21
2.4.	Estudos em contexto climático mediterrânico	22
2.5.	Síntese da revisão bibliográfica	26
3.	Caso de Estudo da Central Fotovoltaica da Amareleja	29
3.1.	Central Solar Fotovoltaica da Amareleja	31
3.2.	Metodologia	33
3.2.1.	Método <i>Differences in Differences</i> (DiD)	34
3.3.	Resultados	36
3.3.1.	Ciclo diário de temperatura média: local de estudo vs. referência....	37
3.3.2.	Análise DiD (ciclo diário de temperatura média)	38
3.3.3.	Distribuição global de temperaturas no local de estudo e no local de referência	39
3.3.4.	Análise espacial da temperatura média global na região	41
3.3.5.	Síntese das variações da temperatura média global e da temperatura média dos extremos diários	44
3.3.6.	Variações sazonais da temperatura média e dos extremos diários..	46
4.	Conclusões	50
5.	Referências	53
	Anexos	55
	A.1 Metodologia de Reconstrução da Série Temporal da Temperatura Horária da Estação Meteorológica da Amareleja	55

Lista de Tabelas

Tabela 1. Análise comparativa de normais climatológicas para as estações climatológicas de Fundão, Castelo Branco (representativas do contexto da Beira Baixa) e Amareleja (caso de estudo)	30
Tabela 2. Localizações das séries temporais de temperatura	33

Lista de Figuras

Figura 1. Diferenciais da temperatura do ar em função da distância ao perímetro da central. Distâncias negativas indicam localizações dentro da área da central. (Retirado de [1])	10
Figura 2. Perfis verticais de temperatura do ar em função da altura e da distância ao campo fotovoltaico, obtidos por simulação CFD em diferentes períodos do dia. (Retirado de [1]) ..	10
Figura 3. Locais de Medição (retirado de [2]). Os autores monitorizaram um ecossistema natural desértico semiárido (1), instalação solar PV (2) e uma área urbana pavimentada (3)	11
Figura 4. Comparação entre a temperatura dos módulos e temperatura do ar a 2.5m acima do nível do solo para um dia de verão – 1 de julho de 2011 (retirado de [1])	11
Figura 5. Mapas e fotografias de: (a) A localização geográfica da central, (b) layout da central e indicação dos pontos de medição, (c) sonda instalada na central PV, (d) sonda instalada no local de referência (retirado de [3]).....	13
Figura 6. Séries temporais da temperatura do ar 1.5m acima do nível do solo (a) e temperatura média diária (b) - Período de medições: 26/09/2017 a 11/07/2018 (retirado de [3])	13
Figura 7. Médias diárias dos balanços energéticos à superfície (retirado de [3])	14
Figura 8. Variação temporal da temperatura do solo em zona de painéis (linha contínua) e em zona adjacente (linha tracejada) (retirado de [4])	16
Figura 9. Tipologia do uso do solo para as duas instalações fotovoltaicas PV1 (a) e PV2 (b). Áreas a roxo indicam a presença de painéis. (retirado de [5])	17
Figura 10. Variabilidade natural e diferenças simuladas na velocidade do vento a 10m (WS10) e na temperatura da superfície (LST), resultantes da instalação de centrais fotovoltaicas, com base em simulações atmosféricas de mesoescala de longo termo (2006 a 2015). (retirado de [5]).....	17
Figura 11. Esquema do balanço energético residual de uma central fotovoltaica de grande escala (retirado de [6])	18
Figura 12. Resultados obtidos, adaptados do estudo de Williams <i>et al.</i> [8].....	20
Figura 13. Alterações à temperatura da superfície média anual em diferentes regiões (retirado de [10]).....	21
Figura 14. Temperatura do solo (esquerda) e radiação líquida (direita) medidas entre módulos (área de teste) e nas imediações da central (área de controlo). Adaptado de [14].	22
Figura 15. Localizações das sondas de medição (adaptado de [15])	23
Figura 16. Ciclo diário da temperatura do solo (a: verão, b: inverno) e da temperatura do ar (c: verão, d: inverno) (retirado de [15]).....	24
Figura 17. Central Solar Fotovoltaica Ourika e identificação das regiões de controlo e do parque PV (painéis a preto), adaptado de [17]	25

Figura 18. Temperatura da superfície do solo (LST) vs. Temperatura do ar a 2 metros acima do nível do solo (T2m). retirado de [17].	25
Figura 19. Variação média da temperatura da superfície do solo (esquerda) e da temperatura do ar a 2 metros acima do nível do solo (direita), adaptado de [17]	26
Figura 20. (a) Vista aérea da CSF da Amareleja, obtida a partir do Google Earth; (b) Localização geográfica da CSF da Amareleja, com indicação das coordenadas do centro geométrico da instalação.	32
Figura 21. Carta de ocupação do solo de 2007 na área de implantação da CSF da Amareleja e envolvente imediata. As zonas de floresta de pinheiro e azinheira encontram-se representadas a verde escuro e verde claro, respetivamente, e as culturas de sequeiro a amarelo. Fonte: SNIG [20].	32
Figura 22. Localização dos pontos onde existe uma série temporal de temperatura conhecida (imagem adaptada a partir do Google Earth)	34
Figura 23. Local de estudo e local de referência a aplicar na análise DiD no âmbito do caso de estudo da CSF da Amareleja	35
Figura 24. Média horária da temperatura do ar ao longo do ciclo diário, nos períodos (a) pré-instalação e (b) pós-instalação para o local de estudo e para o local de referência.	37
Figura 25. (a) Diferença da temperatura do ar entre o local de estudo e o local de referência ao longo do ciclo diário, para os períodos pré e pós instalação da CSF Amareleja; (b) Diferença entre os períodos pós e pré-instalação ($\Delta\Delta T$), obtida através da aplicação do método DiD.	38
Figura 26. Resumo global das séries temporais da temperatura (pré vs. pós-instalação da CSF da Amareleja) analisadas para o local de estudo (a) e para o local de referência (b).	40
Figura 27. (a) Distribuição espacial da temperatura média global na região envolvente da CSF da Amareleja no período pré-instalação; (b) distribuição espacial da temperatura média global no período pós-instalação; (c) diferença da temperatura média global entre os períodos pós e pré-instalação.	43
Figura 28. Variações da temperatura média global e da temperatura média dos extremos diários entre os períodos pós e pré-instalação.	45
Figura 29. Variações sazonais da temperatura média global entre os períodos pós e pré-instalação	46
Figura 30. Variações sazonais da média das temperaturas máximas diárias entre os períodos pós e pré-instalação.	47
Figura 31. Variações sazonais da média das temperaturas mínimas diárias entre os períodos pós e pré-instalação.	48

1. Introdução

A crescente expansão das centrais fotovoltaicas (PV) à escala global, impulsionada pela transição energética e pelos objetivos de descarbonização, tem sido acompanhada por um aumento do interesse científico sobre os seus potenciais impactes microclimáticos locais, especialmente quando se trata de centrais de grande dimensão. Em particular, a forma como a instalação de painéis solares em solo pode alterar o balanço energético à superfície e, consequentemente, influenciar variáveis meteorológicas como a temperatura do ar, a temperatura da superfície e os fluxos de calor.

Do ponto de vista físico, a presença de um parque fotovoltaico introduz alterações através de vários mecanismos fundamentais, nomeadamente a modificação da radiação incidente e refletida associada a alterações no albedo, com consequente redução da fração de energia disponível para aquecimento e o sombreamento do terreno, que poderá conduzir a uma diminuição da temperatura da superfície e do armazenamento térmico no solo. Para além disso, a alteração da rugosidade aerodinâmica, resultante das alterações à tipologia de ocupação do solo, poderá influenciar os padrões de escoamento de vento e da mistura turbulenta na camada limite atmosférica.

A literatura científica sobre este tema tem evoluído significativamente na última década, passando de estudos isolados, baseados em observações pontuais ou modelações simplificadas, para abordagens integradas que combinam medições de campo detalhadas com modelos numéricos avançados do balanço energético.

Esta evolução permitiu uma compreensão mais completa dos processos envolvidos, bem como uma avaliação mais rigorosa da magnitude e da escala espacial dos impactes associados aos sistemas fotovoltaicos.

Ainda assim, persiste controvérsia e interpretações divergentes, em particular decorrentes de estudos iniciais realizados em contextos ambientais muito específicos, cujos resultados foram, por vezes, extrapolados para outras realidades climáticas sem o devido enquadramento físico. A investigação mais recente tem vindo a clarificar que os efeitos térmicos associados a centrais fotovoltaicas dependem do contexto climático, das características do uso do solo pré-existente e da configuração das instalações.

Neste contexto, o presente estudo integra uma revisão bibliográfica que tem como objetivo sistematizar o estado da arte relativo ao estudo de impactes microclimáticos de parques fotovoltaicos, com base em estudos observacionais e/ou modelações numéricas. Em particular, o objetivo será identificar os principais mecanismos físicos envolvidos, caracterizar a magnitude e a variabilidade dos efeitos térmicos observados e avaliar a sua

relevância à escala local e regional, fornecendo assim um enquadramento científico para a análise de projetos.

Para além da revisão da literatura científica, o presente relatório integra uma análise complementar aplicada a um caso de estudo específico, a central fotovoltaica da Amareleja, com o objetivo de avaliar empiricamente os eventuais efeitos microclimáticos associados à sua instalação. Esta análise baseia-se na combinação de dados observacionais locais com séries temporais de longo termo provenientes de modelos de macroescala, permitindo enquadrar as variações registadas num contexto climático mais amplo. Metodologicamente, é adotada uma abordagem comparativa baseada no método *Difference-in-Differences* (DiD), através da qual se analisam diferenças espaciais e temporais entre áreas e períodos sob influência da instalação fotovoltaica e condições de referência, controlando a variabilidade climática natural. Esta abordagem permite identificar de forma mais robusta eventuais efeitos atribuíveis à presença da central, distinguindo-os das flutuações meteorológicas de fundo.

O trabalho desenvolvido visa igualmente contribuir para a criação e robustecimento do conhecimento necessário ao enquadramento dos potenciais efeitos microclimáticos associados à futura Central Fotovoltaica Sophia. Atendendo a que o projeto se encontra em fase de desenvolvimento, a revisão do estado da arte permite identificar os principais efeitos plausíveis e os fatores que condicionam a sua magnitude. A análise do caso de estudo da Central Solar Fotovoltaica da Amareleja complementa este enquadramento com evidência relativa a uma instalação de grande escala em contexto climático português, fornecendo indicações sobre tendências potencialmente relevantes para o projeto Sophia. A transposição destas indicações deverá, contudo, considerar as diferenças entre os dois projetos, nomeadamente ao nível da configuração das instalações, do uso do solo e das condições ambientais locais.

2. Revisão Bibliográfica

A discussão científica em torno dos impactos microclimáticos de centrais fotovoltaicas tem sido frequentemente enquadrada através do conceito de *photovoltaic heat Island* (PVHI), introduzido para descrever potenciais aumentos de temperatura do ar associados à presença de grandes áreas cobertas por painéis solares. Contudo, a evidência científica disponível revela que este conceito não é uniforme nem universalmente aplicável, sendo fortemente dependente das condições ambientais e das metodologias de observação e modelação utilizadas.

2.1. Primeiros estudos sobre o fenómeno

Um dos primeiros trabalhos a abordar esta questão de forma sistemática foi o de Fthenakis & Yu [1] que analisaram o comportamento térmico de parques fotovoltaicos através de uma combinação de medições de campo e simulações de mecânica dos fluidos computacional (CFD). O caso de estudo analisado corresponde a uma central fotovoltaica localizada num contexto climático temperado a semiárido, caracterizado pela presença de regimes de vento dominantes bem definidos.

Do ponto de vista da configuração da instalação, os autores consideram uma central com potência na ordem das dezenas de MW, sendo o modelo numérico construído para uma secção representativa de aproximadamente 1 MW. A geometria dos painéis e do campo fotovoltaico é explicitamente incorporada na análise, incluindo a elevação dos módulos (com base a cerca de 0.5m do solo e topo a aproximadamente 1.3m), o espaçamento entre filas (~4m) e a existência de vias entre campos (~8m), que são identificadas como elementos relevantes para a ventilação e dissipação térmica.

Embora não tenham sido implementadas medidas de mitigação específicas como parte do projeto, o estudo evidencia que determinadas características estruturais das centrais fotovoltaicas, nomeadamente o espaçamento entre fileiras e a presença de corredores de ventilação, contribuem para a dissipação eficiente do calor, funcionando como mecanismos mitigadores intrínsecos.

Os resultados mostram que a temperatura do ar no interior do parque pode apresentar valores superiores aos do ambiente envolvente, atingindo diferenças médias até cerca de +1.9 °C a 2.5m de altura no centro da instalação. No entanto, a análise espacial demonstra que este efeito é fortemente localizado e rapidamente dissipado. A Figura 1 ilustra a variação da temperatura do ar em função da distância ao perímetro da central. Observa-se uma redução progressiva do diferencial térmico à medida que aumenta a distância, com valores praticamente coincidentes com o ambiente a cerca de 300m do limite do parque.

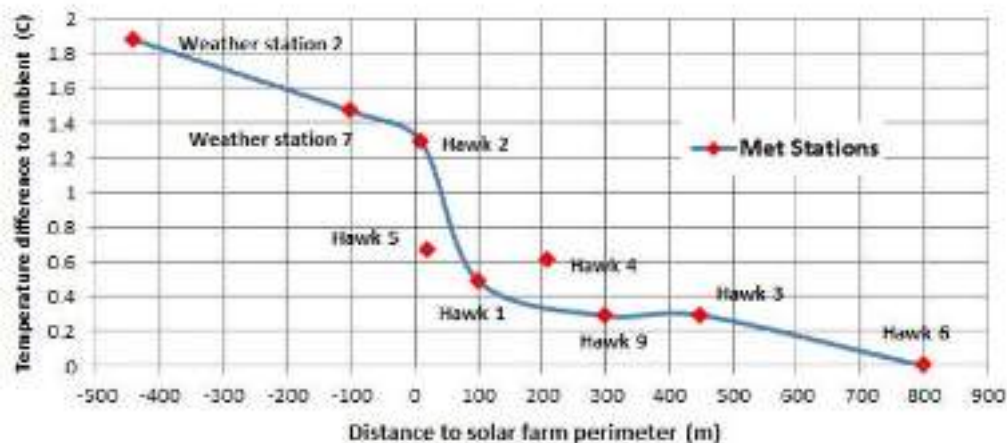


Figura 1. Diferenciais da temperatura do ar em função da distância ao perímetro da central. Distâncias negativas indicam localizações dentro da área da central. (Retirado de [1])

Para complementar a análise, a Figura 2 apresenta perfis verticais de temperatura obtidos por simulação CFD, evidenciando a dissipação de calor na vertical. Os resultados mostram que o excedente térmico desaparece entre aproximadamente 5 e 18 m de altura, dependendo das condições atmosféricas e da intensidade da radiação solar.

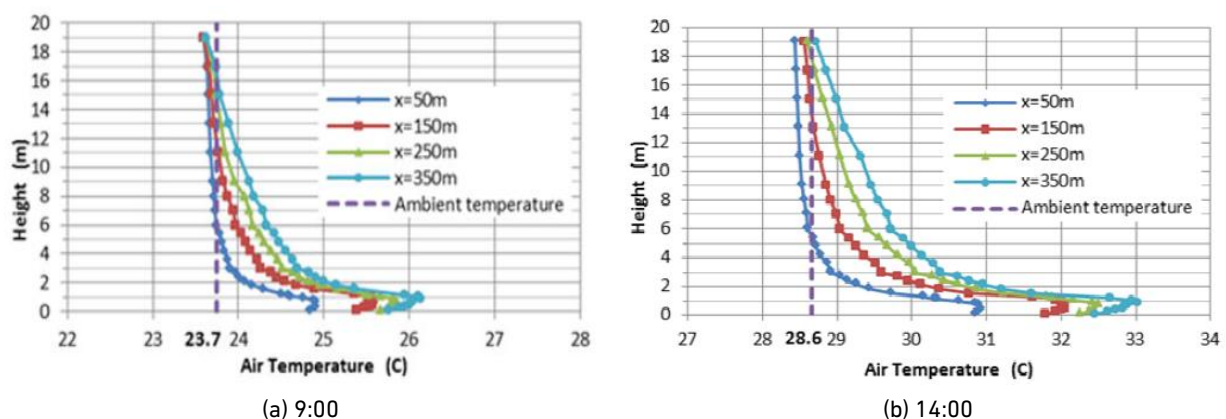


Figura 2. Perfis verticais de temperatura do ar em função da altura e da distância ao campo fotovoltaico, obtidos por simulação CFD em diferentes períodos do dia. (Retirado de [1])

Esta análise demonstra que o aquecimento induzido pela central fotovoltaica não se propaga de forma significativa para além da sua área de implantação e indica que o calor gerado é rapidamente diluído na camada limite atmosférica, impedindo a acumulação de energia na proximidade da superfície. Estas conclusões indicam que o PVHI observado é altamente localizado.

O estudo de Barron-Gafford *et al.* [2] introduz o conceito de PVHI, propondo a existência de um aumento sistemático da temperatura do ar associado à presença de centrais fotovoltaicas. Com base em medições contínuas realizadas num ambiente semiárido, os autores comparam diretamente três tipos de uso do solo localizados na mesma área geográfica (ver Figura 3) com o objetivo de reduzir a variabilidade atmosférica regional.



Figura 3. Locais de Medição (retirado de [2]). Os autores monitorizaram um ecossistema natural desértico semiárido (1), instalação solar PV (2) e uma área urbana pavimentada (3)

Os resultados reportados no estudo de Barron-Gafford *et al.* [2] evidenciam que a temperatura do ar no interior do parque fotovoltaico é consistentemente superior à registada no ambiente natural adjacente, sendo este efeito particularmente expressivo durante o período noturno. Em termos médios, as diferenças de temperatura podem atingir valores da ordem dos 3 a 4 °C durante a noite, especialmente nos meses mais quentes. Este comportamento é interpretado pelos autores como um atraso no arrefecimento noturno da atmosfera, análogo ao fenómeno de ilha de calor urbana, resultante de alterações no balanço energético à superfície, incluindo a redução do albedo, a remoção de vegetação e a consequente diminuição dos fluxos de calor latente.

No entanto, a conclusão do aquecimento noturno revela uma divergência com o estudo de Fthenakis & Yu [1], onde foi feita uma análise ao comportamento térmico dos módulos (ver Figura 4) que revelou que, durante o dia, os módulos apresentam temperaturas significativamente superiores às do ar ambiente, funcionando como uma fonte de calor sensível. Contudo, durante a noite, arrefecem rapidamente, atingindo temperaturas inferiores às do ar circundante.

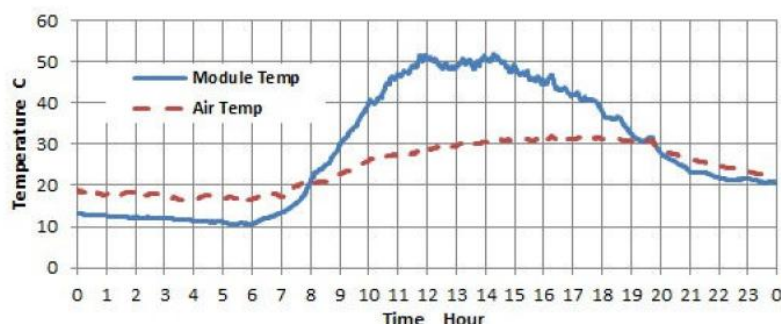


Figura 4. Comparação entre a temperatura dos módulos e temperatura do ar a 2.5m acima do nível do solo para um dia de verão – 1 de julho de 2011 (retirado de [1])

Este comportamento cíclico demonstra que o sistema não armazena calor de forma significativa ao longo do tempo, sendo a energia térmica acumulada durante o dia eficientemente dissipada durante a noite. Esta conclusão é incompatível com o mecanismo de acumulação térmica característico de uma ilha de calor.

Comparando os estudos de Fthenakis & Yu [1] e Barron-Gafford *et al.* [2], observa-se uma divergência que pode, em grande medida, ser explicada pelas diferenças no enquadramento experimental adotado. Em particular, Barron-Gafford *et al.* [2] comparam o parque fotovoltaico com um ecossistema natural com cobertura vegetal, no qual os processos de evapotranspiração promovem um arrefecimento mais eficiente da superfície. Desta forma, as diferenças de temperatura observadas podem refletir, em parte, a redução desse mecanismo de arrefecimento natural, e não necessariamente a presença de uma fonte adicional de calor no sistema fotovoltaico.

Para uma atribuição causal mais robusta dos efeitos observados, seria desejável a existência de medições no mesmo local e sob a mesma tipologia de solo, realizadas antes e após a instalação da central fotovoltaica (pré vs. pós-intervenção). Esse tipo de abordagem permitiria avaliar diretamente o impacto da alteração do uso do solo, isolando o efeito da instalação fotovoltaica das diferenças inerentes ao tipo de cobertura pré-existente.

A necessidade de uma caracterização mais completa dos processos físicos envolvidos, em particular do balanço energético superficial, motivou o desenvolvimento de estudos observacionais mais avançados, como o de Broadbent *et al.* [3]. Este trabalho representa um avanço significativo relativamente aos estudos anteriores, ao integrar medições detalhadas dos fluxos de energia com observações da temperatura do ar, permitindo uma análise mais robusta dos mecanismos subjacentes aos impactos microclimáticos de centrais fotovoltaicas.

A investigação foi conduzida numa central fotovoltaica de grande escala (40 MW) localizada no sul do Arizona, em condições climáticas semiáridas comparáveis às analisadas por Barron-Gafford *et al.* [2]. A metodologia baseia-se na utilização de duas torres de medição instrumentadas com tecnologia de *eddy covariance*, uma situada no interior do parque fotovoltaico e outra numa área de referência adjacente (ver Figura 5), permitindo medir diretamente os principais componentes do balanço energético.



Figura 5. Mapas e fotografias de: (a) A localização geográfica da central, (b) layout da central e indicação dos pontos de medição, (c) sonda instalada na central PV, (d) sonda instalada no local de referência (retirado de [3])

Os resultados confirmam a existência de um aquecimento diurno moderado da temperatura do ar, com valores médios máximos cerca de $+1.38^{\circ}\text{C}$ superiores no interior do parque fotovoltaico. Este efeito é claramente visível na Figura, onde se apresenta a evolução temporal da temperatura do ar nos dois locais, evidenciando diferenças consistentes durante o período diurno.

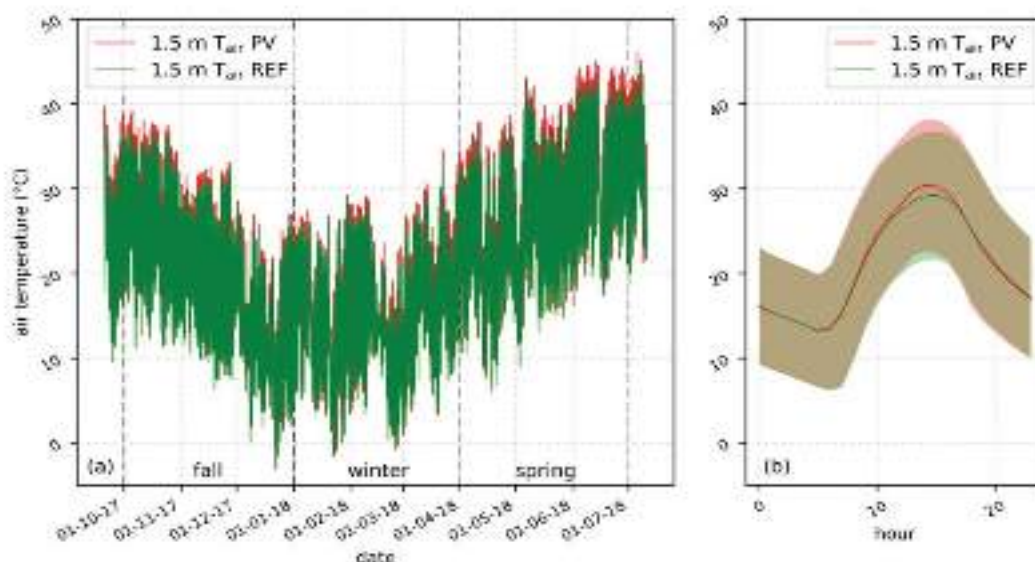


Figura 6. Séries temporais da temperatura do ar 1.5m acima do nível do solo (a) e temperatura média diária (b) - Período de medições: 26/09/2017 a 11/07/2018 (retirado de [3])

Ao contrário dos resultados de Barron-Gafford *et al.* [2], não foi observada diferença significativa na temperatura do ar durante o período noturno. Este comportamento pode ser analisado também na Figura 6, onde as curvas de temperatura convergem durante a noite, indicando ausência de aquecimento persistente.

A análise do perfil vertical da temperatura, no estudo de Broadbent *et al.* [3], revela que o aquecimento induzido pelos painéis fotovoltaicos é confinado a uma camada atmosférica próxima dos módulos, tipicamente até cerca de 1 a 2 m de altura. Estes resultados reforçam que o efeito térmico é local e não se propaga significativamente na vertical.

A principal contribuição do estudo de Broadbent *et al.* [3] consiste na análise detalhada do balanço energético, apresentada na Figura 7, que evidencia como a energia disponível à superfície é redistribuída na presença de painéis fotovoltaicos.

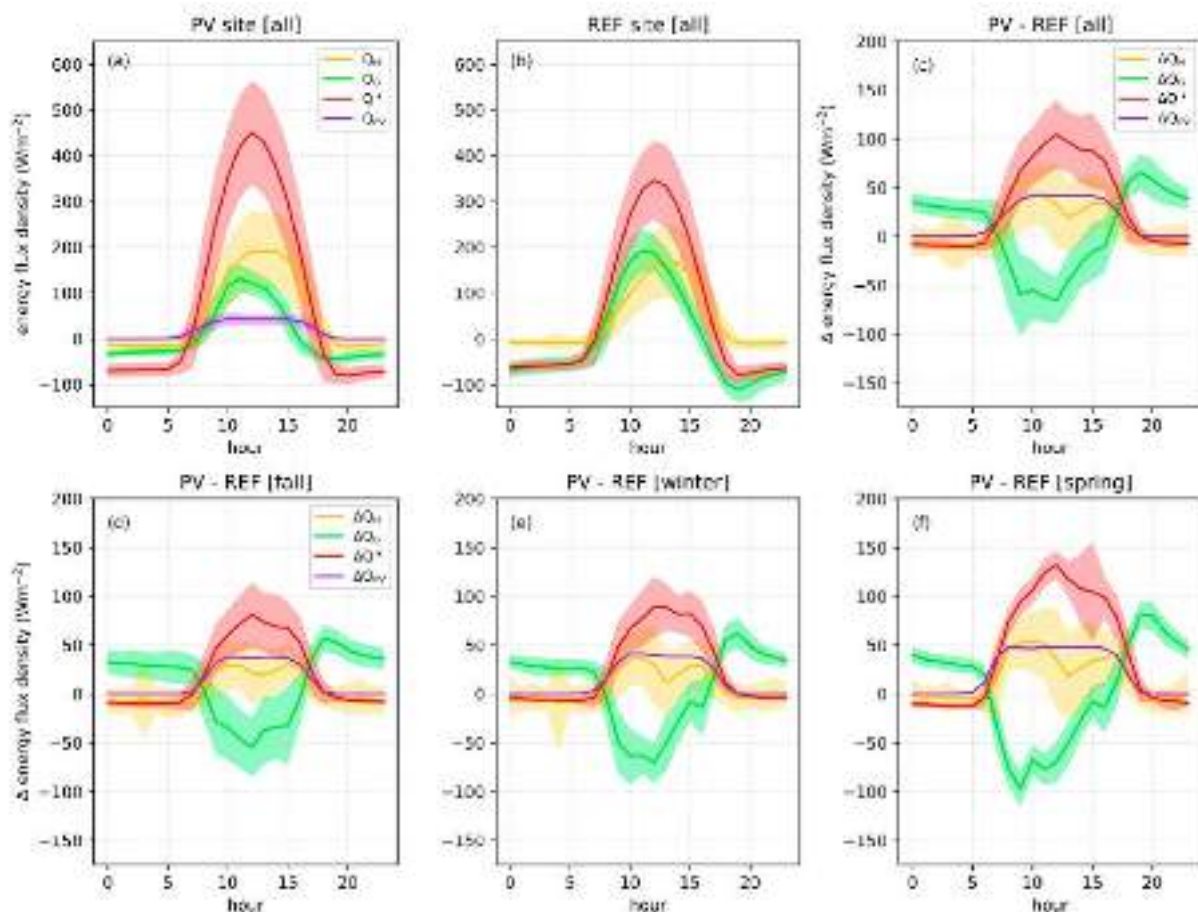


Figura 7. Médias diárias dos balanços energéticos à superfície (retirado de [3])

Por análise à Figura 7, conclui-se que:

- Os painéis reduzem o albedo, aumentando a radiação líquida disponível (Q^*);
- Essa energia é preferencialmente canalizada para calor sensível (Q_H);
- O fluxo de calor no solo (Q_G) é reduzido, devido ao sombreamento;
- A capacidade de armazenamento térmico do sistema é limitada.

Esta redistribuição da energia explica o aquecimento diurno do ar. No entanto, é ainda mais relevante para compreender o comportamento noturno. Como o solo armazena menos energia durante o dia e os módulos possuem baixa capacidade térmica (bastante inferior ao solo), há menos energia disponível para libertação durante a noite, impedindo a formação de um excesso térmico persistente.

Os resultados de Broadbent *et al.* [3] permitem resolver a divergência observada entre os estudos anteriores. Por um lado, confirmam a existência de aquecimento diurno local, consistente com o comportamento descrito por Fthenakis & Yu [1]. Por outro lado, demonstram que não ocorre aquecimento noturno significativo, em linha com a ausência de armazenamento térmico identificada nesse estudo.

Simultaneamente, estes resultados colocam em perspetiva os valores noturnos elevados reportados por Barron-Gafford *et al.* [2]. De facto, os próprios autores sugerem que esses valores podem estar associados a limitações metodológicas, nomeadamente à ausência de medições do balanço energético e à possível influência de superfícies adjacentes, bem como à falta de informação sobre a altura das medições de temperatura.

2.2. Balanço energético e modelação dos efeitos microclimáticos

Na sequência dos avanços introduzidos por estudos observacionais como o de Broadbent *et al.* [3], os trabalhos de Chang *et al.* ([4], [5], [6]) constituem um contributo fundamental para a consolidação dos mecanismos físicos associados aos impactes microclimáticos de centrais fotovoltaicas, através de uma abordagem integrada que combina medições de campo e modelação atmosférica avançada.

O estudo de Chang *et al.* (2018) [4] constitui o ponto de partida desta abordagem, analisando diretamente as alterações induzidas nos fluxos radiativos e na temperatura da superfície em áreas com e sem painéis fotovoltaicos. Os resultados mostram que os painéis reduzem significativamente a radiação emitida pela superfície e alteram a refletividade, conduzindo a um aumento da radiação líquida disponível, conclusão coerente com Broadbent *et al.* [3]. No entanto, a consequência mais relevante é a redução sistemática da temperatura da superfície (LST), devido ao efeito de sombreamento e à conversão de energia solar em eletricidade.

Este comportamento é claramente visível na Figura 8, onde se observa uma diminuição consistente da temperatura da superfície nas áreas com painéis face à superfície natural adjacente.

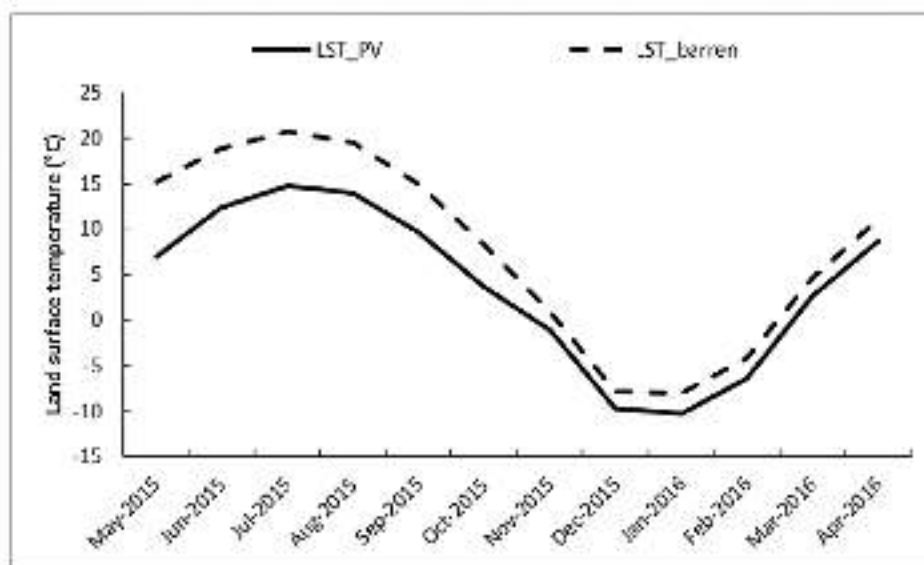


Figura 8. Variação temporal da temperatura do solo em zona de painéis (linha contínua) e em zona adjacente (linha tracejada) (retirado de [4])

Em simultâneo, o estudo demonstra que os módulos aquecem significativamente durante o dia e transferem calor para o ar envolvente, funcionando como fonte de calor sensível. O resultado é um sistema em que coexistem arrefecimento da superfície e aquecimento do ar próximo, evidenciando que o impacto não consiste num aquecimento generalizado, mas numa redistribuição do balanço energético.

Com base nestas evidências, Chang *et al.* (2020) [5] desenvolveram um modelo de balanço energético integrado no modelo numérico de mesoescala WRF [7], que permite avaliar a extensão espacial dos efeitos observados. Os resultados mostram que as alterações térmicas são essencialmente confinadas à área ocupada pelos parques fotovoltaicos.

A representação espacial dos impactos microclimáticos simulados é apresentada na Figura 10, onde se mostram, em paralelo, os valores de variabilidade natural e as diferenças induzidas pela presença de centrais fotovoltaicas para diferentes cenários de implantação. Em particular, são considerados três cenários distintos: um cenário de referência sem instalação fotovoltaica (CT: *control run*) e dois cenários com presença de parques fotovoltaicos, correspondentes a diferentes níveis de capacidade instalada: PV1 (conjunto de parques que totalizam 9GW, cenário atual) e PV2 (conjunto de parques que totalizam 100GW, cenário de expansão futura). Nas Figuras b) e c), bem como e) e f), são apresentadas as diferenças entre os cenários com fotovoltaico e o cenário de referência, designadamente (PV1 – CT) e (PV2 – CT), o que corresponde à variação induzida pela presença dos parques fotovoltaicos relativamente às condições naturais. Assim, valores negativos indicam uma redução da variável considerada (por exemplo, temperatura da superfície: LST ou velocidade do vento a 10 m: WS10), enquanto valores positivos indicam um aumento. O layout das centrais PV1 e PV2 é representado na Figura 9.

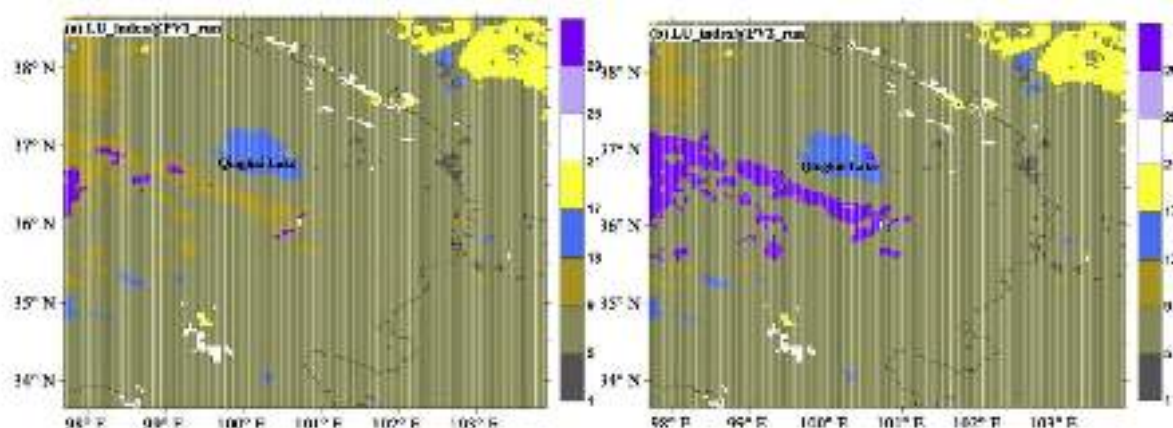


Figura 9. Tipologia do uso do solo para as duas instalações fotovoltaicas PV1 (a) e PV2 (b). Áreas a roxo indicam a presença de painéis. (retirado de [5])

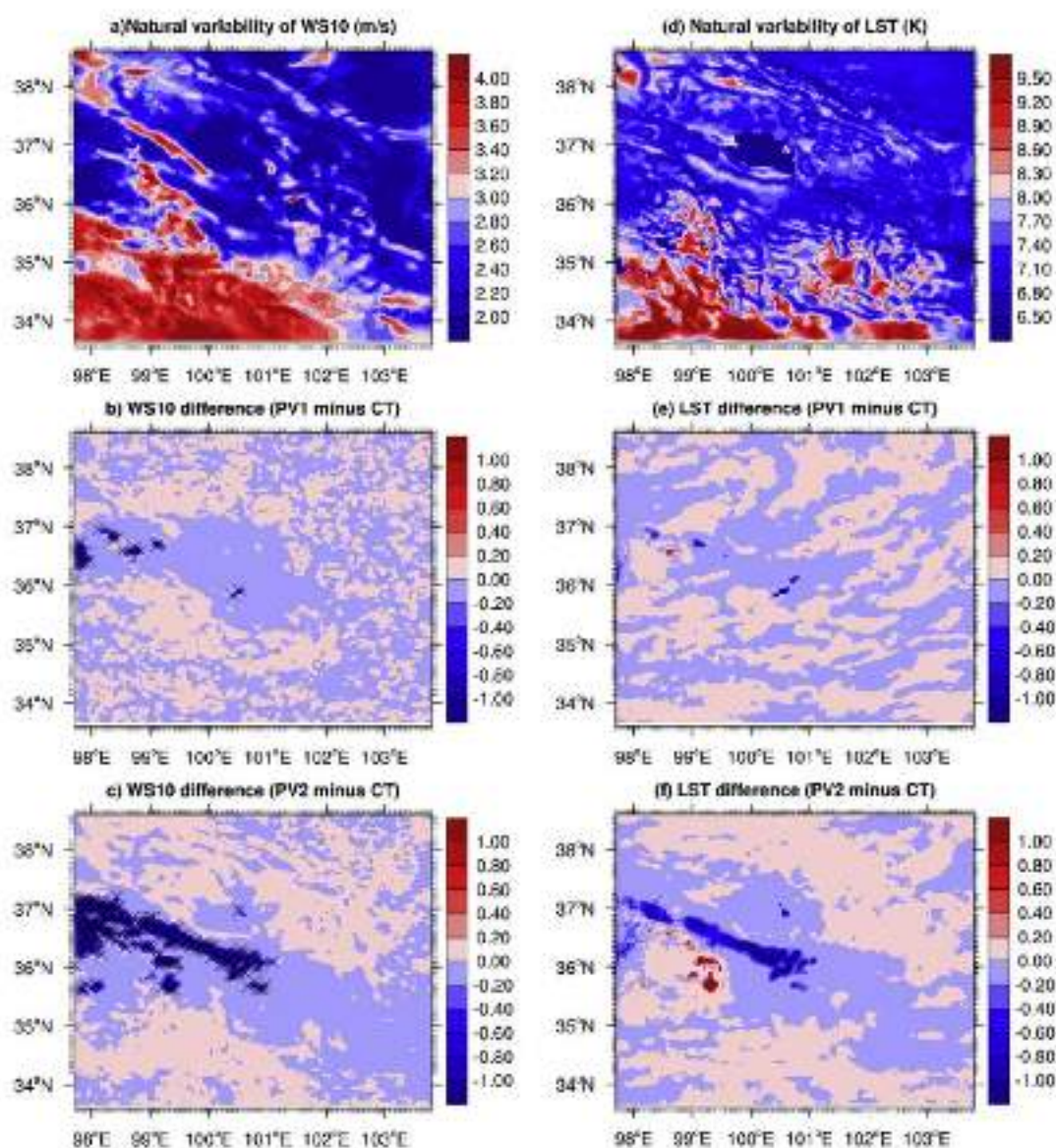


Figura 10. Variabilidade natural e diferenças simuladas na velocidade do vento a 10m (WS10) e na temperatura da superfície (LST), resultantes da instalação de centrais fotovoltaicas, com base em simulações atmosféricas de mesoescala de longo termo (2006 a 2015). (retirado de [5])

A análise da figura evidencia que as alterações induzidas pela presença de centrais fotovoltaicas concentram-se espacialmente nas áreas onde estas estão instaladas, sendo praticamente inexistentes nas regiões adjacentes. Esta característica é particularmente visível na Figura 10 - b) e c), onde as reduções da velocidade do vento se restringem às áreas ocupadas pelos parques. De forma análoga, a Figura 10 - e) e f) mostra que a temperatura da superfície apresenta uma redução nas zonas com painéis, consistente com o efeito de sombreamento identificado em estudos observacionais anteriormente mencionados. Adicionalmente, observa-se que o cenário PV2 (maior capacidade instalada) apresenta uma extensão espacial mais ampla dos efeitos em comparação com PV1, embora a magnitude das alterações permaneça relativamente reduzida e confinada às áreas diretamente afetadas. Este comportamento confirma que, mesmo em cenários de elevada implantação, os impactes microclimáticos permanecem essencialmente locais e não se propagam de forma significativa à escala regional.

O estudo mais recente, Chang *et al.* (2022) [6], aprofunda a análise desenvolvida em Chang *et al.* (2020) [5], através da implementação de um modelo acoplado WRF-PV mais completo, no qual são explicitamente representados os principais processos do balanço energético à superfície. Enquanto o modelo de 2020 se baseava na parametrização dos efeitos observados, o trabalho de 2022 introduz uma representação física explícita dos fluxos de energia, permitindo analisar diretamente os mecanismos responsáveis pelas alterações microclimáticas.

A estrutura deste modelo é descrita na Figura 11, que representa o balanço energético residual de uma central fotovoltaica, incluindo radiação, calor sensível, fluxo de calor no solo e calor latente. O diagrama representa os principais fluxos de energia à superfície, incluindo radiação solar incidente (GHI), radiação de onda longa ($L\downarrow$, $L\uparrow$), radiação refletida ($S\uparrow$), calor sensível (H), calor latente (λE) e fluxo de calor no solo (G). As áreas distintas correspondem à fração coberta por painéis fotovoltaicos (f_{pv}) e à fração de solo exposto (f_g).

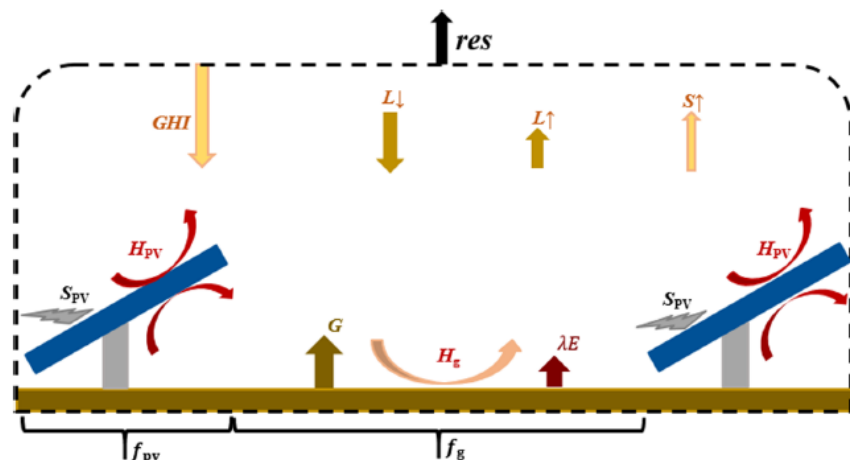


Figura 11. Esquema do balanço energético residual de uma central fotovoltaica de grande escala (retirado de [6])

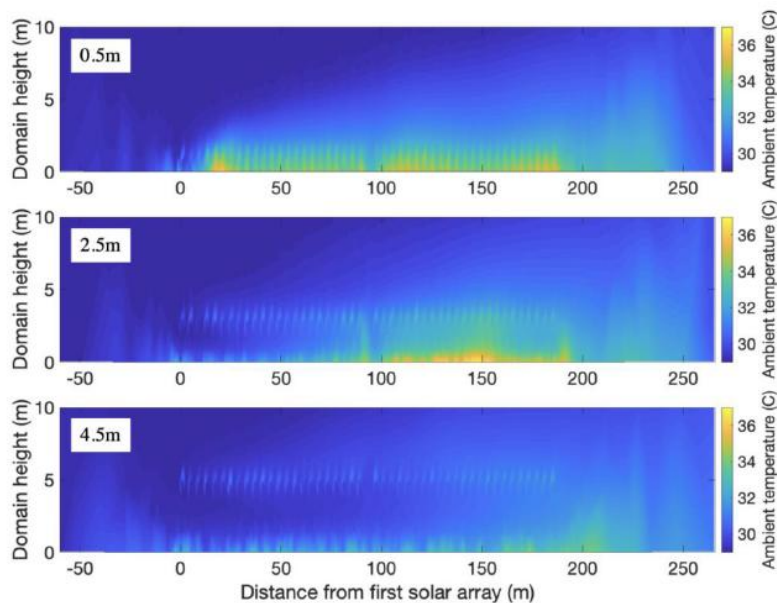
Como evidenciado no diagrama, a presença dos painéis conduz a uma redistribuição da energia disponível à superfície, com aumento do fluxo de calor sensível associado aos módulos e redução do armazenamento de calor no solo, devido ao efeito de sombreamento.

Os resultados do estudo de Chang *et al.* (2022) [6], que pode ser considerado o estado da arte na avaliação dos impactos microclimáticos de centrais fotovoltaicas, confirmam que os impactos microclimáticos de centrais fotovoltaicas derivam essencialmente de uma reorganização do balanço energético à superfície, caracterizada por uma transferência preferencial de energia para o fluxo de calor sensível durante o período diurno. Este processo conduz a um aquecimento do ar na proximidade imediata dos módulos, limitado a uma camada atmosférica superficial e rapidamente dissipado por mistura turbulenta. Simultaneamente, o sombreamento reduz significativamente o fluxo de calor no solo e, consequentemente, o armazenamento térmico no sistema, limitando a energia disponível para libertação durante o período noturno. Como resultado, não se verifica acumulação térmica significativa nem aquecimento noturno persistente, sendo os efeitos essencialmente locais e temporários.

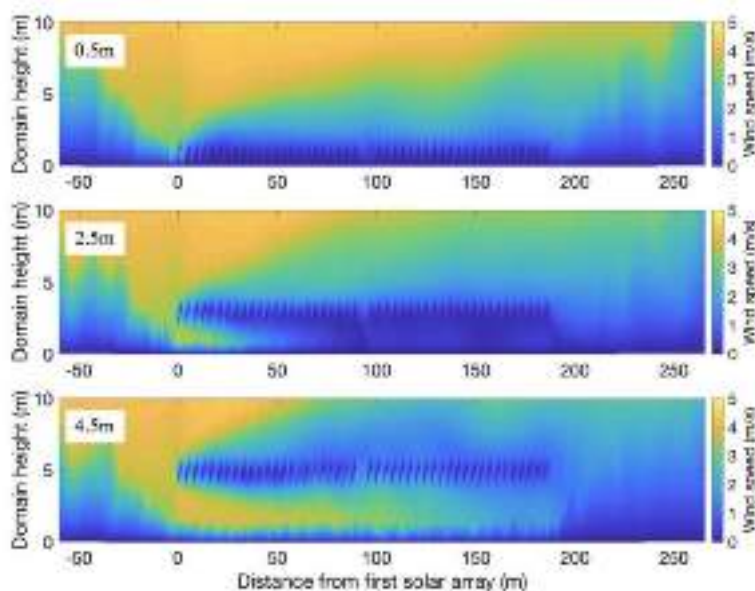
As evidências científicas mais recentes demonstram que os impactos microclimáticos de centrais fotovoltaicas resultam de uma redistribuição do balanço energético à superfície, caracterizada por dissipação eficiente de energia e ausência de acumulação térmica significativa. Esta interpretação tem sido reforçada por estudos recentes que combinam modelação física, observações de campo e análise por satélite, e que evidenciam igualmente o papel determinante do uso do solo e do desenho das instalações na modulação destes efeitos.

Do ponto de vista físico, o estudo de Williams *et al.* [8] demonstra, através de modelação CFD, que a dinâmica térmica de sistemas fotovoltaicos é dominada por processos de convecção, radiação e evapotranspiração. Os autores evidenciam que variáveis como o albedo do solo, a presença de vegetação e a altura dos painéis podem influenciar a temperatura, podendo originar reduções significativas em cenários com cobertura vegetal relativamente a solo exposto.

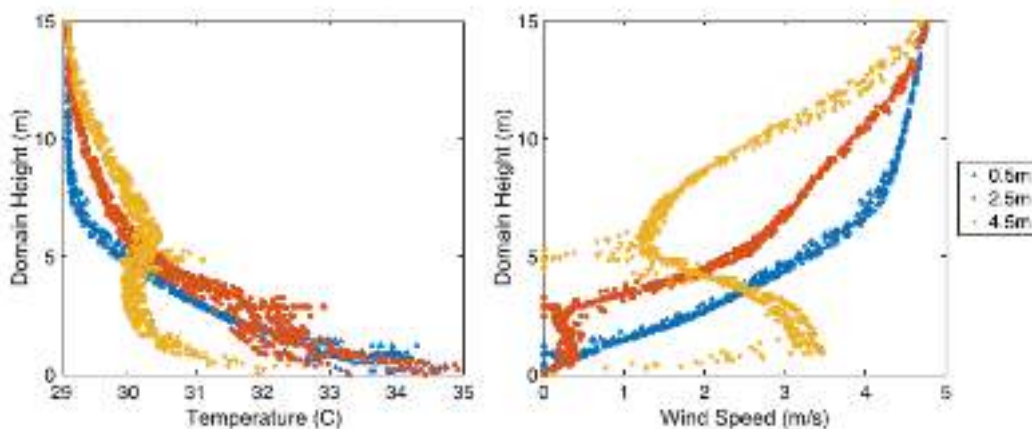
Os resultados reforçam que a energia não é armazenada no sistema, mas dissipada continuamente, sendo o comportamento térmico dependente das condições locais. Adicionalmente, é evidenciado que a dissipação ocorre numa camada atmosférica limitada, especificamente, o efeito térmico dissipa-se a 13 metros acima dos painéis e o efeito no escoamento de vento dissipa-se a 15 metros de altura (ver Figura 12), independentemente da altura dos painéis. Estes resultados estão de acordo com a escala vertical proposta por Fthenakis & Yu [1], onde é referido que os impactos verticais estão confinados entre 5 a 18 metros de altura.



(a) Mapas de temperatura obtidos em simulação numérica (retirado de [8])



(b) Mapas de velocidade obtidos em simulação numérica (retirado de [8])



(c) Perfis verticais de temperatura (esquerda) e velocidade (direita) (retirado de [8])

Figura 12. Resultados obtidos, adaptados do estudo de Williams *et al.* [8]

Para além da validação do comportamento físico do sistema, o estudo de Williams *et al.* [8] destaca o papel do uso do solo e do desenho das centrais como medidas de mitigação e indica que os impactes microclimáticos não dependem apenas da presença da instalação, mas também da forma como esta interage com o sistema superfície-atmosfera. Esta interpretação é reforçada por medições observacionais detalhadas, como por exemplo, no estudo de Zheng *et al.* [9], onde também é evidenciado um comportamento sazonal do sistema, reforçando que o sistema não promove acumulação térmica, mas sim uma redistribuição dos fluxos energéticos entre a superfície e a atmosfera. A coexistência de aquecimento do ar e arrefecimento do solo constitui uma evidência direta de que o impacto térmico não é homogêneo, mas governado pela partição da energia no balanço energético.

2.3. Evidências em contextos distintos

À escala global, o estudo de Xu *et al.* [10], confirma a robustez deste padrão com base na análise de 116 centrais fotovoltaicas distribuídas pelo mundo. Os autores demonstram que o efeito térmico dominante é um arrefecimento da temperatura da superfície (LST), na área coberta por painéis, ainda assim com valores médios de aproximadamente -0.49 K durante o dia e -0.21 K durante a noite. Como ilustrado na Figura 13, este arrefecimento foi observado em múltiplos contextos climáticos, embora apresente variabilidade associada ao tipo de uso do solo, dimensão da instalação e condições ambientais.

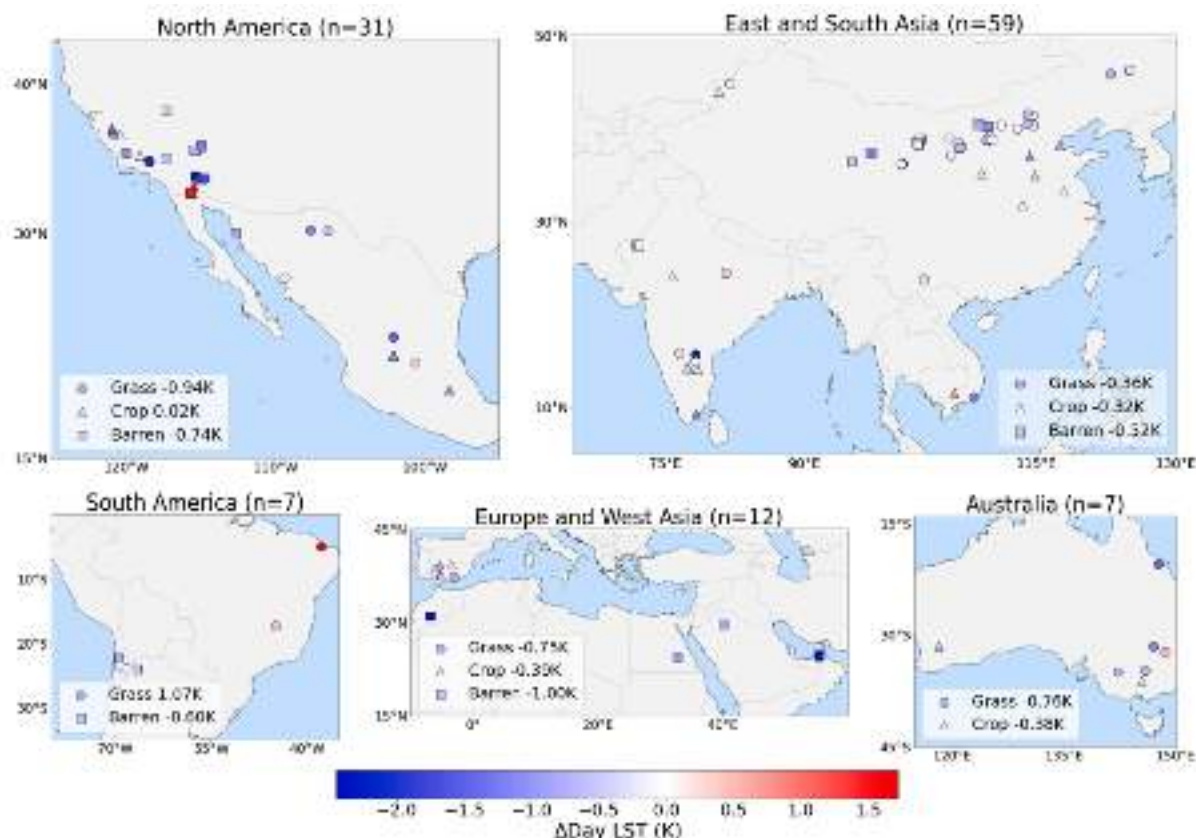


Figura 13. Alterações à temperatura da superfície média anual em diferentes regiões (retirado de [10]).

A literatura evidencia que os impactes térmicos de sistemas fotovoltaicos dependem fortemente do contexto e até da metodologia utilizada para fazer a sua avaliação. Estudos de síntese mostram que os efeitos podem variar entre arrefecimento e aquecimento, em função de parâmetros como o albedo, eficiência dos módulos, configuração da instalação e uso do solo (He *et al.* [11]). Ao nível local, soluções específicas como fachadas fotovoltaicas podem induzir aumentos da temperatura radiante durante o dia, apesar de não alterarem significativamente a temperatura do ar e apresentarem efeitos reduzidos durante a noite (Fassbender *et al.* [12]). Por outro lado, análises em contexto urbano indicam que a integração de sistemas fotovoltaicos pode contribuir para uma ligeira redução da intensidade da ilha de calor urbana, particularmente através de efeitos de sombreamento (Masson *et al.* [13]).

2.4. Estudos em contexto climático mediterrânico

A análise detalhada de estudos experimentais conduzidos em centrais fotovoltaicas montadas em solo na Europa evidencia que a instalação de sistemas fotovoltaicos conduz a conclusões semelhantes às observadas em contextos climáticos distintos previamente discutidos nesta revisão de literatura.

Em particular, Fagnano *et al.* [14] realizaram medições numa central instalada num contexto climático mediterrânico, demonstrando que a presença de módulos fotovoltaicos conduz a uma redução da temperatura do solo e da radiação líquida na área de teste (entre fileiras de painéis), em comparação com uma área de controlo situada nas imediações da central (ver Figura 14).

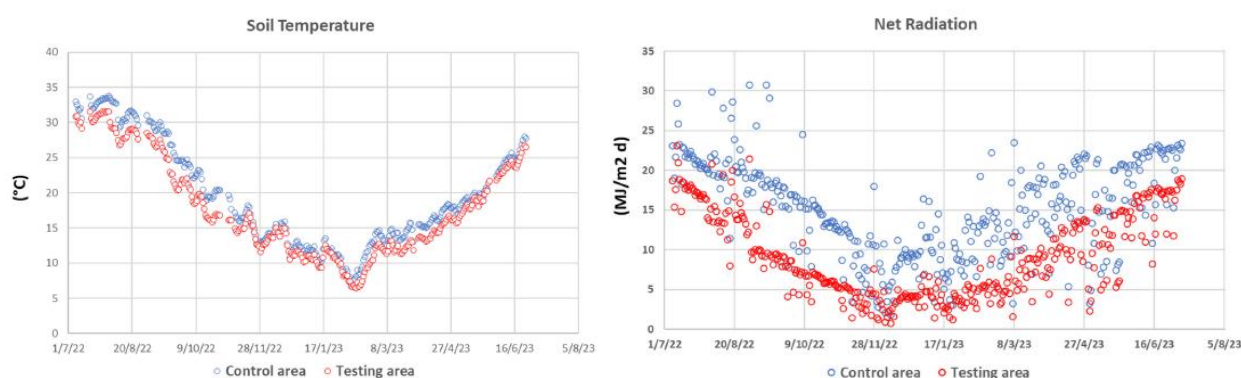


Figura 14. Temperatura do solo (esquerda) e radiação líquida (direita) medidas entre módulos (área de teste) e nas imediações da central (área de controlo). Adaptado de [14].

No estudo de Fagnano *et al.* [14] não foram observadas alterações expressivas na temperatura do ar, evidenciando um papel dominante das trocas energéticas ao nível da superfície. Estes resultados sugerem que, em contexto mediterrânico, a presença de sistemas fotovoltaicos também promove uma redistribuição do balanço energético à

superfície, mas cujos efeitos são sobretudo confinados ao solo e às camadas mais próximas da superfície, não se traduzindo em variações significativas da temperatura do ar ambiente.

De forma complementar, Armstrong *et al.* [15] analisaram o efeito de centrais fotovoltaicas sobre o microclima ao nível do solo e da atmosfera próxima, evidenciando uma modulação do regime térmico ao longo do ciclo diário. Os autores realizaram medições em três localizações distintas, por baixo dos painéis (Figura 15a), entre fileiras de painéis (Figura 15b) e nas imediações da central (Figura 15c).

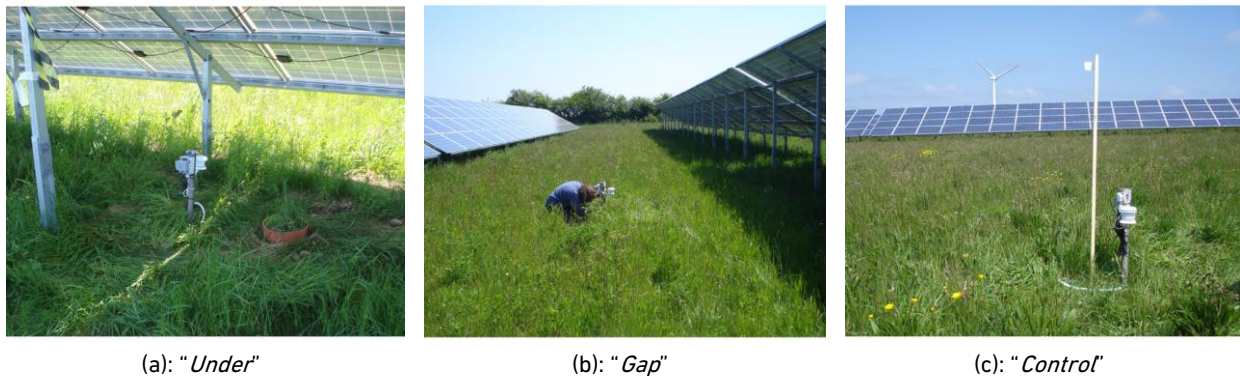


Figura 15. Localizações das sondas de medição (adaptado de [15])

De acordo com os resultados obtidos por Armstrong *et al.* [15], no caso da temperatura do solo (Figura 16a e Figura 16b), observou-se um arrefecimento nas áreas sob os módulos durante o verão enquanto, no inverno, verificou-se que ocorre uma inversão parcial deste padrão, com temperaturas ligeiramente mais elevadas sob os painéis. Este comportamento reflete a redução da radiação incidente e das perdas de calor por radiação, evidenciando o papel do sombreamento nas alterações ao balanço energético.

Por outro lado, a análise à temperatura do ar (Figura 16c e Figura 16d) mostra que as diferenças entre zonas são reduzidas e pouco expressivas, tanto no verão como no inverno, indicando que as alterações induzidas pelos módulos fotovoltaicos permanecem essencialmente confinadas à superfície, mesmo dentro da área ocupada pela central.

Estes resultados indicam a existência de um desacoplamento entre o comportamento térmico do solo e do ar, reforçando as conclusões do estudo de Fagnano *et al.* [14], realizado também em contexto climático mediterrânico, segundo as quais a redistribuição do balanço energético à superfície provoca efeitos sobretudo confinados ao solo e às camadas mais próximas da superfície, não se traduzindo em variações significativas da temperatura do ar ambiente.

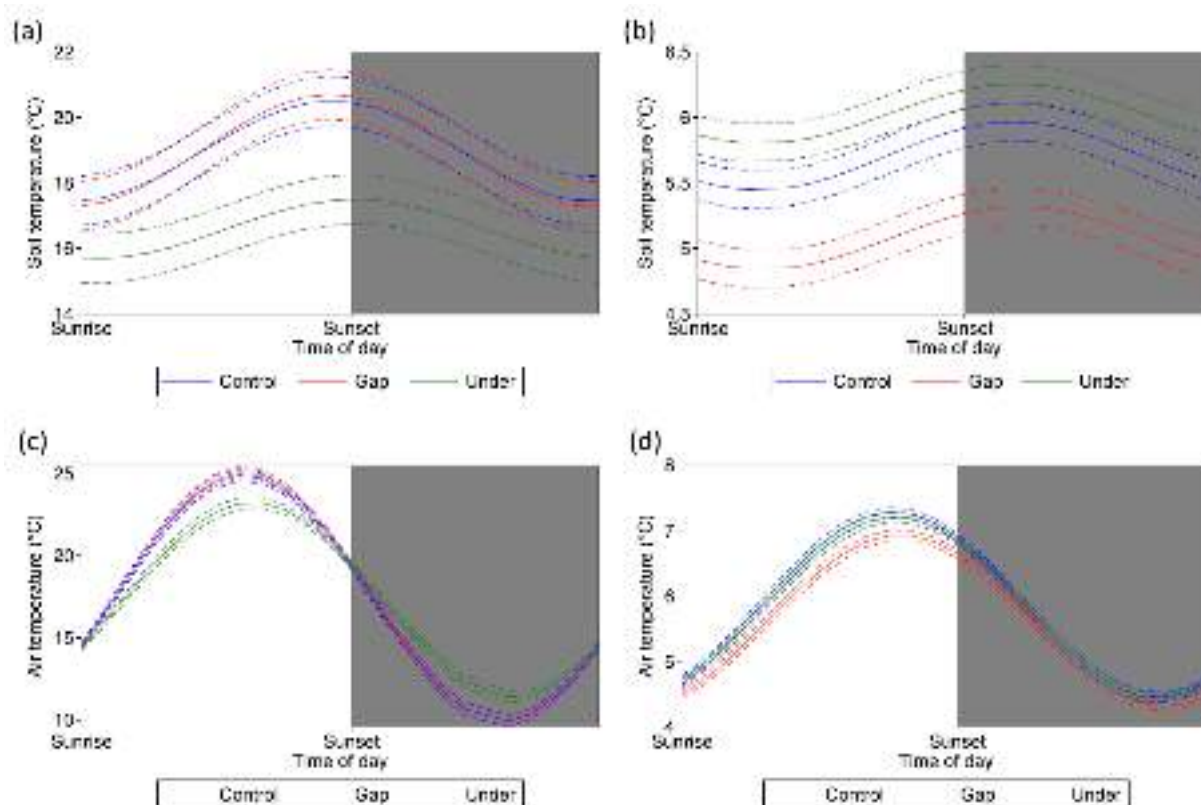


Figura 16. Ciclo diário da temperatura do solo (a: verão, b: inverno) e da temperatura do ar (c: verão, d: inverno) (retirado de [15])

Resultados consistentes são igualmente reportados por Vervloesem *et al.* [16], que analisaram o microclima em diferentes centrais fotovoltaicas em clima mediterrânico, evidenciando que a presença dos módulos conduz a uma redução da radiação incidente e da temperatura de superfície sob os painéis.

Tal como observado nos estudos anteriores, as variações na temperatura do ar revelaram-se pouco expressivas entre as diferentes zonas, reforçando a ideia de que os impactes dos sistemas fotovoltaicos se manifestam predominantemente ao nível da superfície. Estes resultados confirmam, assim, o padrão identificado por Fagnano *et al.* [14] e Armstrong *et al.* [15], evidenciando que os painéis fotovoltaicos atuam sobretudo através da modificação do balanço energético superficial, com efeitos limitados na temperatura do ar ambiente, mas relevantes na redistribuição de energia e na modulação das condições microclimáticas locais.

Em continuidade com os resultados previamente discutidos, Hurduc *et al.* [17] analisaram o impacto de uma central fotovoltaica de cerca de 46 MW instalada no sul de Portugal (Alentejo), recorrendo a séries temporais de dados Landsat-8 [18] que permitiram comparar um período anterior (2013 a 2016) e um período posterior (2019 a 2021) à instalação, bem como a evolução relativa face a uma área de controlo adjacente (ver Figura 17).

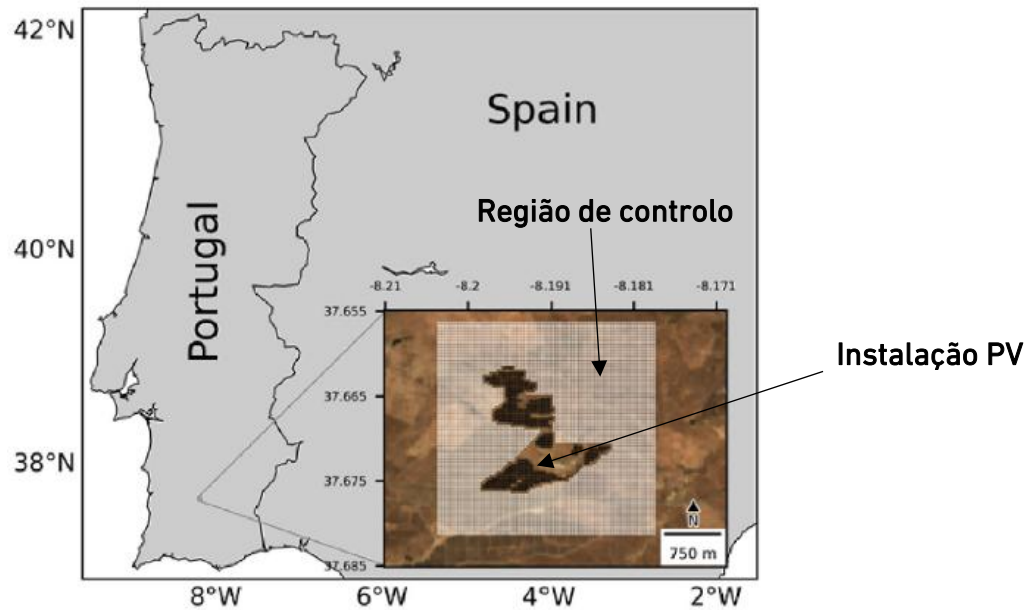


Figura 17. Central Solar Fotovoltaica Ourika e identificação das regiões de controlo e do parque PV (painéis a preto), adaptado de [17]

Os resultados do estudo de Hurduc *et al.* [17] evidenciam um padrão térmico sazonal, onde se observam anomalias negativas da temperatura da superfície do solo (LST) durante os meses mais quentes (junho, julho e agosto – JJA) e positivas durante os meses frios (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF). Em termos quantitativos, verificou-se que, no verão, a temperatura superficial do parque diminuiu cerca de $-0.23\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto a área de controlo apresentou um aumento de $+1.74\text{ }^{\circ}\text{C}$, evidenciando um efeito de arrefecimento relativo associado à presença dos módulos. Por contraste, durante o inverno, a temperatura do solo aumentou cerca de $+0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ no parque e $+1.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ na área de controlo, confirmando a existência de um aquecimento relativo, ainda que menos pronunciado. Relativamente à temperatura do ar, esta foi estimada a partir de uma relação empírica com a temperatura da superfície do solo (ver Figura 18).

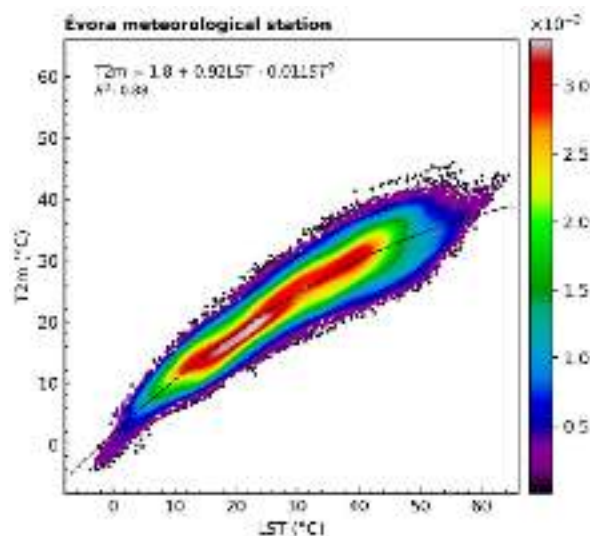


Figura 18. Temperatura da superfície do solo (LST) vs. Temperatura do ar a 2 metros acima do nível do solo (T2m). retirado de [17].

Na temperatura do ar observa-se um comportamento semelhante, mas com menor magnitude, com variações tipicamente inferiores a ± 1 °C, confirmando que os impactos são mais intensos ao nível da superfície do que na camada atmosférica. Mesmo assim, importa reforçar que a temperatura do ar não foi medida, mas sim estimada em função da temperatura da superfície do solo. Na Figura 19, estão representadas as variações médias da temperatura da superfície do solo e da temperatura do ar a 2 metros acima do nível do solo, depois da instalação da Central Solar Fotovoltaica Ourika.

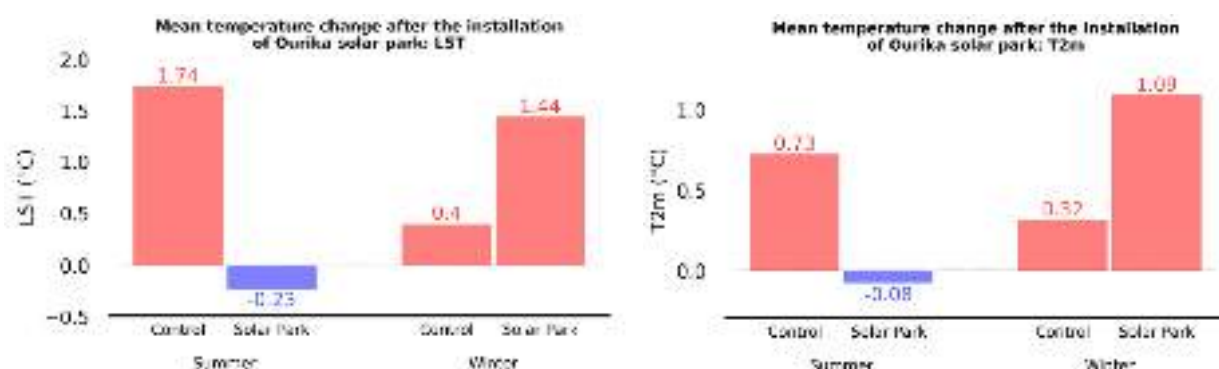


Figura 19. Variação média da temperatura da superfície do solo (esquerda) e da temperatura do ar a 2 metros acima do nível do solo (direita), adaptado de [17]

No seu conjunto, os resultados demonstram que, em contexto climático mediterrânico em território português, os sistemas fotovoltaicos induzem uma redistribuição do balanço energético superficial com alguma expressão sazonal, promovendo um arrefecimento do solo no verão e aquecimento relativo no inverno, em linha com os padrões observados por outros estudos em contexto climático mediterrânico (Fagnano *et al.* [14], Armstrong *et al.* [15], Vervloessem *et al.* [16]).

2.5. Síntese da revisão bibliográfica

A literatura científica analisada mostra que os impactos microclimáticos de centrais fotovoltaicas não podem ser descritos de forma universal através do conceito de *photovoltaic heat island*, na medida em que os efeitos observados dependem fortemente do contexto climático, do uso do solo pré-existente, da configuração das instalações e da metodologia utilizada na sua avaliação. Em termos gerais, os estudos mais robustos apontam para uma redistribuição do balanço energético à superfície, caracterizada por redução da radiação incidente no solo, diminuição do fluxo de calor no solo e alteração da partição da energia disponível, com aumento relativo do calor sensível na proximidade dos módulos durante o período diurno.

Esta redistribuição energética traduz-se, na maioria dos casos, num arrefecimento da superfície ou do solo sob os painéis e num eventual aquecimento moderado do ar na camada

atmosférica imediatamente adjacente aos módulos, sem evidência consistente de acumulação térmica persistente durante o período noturno.

Os trabalhos mais recentes, baseados em observações instrumentadas, modelação física explícita e análise por satélite, convergem na conclusão de que os efeitos térmicos são predominantemente locais, temporários e fortemente condicionados pela tipologia do terreno e pela geometria da instalação.

A interpretação dos resultados deve distinguir claramente entre aquecimento do ar próximo dos módulos, arrefecimento da superfície sombreada e variações observadas à escala regional. No seu conjunto, a evidência científica disponível suporta a ideia de que os sistemas fotovoltaicos induzem sobretudo uma modulação microclimática local, de magnitude relativamente reduzida e confinada à área ocupada pela central, e não um efeito térmico generalizado ou extensível a escalas regionais.

Relativamente à mitigação, os estudos analisados indicam que a manutenção ou introdução de cobertura vegetal pode contribuir para moderar as condições térmicas locais, através do sombreamento e do aumento da evapotranspiração. Este potencial é particularmente referido em soluções agrivoltaicas ou em cenários com vegetação sob e entre as filas de módulos. Contudo, a literatura analisada não permite quantificar a eficácia específica de plantações ou cortinas arbóreas perimetrais como medida de mitigação. Estas estruturas podem introduzir efeitos concorrentes, nomeadamente aumentar o sombreamento e a evapotranspiração, mas também reduzir a ventilação local. A avaliação da sua eficácia exige, por isso, uma análise específica da geometria da central, dos ventos dominantes, das espécies vegetais e das condições locais.

Em síntese, a revisão bibliográfica permite estabelecer três conclusões fundamentais:

- Os efeitos microclimáticos das centrais fotovoltaicas são, em regra, espacialmente confinados à área ocupada pela instalação e às camadas atmosféricas mais próximas da superfície. Quando se propagam para a envolvente, tendem a dissipar-se a distâncias da ordem das dezenas a poucas centenas de metros, dependendo da configuração da instalação e das condições atmosféricas, tornando os seus efeitos inexpressivos para aglomerados e povoações vizinhas. Os estudos analisados não evidenciam alterações térmicas relevantes à escala regional ou sub-regional.
- A resposta térmica difere consoante a variável analisada, sendo frequente observar-se um arrefecimento da superfície ou do solo e alterações reduzidas, mas por vezes mensuráveis, na temperatura do ar.

- A deteção de efeitos atribuíveis à presença da central exige metodologias que controlem adequadamente a variabilidade meteorológica natural e as diferenças de uso do solo entre as áreas comparadas.

Neste enquadramento, a análise do caso de estudo da Central Solar Fotovoltaica da Amareleja assume particular relevância, pois permite avaliar, num contexto climático mediterrânico do sul de Portugal, se a instalação da central está associada a uma assinatura térmica local detetável, e em que medida essa assinatura é compatível com os mecanismos físicos identificados na literatura. A aplicação de uma abordagem comparativa baseada no método *Differences-in-Differences* (DiD) procura precisamente responder a esta questão, distinguindo efeitos potencialmente atribuíveis a intervenções locais das variações climáticas de fundo observadas à escala regional.

3. Caso de Estudo da Central Fotovoltaica da Amareleja

Na presente secção, será efetuada uma análise de dados meteorológicos da temperatura do ar, com base em medições de uma estação local situada nas proximidades da Central Solar Fotovoltaica (CSF) da Amareleja, em conjunto com dados provenientes de modelos de macroescala. O objetivo consiste em avaliar a existência de possíveis impactos microclimáticos na região da Amareleja e áreas envolventes, bem como determinar se esses impactos podem ser claramente associados à presença da central.

A CSF da Amareleja foi selecionada como caso de estudo por constituir um dos casos nacionais mais adequados para uma análise comparativa de longo termo, sendo que simultaneamente representa no enquadramento nacional um caso de elevada analogia com o contexto da Central Fotovoltaica Sophia:

- a central encontra-se em operação desde 2008, apresenta uma dimensão relevante;
- dispõe de uma estação meteorológica situada na sua proximidade, para a qual existem dados que abrangem os períodos anterior e posterior à instalação. Esta combinação permite analisar a evolução relativa da temperatura local face a condições meteorológicas regionais de referência;
- adicionalmente, a estação meteorológica situa-se entre a central solar e a povoação da Amareleja, permitindo assim aferir da potência influência térmica sobre aglomerados na vizinhança de centrais fotovoltaicas (assumindo-se como um cenário mais conservador que o da Central Fotovoltaica de Sophia, uma vez que Amareleja dista cerca de 300m da povoação, enquanto que a povoação mais próxima da Central de Sophia dista cerca de 800m);
- a seleção do caso de estudo considera também o contexto de uso do solo. Antes da construção da central, a área de implantação integrava uma matriz agroflorestal heterogénea, composta por culturas de sequeiro e manchas de pinheiro e azinheira. Embora existam diferenças entre os territórios, esta heterogeneidade apresenta algumas características conceptualmente comparáveis com a matriz rural e agroflorestal existente na área de desenvolvimento da Central Fotovoltaica Sophia;
- por fim, a análise comparativa dos principais parâmetros climáticos extraíveis das normais climatológicas da estação de Amareleja e de estações no contexto da região da Beira mostram valores próximos (tendencialmente mais gravosos no caso da Amareleja, constituindo assim um cenário mais desfavorável e uma posição de análise mais conservadora), conforme os quadros seguintes:

Tabela 1. Análise comparativa de normais climatológicas para as estações climatológicas de Fundão, Castelo Branco (representativas do contexto da Beira Baixa) e Amareleja (caso de estudo)

INDICADORES CLIMÁTICOS	NORMAL CLIMATOLÓGICA 1981-2010 (°C)			NORMAL CLIMATOLÓGICA 1991-2020 (°C)			VARIAÇÃO 1991-2020 1981-2010 (%)		
	Fundão	Castelo Branco	Amareleja	Fundão	Castelo Branco	Amareleja	Fundão	Castelo Branco	Amareleja
Temperatura média anual média (°C)	17.0	15.9	17.0	17.4	16.1	17.4	2.0	1.3	2.4
Temperatura média anual máxima (°C)	24.1	21.2	24.1	24.4	21.6	24.4	2.0	1.9	1.2
Temperatura média anual mínima (°C)	10.0	10.5	10.0	10.3	10.6	10.3	0.0	1.0	3.0
Temperatura >=35°C (n.º dias/ano)	17.3	19.0	48.7	19.9	22.8	52.5	15.0	20.0	7.8
Temperatura <0°C (n.º dias/ano)	15.4	4.9	11.9	18.0	4.6	10.3	16.9	-6.1	-13.4
Maior temperatura máxima anual	42.0	41.6	47.3	42.3	43.5	47.3	0.7	4.6	0.0
Menor temperatura mínima anual	-8.1	-4.8	-7.7	-6.0	-4.8	-7.7	-25.9	0.0	0.0

Fonte: IPMA

3.1. Central Solar Fotovoltaica da Amareleja

A Central Solar Fotovoltaica (CSF) da Amareleja, localizada no concelho de Moura (distrito de Beja), no sul de Portugal, constitui uma das primeiras infraestruturas de grande escala dedicadas à produção de energia solar fotovoltaica no país e na Europa. A central entrou em funcionamento em 2008, tendo sido, na altura, uma das maiores instalações fotovoltaicas do mundo, representando um marco importante no desenvolvimento das energias renováveis em Portugal. O projeto apresenta uma potência instalada de cerca de 46 MWp, ocupando uma área aproximada de 250 hectares e integrando mais de 260 000 módulos fotovoltaicos, muitos dos quais montados em sistemas de seguimento solar que permitem otimizar a captação de radiação solar ao longo do dia. Em termos de produção, a central gera cerca de 93 GWh de eletricidade por ano, o suficiente para abastecer aproximadamente 30 000 habitações [19]. A organização espacial da central, a sua ocupação do solo, bem como a sua localização geográfica encontram-se representadas na Figura 20.



(a)

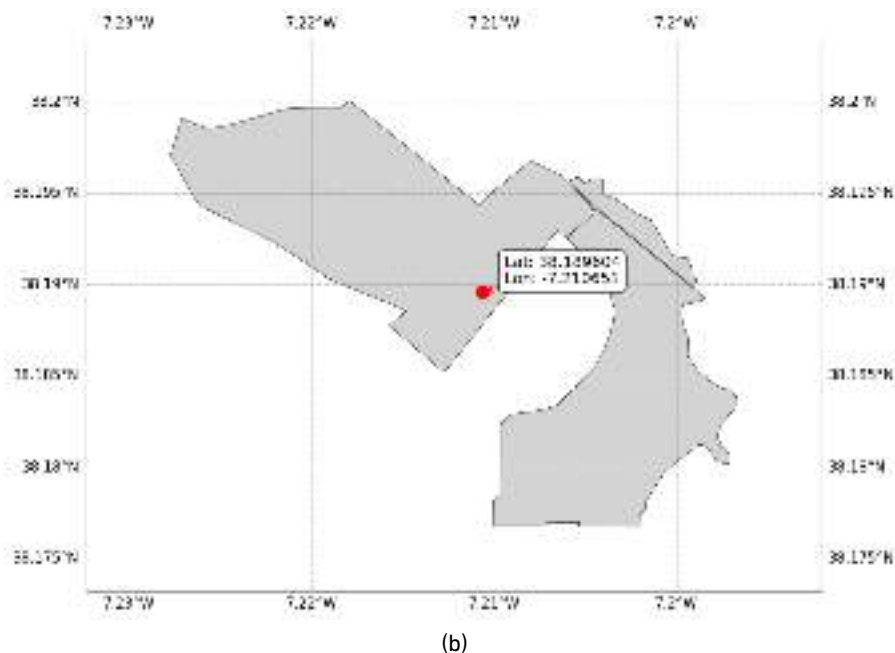


Figura 20. (a) Vista aérea da CSF da Amareleja, obtida a partir do Google Earth; (b) Localização geográfica da CSF da Amareleja, com indicação das coordenadas do centro geométrico da instalação.

A Carta de Uso e Ocupação do Solo de 2007 (Figura 21), correspondente ao período imediatamente anterior à construção da CSF da Amareleja, mostra que a área de implantação da central se inseria numa matriz agroflorestal, não correspondendo a uma superfície homogénea de solo exposto. Observa-se, de forma parcial, a presença de manchas de pinheiro e azinheira, intercaladas com áreas de culturas de sequeiro. Este enquadramento é relevante para a interpretação dos resultados térmicos, uma vez que o uso do solo pré-existente e a evolução posterior da cobertura vegetal podem influenciar o balanço energético local.

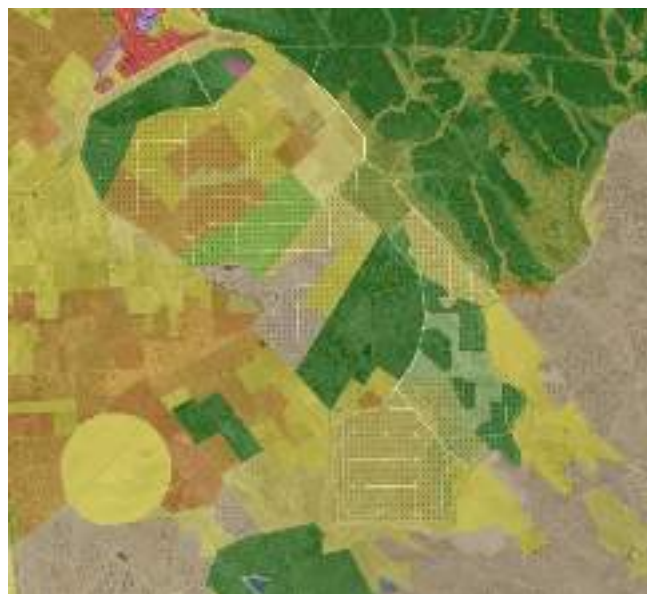


Figura 21. Carta de ocupação do solo de 2007 na área de implantação da CSF da Amareleja e envolvente imediata. As zonas de floresta de pinheiro e azinheira encontram-se representadas a verde escuro e verde claro, respetivamente, e as culturas de sequeiro a amarelo. Fonte: SNIG [20].

3.2. Metodologia

Foram analisados dados de temperatura do ar provenientes de uma estação meteorológica localizada nas proximidades da Central Solar Fotovoltaica da Amareleja, bem como em diferentes pontos da sua vizinhança. Para todos os pontos considerados na área envolvente da central (descritos na Tabela 2 e representados na Figura 22), foram extraídas séries temporais da temperatura do ar a 2 metros de altura (T2m). As séries temporais foram sincronizadas para um período comum de análise compreendido entre 01/01/1998 09:00 UTC e 01/12/2025 08:00 UTC, correspondente ao intervalo em que existe sobreposição entre os dados disponíveis para o local de estudo e para o local de referência. A utilização deste período comum garante que as comparações entre séries são efetuadas sobre uma base temporal consistente.

Os dados relativos a estes pontos adicionais foram obtidos a partir de modelos de macroescala, nomeadamente o modelo ERA5 [21] e a API Open-Meteo [22] que disponibiliza dados derivados de diferentes modelos meteorológicos [21], [23], [24]. O ponto correspondente à estação meteorológica local foi definido como representativo das condições na proximidade imediata da central (“*Amareleja-climatologica – IPMA* (Local de Estudo)”), enquanto o ponto do modelo de macroescala mais próximo (e simultaneamente a uma distância – 3.42km dos limites da central – claramente superior ao alcance espacial dos potenciais efeitos microclimáticos identificado na literatura) foi considerado como referência de larga escala (“*Amareleja_northeast_OM* (Local de Referência)”). Os restantes pontos foram utilizados para construir uma grelha espacial, permitindo a geração de mapas de temperatura na região envolvente da central e, assim, avaliar a existência de possíveis variações espaciais associadas à sua presença. Esta abordagem permite isolar potenciais desvios entre condições locais observadas e o comportamento esperado à escala regional.

Tabela 2. Localizações das séries temporais de temperatura

Designação	LAT	LON	Distância ao Centro Geométrico (km)	Distância aos limites da central (km)
<i>Amareleja-climatologica – IPMA</i> (Local de Estudo)	38.2006	-7.2260	1.82	0.19
<i>Amareleja_northeast_OM</i> (Local de Referência)	38.2074	-7.1660	4.38	3.42
<i>OM_Amareleja_northwest</i>	38.2074	-7.2874	6.99	5.35
<i>OM_Amareleja_southeast</i>	38.1371	-7.1563	7.53	5.95
<i>OM_Amareleja_southwest</i>	38.1371	-7.2776	8.27	7.38
<i>ERA5_Amareleja_northeast</i>	38.2500	-7.0000	19.59	18.63
<i>ERA5_Amareleja_northwest</i>	38.2500	-7.2500	7.54	6.00
<i>ERA5_Amareleja_southeast</i>	38.0000	-7.0000	28.01	26.44
<i>ERA5_Amareleja_southwest</i>	38.0000	-7.2500	21.36	19.93

Designação	LAT	LON	Distância ao Centro Geométrico (km)	Distância aos limites da central (km)
<i>OM_Santo_Aleixo_da_Restauração</i>	38.0668	-7.1467	14.76	13.13
<i>OM_Sobral_da_Adiça</i>	38.0668	-7.2679	14.54	13.22
<i>OM_Oliva_de_la_Frontera</i>	38.2074	-7.0446	14.65	13.58
<i>OM_Barrancos</i>	38.1371	-7.0350	16.43	14.99
<i>OM_Tomina</i>	38.0668	-7.0256	21.18	19.61
<i>ERA5_Alqueva</i>	38.2500	-7.5000	26.15	24.55
<i>ERA5_Serpa</i>	38.0000	-7.5000	32.95	32.12



Figura 22. Localização dos pontos onde existe uma série temporal de temperatura conhecida (imagem adaptada a partir do Google Earth)

3.2.1. Método *Differences in Differences* (DiD)

Para isolar o impacto da intervenção, será necessário estimar como o local teria evoluído na ausência dessa mesma intervenção. O método DiD (*Differences in Differences*) fá-lo de forma observável utilizando um local de referência sujeito ao mesmo clima regional, mas sem a intervenção. Esta comparação permite distinguir a evolução natural do clima das alterações adicionais associadas à intervenção.

Em estudos ambientais com séries de longo termo, há sempre vários processos a acontecer ao mesmo tempo:

- Ciclo sazonal;
 - Ciclo diurno;
- } Com o método DiD, os efeitos comuns aos dois locais cancelam-se ao comparar a diferença entre dois locais (local em estudo e local de referência) antes e depois da intervenção.
-
- Variabilidade inter-anual;
 - Mudanças climáticas globais;
 - Eventos extremos;
 - Tendências regionais
- } Efeitos controlados pelo método DiD, por afetarem ambos os locais de forma semelhante.

Assim, sob a hipótese de evolução paralela entre o local de estudo e o local de referência na ausência da intervenção, as diferenças remanescentes podem ser interpretadas como uma estimativa do efeito associado a alterações locais, incluindo a instalação fotovoltaica.

Análise DiD aplicada a este caso de estudo

A aplicação do método *Differences-in-Differences* (DiD) a este caso de estudo baseia-se na comparação entre a evolução da temperatura num local de estudo (na proximidade imediata da central) e numa região de referência (ver Figura 23) ao longo de dois períodos distintos: anterior e posterior à instalação da central.

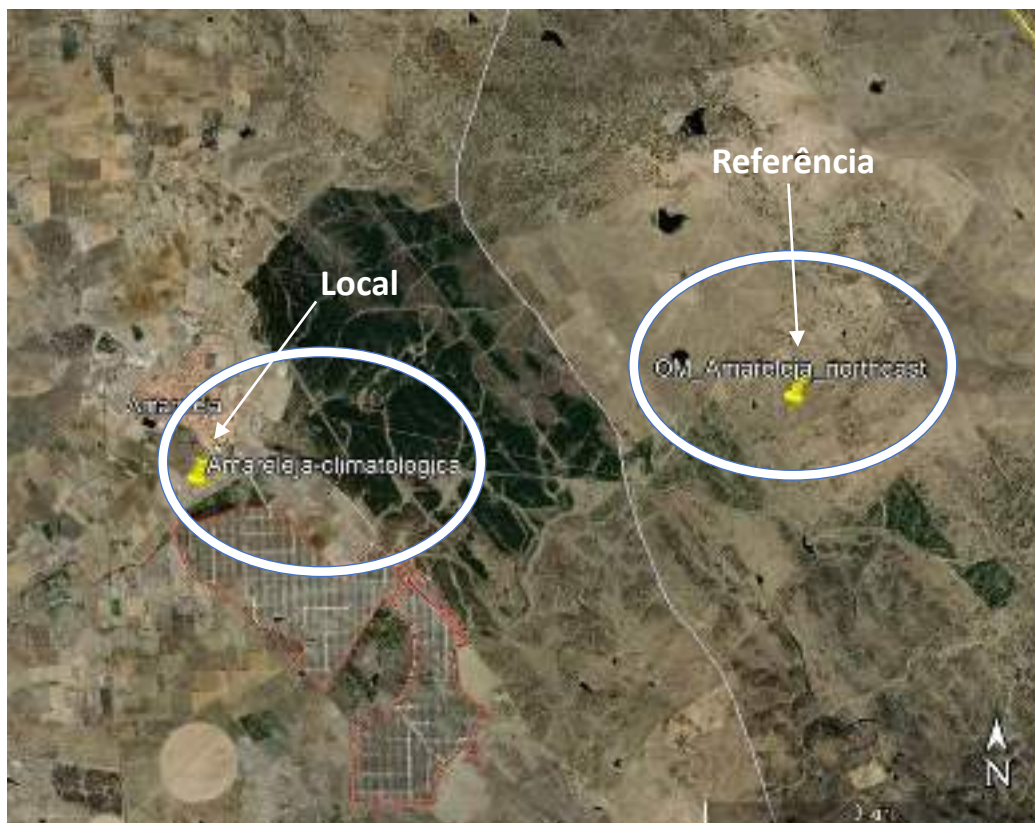


Figura 23. Local de estudo e local de referência a aplicar na análise DiD no âmbito do caso de estudo da CSF da Amareleja

Numa primeira fase, calcula-se a diferença de temperatura entre o ponto local (estação meteorológica) e o ponto de referência (modelo de macroescala) para o período pós-central. De forma análoga, calcula-se essa mesma diferença para o período pré-central. Seguidamente, determina-se a diferença entre estas duas quantidades (pós – pré), obtendo-se assim a estimativa do efeito associado à presença da central fotovoltaica.

Esta metodologia pode ser aplicada a diferentes escalas temporais, nomeadamente ao ciclo diário ou ao ciclo mensal, através da análise das diferenças das diferenças (DiD) ao longo de todos os dias pertencentes aos períodos definidos como pré e pós-instalação.

A estimativa do efeito é dada por:

$$\Delta\Delta T = \overbrace{[T_s(t) - T_r(t)]_{\text{post}}}^{\Delta T_{\text{post}}} - \overbrace{[T_s(t) - T_r(t)]_{\text{pre}}}^{\Delta T_{\text{pre}}} \quad (1)$$

Em que,

$T_s(t)$ – Série temporal horária da temperatura no local de estudo;

$T_r(t)$ – Série temporal horária da temperatura no local de referência;

ΔT_{post} – Diferença de temperatura entre o local de estudo e o local de referência no período pós-instalação da central;

ΔT_{pre} – Diferença de temperatura entre o local de estudo e o local de referência no período pré-instalação da central;

$\Delta\Delta T$ – Diferença entre as diferenças de temperatura nos períodos pós e pré-instalação.

A série temporal horária da temperatura no local de estudo foi construída a partir de dados da estação meteorológica da Amareleja (IPMA) [25]. Aproximadamente 85% dos dados utilizados correspondem a observações horárias, enquanto os restantes 15% correspondem a períodos para os quais não se encontravam disponíveis dados horários.

Para o preenchimento destes períodos em falta, foi aplicado um procedimento de reconstrução da temperatura horária baseado na estrutura do ciclo diário de temperatura do ponto de referência. Assim, nos períodos sem dados horários observados, os padrões horários provenientes do ponto de referência foram ajustados de forma a respeitar os valores máximos, médios e mínimos diários registados na estação do local de estudo. A descrição detalhada do método de reconstrução utilizado pode ser consultada no Anexo A.1.

3.3. Resultados

Na presente secção, procede-se à análise dos resultados obtidos com base na metodologia descrita anteriormente, considerando diferentes escalas temporais e espaciais. Em

particular, são analisados os ciclos diário e anual da temperatura do ar, bem como as diferenças entre os períodos pré e pós-instalação da central fotovoltaica.

Adicionalmente, é realizada uma análise espacial da temperatura na região envolvente, recorrendo à construção de mapas de temperatura e de diferenças de temperatura, com base nos pontos para os quais existem séries temporais disponíveis. Esta abordagem permite identificar padrões espaciais e avaliar a eventual existência de variações locais associadas à presença da central.

3.3.1. Ciclo diário de temperatura média: local de estudo vs. referência

Na Figura 24, encontra-se representada a média horária da temperatura ao longo do ciclo diário, tanto para o local de estudo como para o local de referência, considerando os períodos anterior (a) e posterior (b) à instalação da CSF da Amareleja.

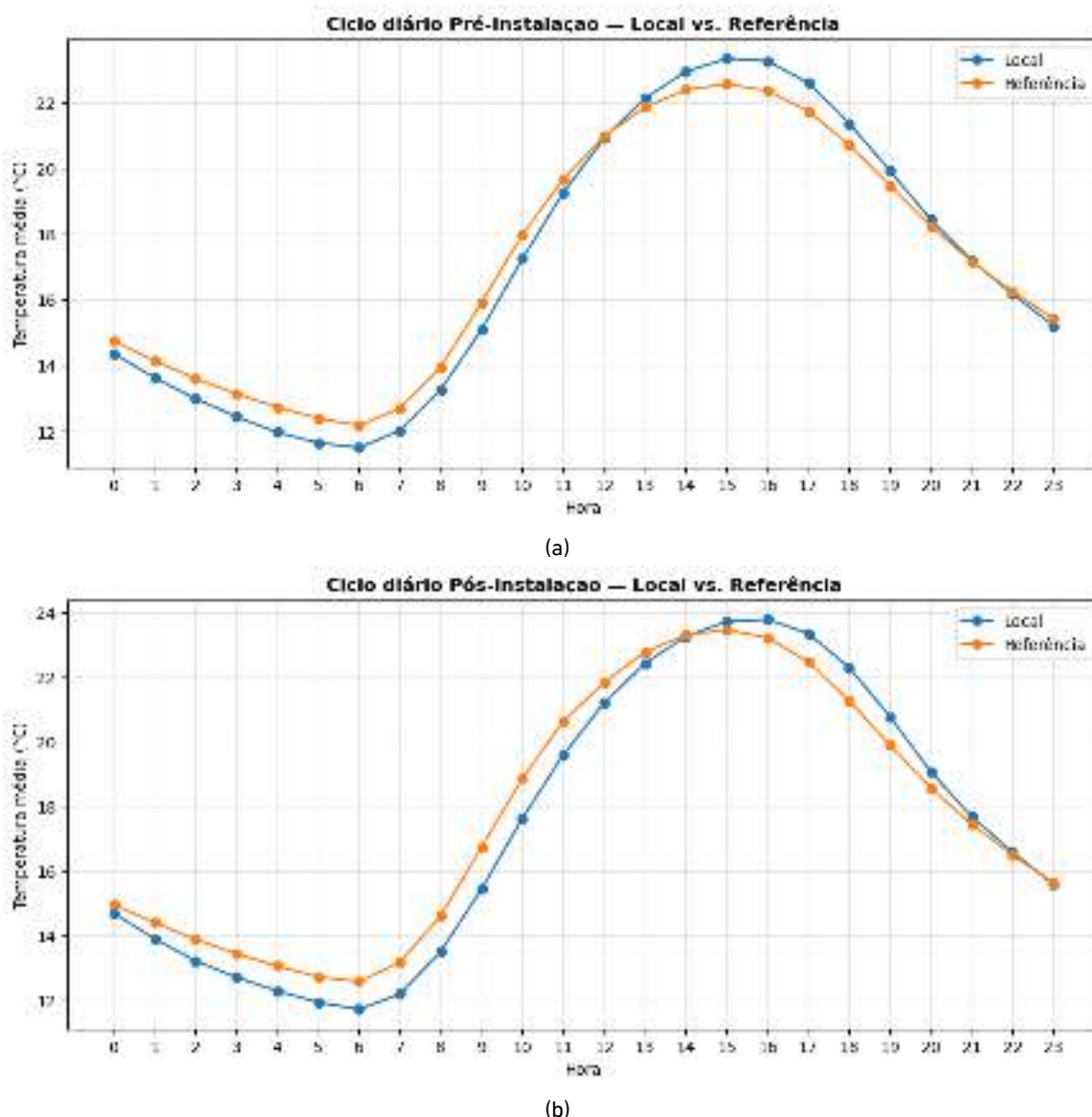


Figura 24. Média horária da temperatura do ar ao longo do ciclo diário, nos períodos (a) pré-instalação e (b) pós-instalação para o local de estudo e para o local de referência.

3.3.2. Análise DiD (ciclo diário de temperatura média)

Com vista a analisar a variação horária média da temperatura do ar, apresentam-se na Figura 25, os resultados obtidos para o ciclo diário, considerando a diferença entre o local e a referência ($T_s(t) - T_r(t)$). A Figura 25a mostra a evolução horária desta diferença para os períodos pós-instalação (ΔT_{post}) e pré-instalação (ΔT_{pre}), permitindo comparar o comportamento térmico a diferentes escalas.

Por sua vez, a Figura 25b apresenta a diferença em diferenças ao longo do ciclo diário, resultado da aplicação direta do método DiD (Equação (1): $\Delta\Delta T = \Delta T_{\text{post}} - \Delta T_{\text{pre}}$).

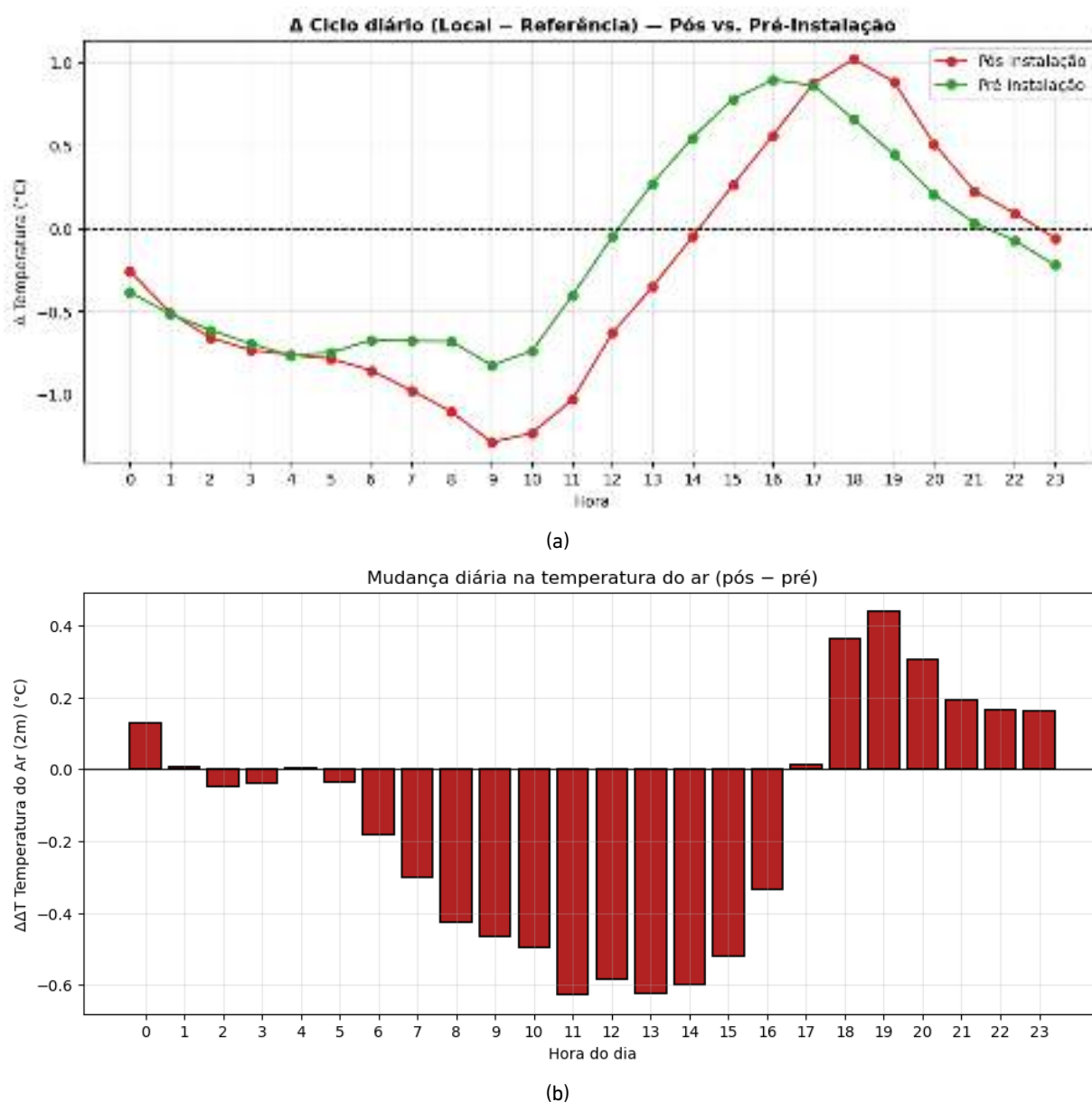


Figura 25. (a) Diferença da temperatura do ar entre o local de estudo e o local de referência ao longo do ciclo diário, para os períodos pré e pós instalação da CSF Amareleja; (b) Diferença entre os períodos pós e pré-instalação ($\Delta\Delta T$), obtida através da aplicação do método DiD.

A análise à Figura 25 evidencia uma ligeira alteração do comportamento térmico relativo entre o local de estudo e o local de referência nos períodos anterior e posterior à instalação da central fotovoltaica. Como observado na Figura 25a, durante grande parte da madrugada, as diferenças entre os dois períodos são reduzidas. A partir das primeiras horas da manhã, a diferença de temperatura entre o local de estudo e a referência torna-se mais negativa no período pós-instalação, mantendo-se inferior à observada no período pré-instalação até aproximadamente às 16:00.

A partir das 17:00, verifica-se uma inversão deste comportamento, passando a diferença local-referência a ser superior no período pós-instalação. A aplicação do método DiD aos ciclos diários (Figura 25b) confirma que os valores de $\Delta\Delta T$ não apresentam um sinal uniforme ao longo do dia. Entre aproximadamente as 06:00 e as 16:00, os valores são negativos, indicando uma redução da temperatura relativa do local de estudo face à referência entre os períodos pré e pós-instalação. A maior magnitude ocorre entre as 11:00 e as 14:00, com valores de $\Delta\Delta T$ próximos de -0.6°C .

A partir das 17:00, os valores de $\Delta\Delta T$ tornam-se positivos. O aumento relativo é mais acentuado entre as 18:00 e as 20:00, atingindo um valor máximo próximo de $+0.4^{\circ}\text{C}$ às 19:00. Durante as últimas horas do dia, os valores permanecem positivos, mas apresentam uma diminuição progressiva da magnitude. Entre aproximadamente as 00:00 e as 05:00, os valores de $\Delta\Delta T$ encontram-se geralmente próximos de zero.

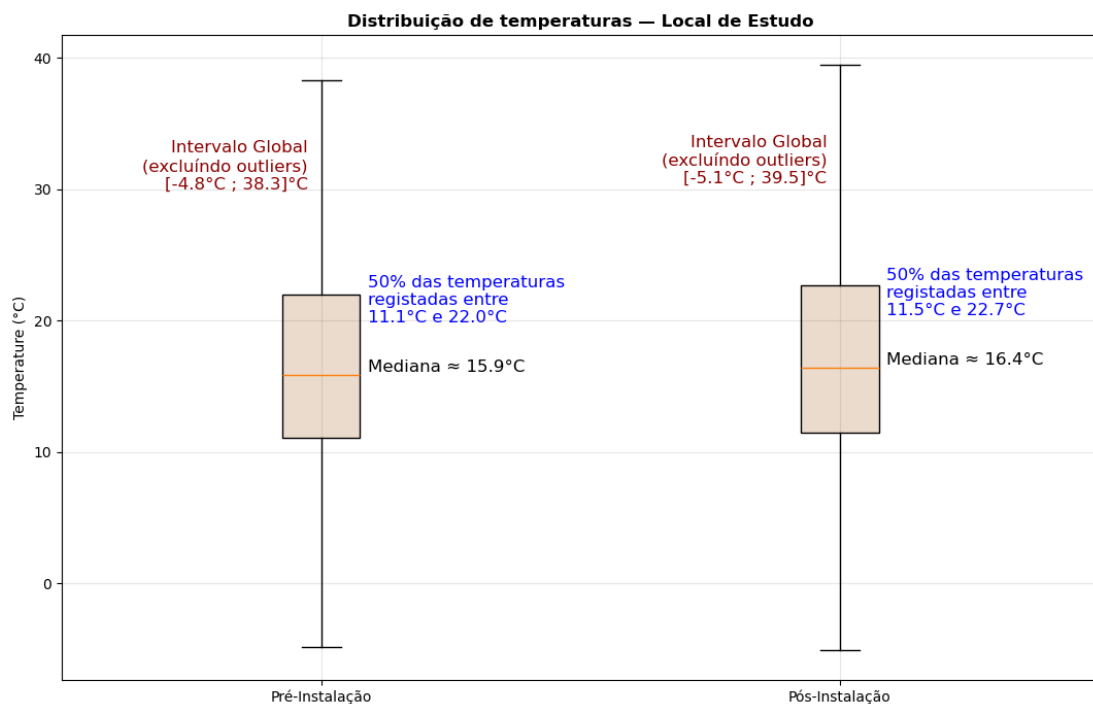
Em conjunto, os resultados indicam uma ligeira alteração intradiária não uniforme da temperatura relativa no local de estudo. Observa-se uma atenuação relativa da temperatura durante a manhã e o início da tarde, seguida de um aumento relativo ao final da tarde e nas primeiras horas da noite.

Este padrão é globalmente compatível com os resultados reportados em estudos realizados em clima mediterrânico, que indicam que a presença dos módulos fotovoltaicos pode modular o ciclo térmico local, reduzindo o aquecimento durante o período diurno e limitando o arrefecimento após o pôr do sol. Contudo, esta concordância deve ser interpretada com prudência, uma vez que os efeitos descritos na literatura são geralmente mais evidentes na temperatura do solo ou da superfície do que na temperatura do ar.

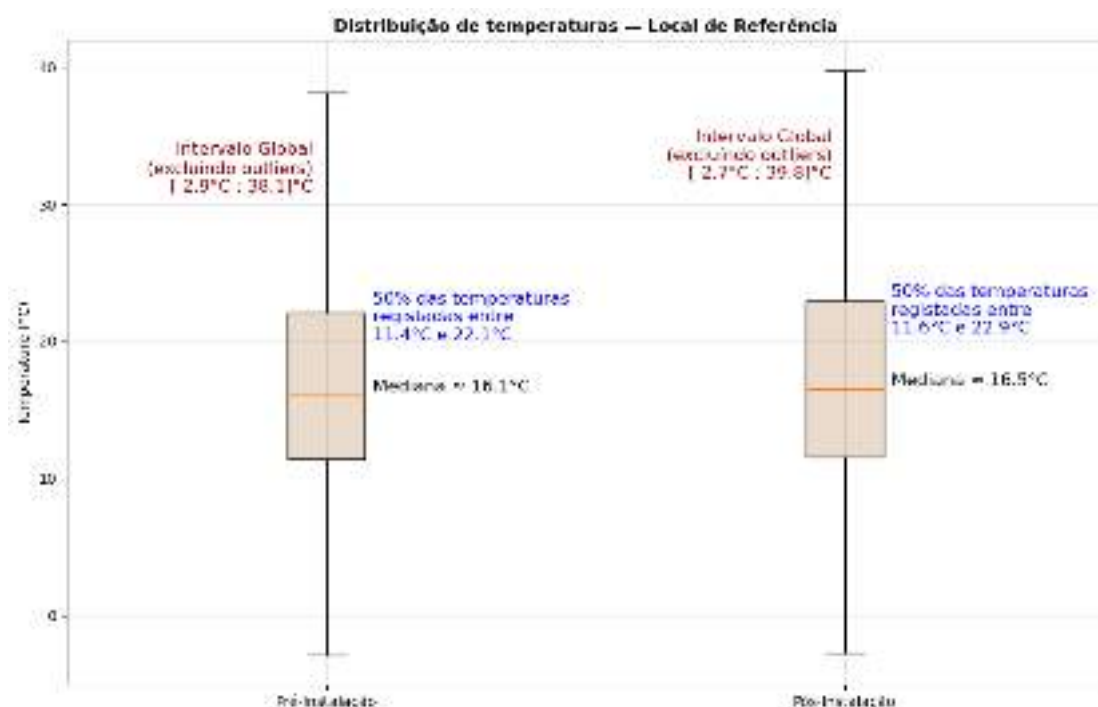
3.3.3. Distribuição global de temperaturas no local de estudo e no local de referência

Com o objetivo de complementar a análise anterior e fornecer uma visão global das condições térmicas nos dois locais considerados, procede-se nesta secção à análise da

distribuição global das séries temporais da temperatura do ar no local de estudo e no local de referência, para os períodos pré e pós instalação da CSF da Amareleja.



(a)



(b)

Figura 26. Resumo global das séries temporais da temperatura (pré vs. pós-instalação da CSF da Amareleja) analisadas para o local de estudo (a) e para o local de referência (b).

A análise aos resultados apresentados na Figura 26 evidencia que a distribuição global das temperaturas é semelhante entre os períodos pré e pós instalação, tanto no local de referência como no local de estudo. Em ambos os casos, os intervalos de variação, medianas

e intervalos interquartis apresentam valores próximos, indicando que não ocorreram alterações relevantes ao nível do regime térmico global.

No local de referência, observa-se uma ligeira deslocação da mediana para valores superiores no período pós-instalação, acompanhada por um aumento marginal da temperatura máxima. Este comportamento sugere uma tendência regional de aquecimento, consistente com a variabilidade climática de larga escala. No local de estudo, a distribuição das temperaturas mantém-se globalmente semelhante entre os dois períodos, observando-se uma ligeira deslocação da mediana para valores superiores no período pós-instalação. Este comportamento acompanha, em termos gerais, a tendência observada no local de referência.

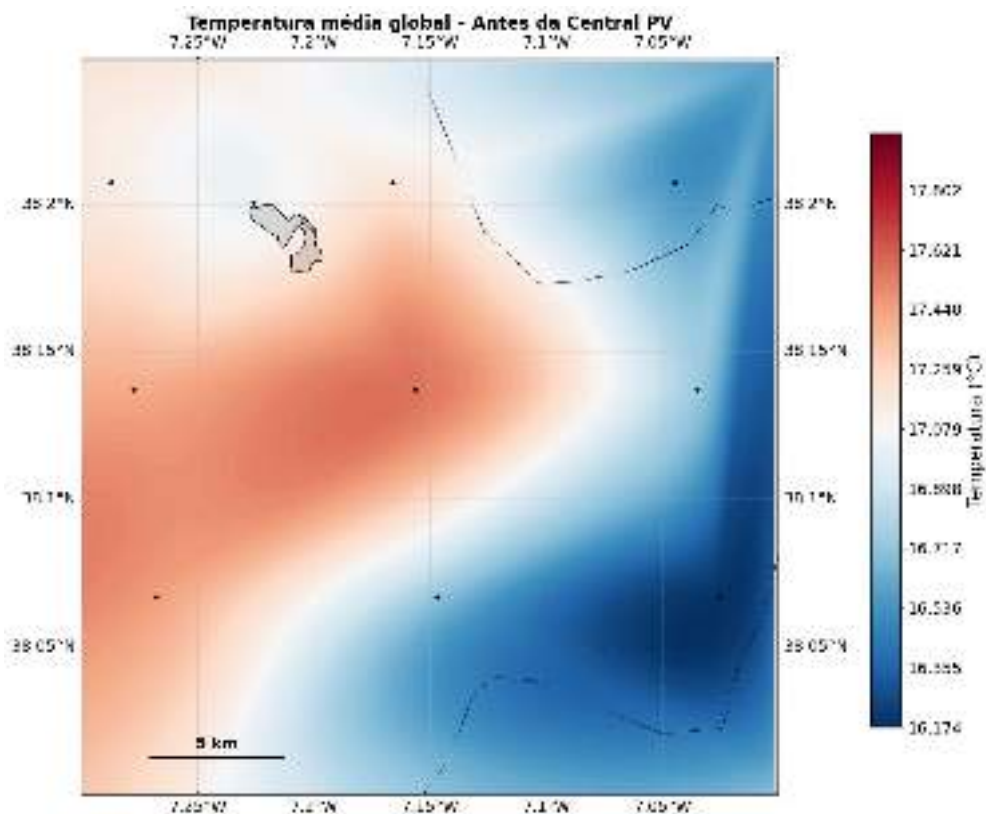
Em conjunto, estes resultados mostram que não ocorreram alterações relevantes na distribuição global das temperaturas. As diferenças identificadas anteriormente manifestam-se sobretudo à escala do ciclo diário, não se traduzindo numa alteração expressiva da distribuição estatística global das temperaturas.

3.3.4. Análise espacial da temperatura média global na região

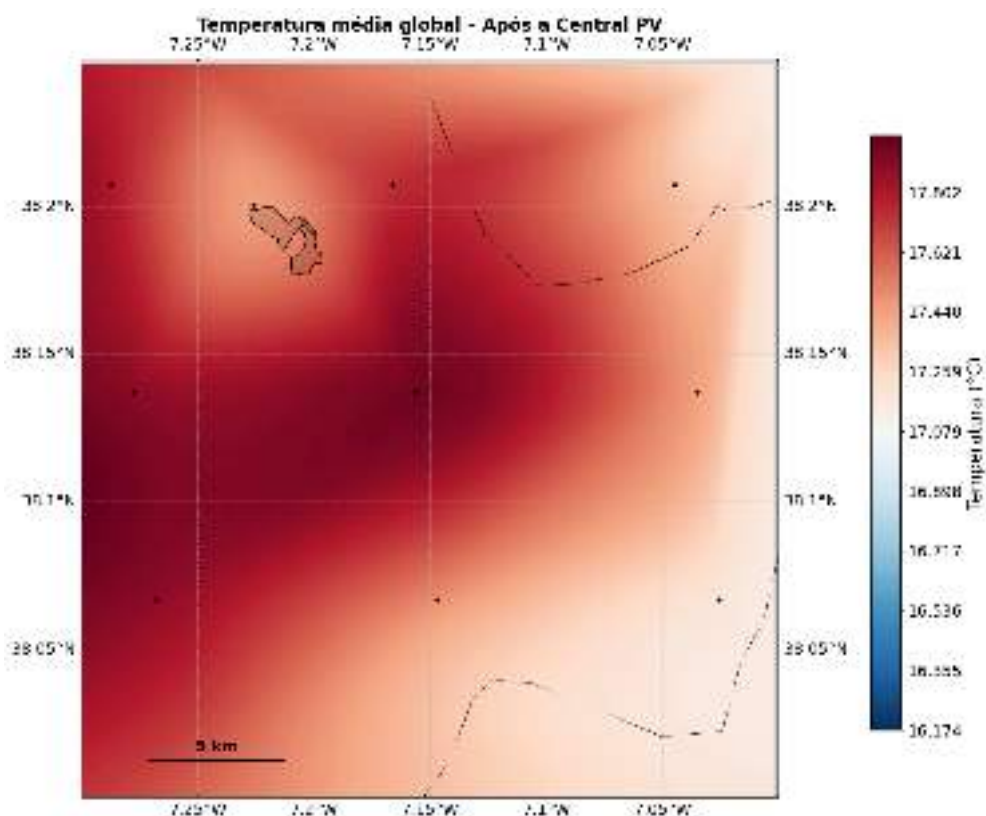
Para complementar a análise temporal apresentada anteriormente, foi efetuada uma caracterização espacial de macroescala da temperatura do ar na região envolvente da CSF da Amareleja.

Para tal, foram construídos mapas de temperatura média global para os períodos anterior e posterior à instalação da central, bem como o respetivo mapa de diferenças, permitindo avaliar a existência de padrões espaciais.

Os mapas foram gerados por interpolação com base num número limitado de pontos. Atendendo à reduzida densidade espacial da amostragem e à combinação de dados observacionais com dados modelados, estes resultados devem ser interpretados como uma caracterização espacial indicativa de macroescala, e não como uma representação microclimática de alta resolução.



(a)



(b)

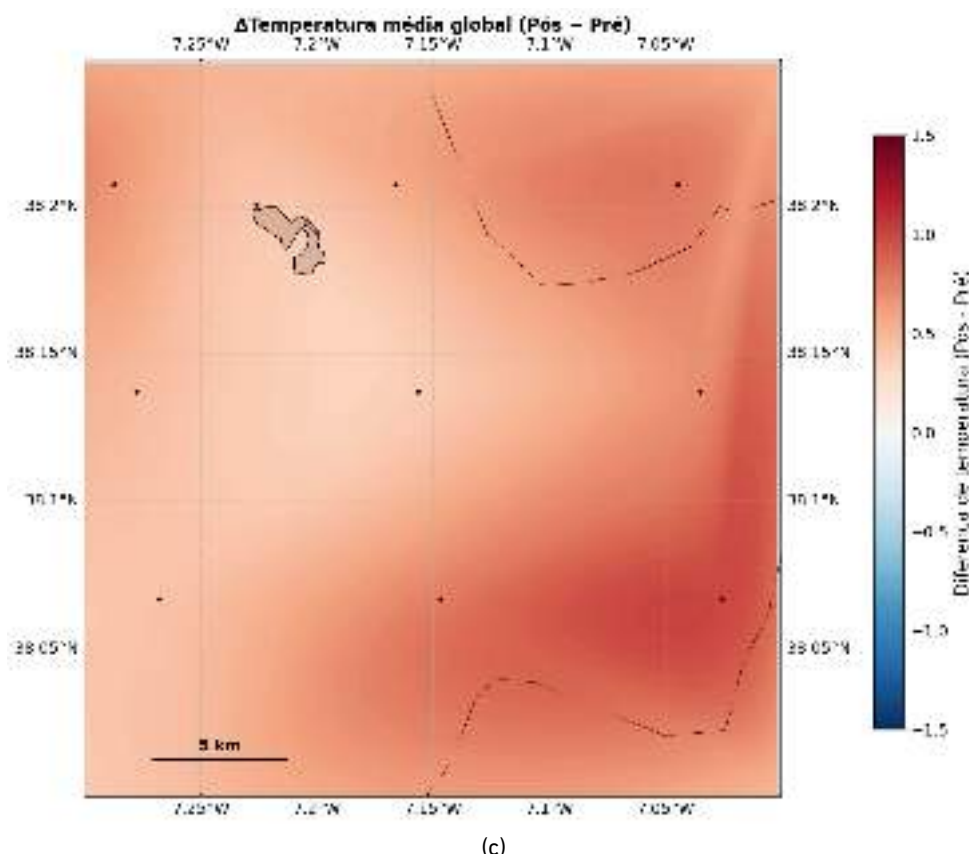


Figura 27. (a) Distribuição espacial da temperatura média global na região envolvente da CSF da Amareleja no período pré-instalação; (b) distribuição espacial da temperatura média global no período pós-instalação; (c) diferença da temperatura média global entre os períodos pós e pré-instalação.

A análise das Figura 27a e Figura 27b evidencia um padrão espacial consistente da temperatura média na região, com diferenças pouco expressivas na sua distribuição entre os períodos pré e pós-instalação. No entanto, observa-se um aumento generalizado da temperatura média no período posterior, no entanto, este aumento não deve ser interpretado como um efeito direto da central fotovoltaica, uma vez que ocorre em toda a área de estudo (incluindo em pontos afastados da central) e não apresenta uma assinatura espacial claramente associada à localização da central. O padrão observado sugere, assim, uma evolução dominada por processos de larga escala, incluindo a variabilidade climática natural e possíveis tendências de aquecimento regional.

O mapa de diferenças apresentado na Figura 27c evidencia alguma variabilidade espacial na magnitude do aumento da temperatura. Contudo, a localização da central fotovoltaica não corresponde claramente a uma zona de aumento mais ou menos pronunciado relativamente à região envolvente. Não se observa, portanto, um gradiente térmico localizado ou uma anomalia espacial centrada na área da central que permita identificar uma assinatura térmica específica associada à instalação. À escala espacial e com a resolução dos dados utilizados, não é possível identificar uma alteração localizada da temperatura média que possa ser associada à presença da central fotovoltaica ou a outras intervenções locais.

As alterações intradiárias identificadas através do método DiD não se traduzem, assim, numa assinatura espacial clara no mapa de diferenças da temperatura média global apresentado na Figura 27c. Este resultado poderá decorrer, em parte, da compensação entre as variações relativas negativas observadas durante a manhã e o início da tarde e as variações positivas registadas ao final da tarde e nas primeiras horas da noite.

Em conjunto, os resultados indicam que as variações da temperatura média global são predominantemente regionais. A utilização de múltiplos pontos de macroescala na envolvente permite igualmente verificar que o aumento da temperatura média não se restringe ao local de estudo, sendo observado de forma generalizada na região analisada. Este aumento generalizado é qualitativamente coerente com o contexto de aquecimento regional considerado nos instrumentos de adaptação climática do Baixo Alentejo, incluindo o Plano Intermunicipal de Adaptação às Alterações Climáticas [26]:

- Aumento da temperatura mínima de 0.4 a 0.5°C esperado entre o período de referência 1970-1999 e o período futuro 2006-2035
- Aumento da temperatura média de 0.4 a 0.5°C esperado entre o período de referência 1970-1999 e o período futuro 2006-2035
- Aumento da temperatura máxima de 0.5 a 0.6 °C esperado entre o período de referência 1970-1999 e o período futuro 2006-2035

Esta comparação deve, contudo, ser entendida apenas como um enquadramento do sinal observado, uma vez que as projeções climáticas utilizam períodos de referência, horizontes temporais e metodologias diferentes dos adotados no presente estudo.

3.3.5. Síntese das variações da temperatura média global e da temperatura média dos extremos diários

Nesta secção é efetuada uma síntese das variações de temperatura observadas no local de estudo e no local de referência, considerando a temperatura média global ao longo do ciclo diário, bem como a média dos extremos diários (temperaturas mínima e máxima). Esta análise permite quantificar diretamente a magnitude das variações térmicas e avaliar, de forma integrada, o comportamento da temperatura média global e dos extremos do ciclo diário. A Figura 28 apresenta a variação da temperatura média global, bem como a variação (entre os períodos pós e pré-instalação) da média das temperaturas máximas e mínimas diárias, no local de estudo e no local de referência.

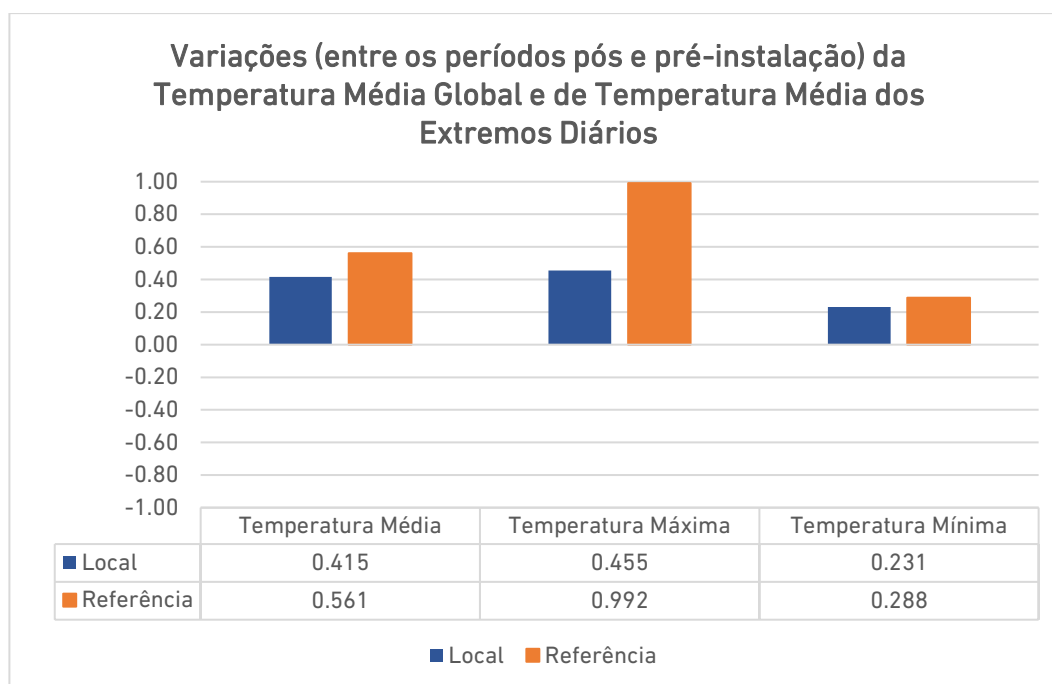


Figura 28. Variações da temperatura média global e da temperatura média dos extremos diários entre os períodos pós e pré-instalação.

A análise da Figura 28 mostra que as variações de temperatura são consistentemente superiores no local de referência relativamente ao local de estudo, para todas as métricas consideradas.

Em particular, a temperatura média global apresenta um aumento de aproximadamente $+0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ na referência, comparativamente a cerca de $+0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ no local de estudo, o que corresponde a um valor de $\Delta\Delta T$ de aproximadamente $-0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Esta diferença é mais evidente na temperatura máxima, onde se observa um aumento próximo de $+0.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ na referência, contrastando com cerca de $+0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ no local de estudo, correspondendo a um valor de $\Delta\Delta T$ de aproximadamente $-0.54\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para a temperatura mínima, as diferenças são menos acentuadas e praticamente negligenciáveis, embora mantenham o mesmo comportamento, com aumentos de aproximadamente $+0.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ na referência e $+0.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ no local de estudo, o que corresponde a um $\Delta\Delta T$ de cerca de $-0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para além da análise da temperatura média global, estes resultados permitem também avaliar explicitamente o comportamento dos extremos do ciclo diário. Observa-se que a diferença entre o local de estudo e a referência é mais pronunciada na temperatura máxima do que na temperatura mínima, indicando que a atenuação relativa do aumento da temperatura se manifesta sobretudo nos valores máximos diários.

3.3.6. Variações sazonais da temperatura média e dos extremos diários

Nesta secção, é efetuada uma avaliação das variações de temperatura por estação do ano, considerando separadamente o verão (meses de junho, julho e agosto: JJA) e o inverno (meses de dezembro, janeiro e fevereiro: DJF). Esta análise permite aprofundar a interpretação dos resultados, distinguindo o comportamento sazonal da temperatura média global e dos extremos diários (máximos e mínimos), e permitindo a avaliação de possíveis dependências sazonais dos possíveis efeitos.

A Figura 29 apresenta as variações da temperatura média diária nos dois períodos sazonais.

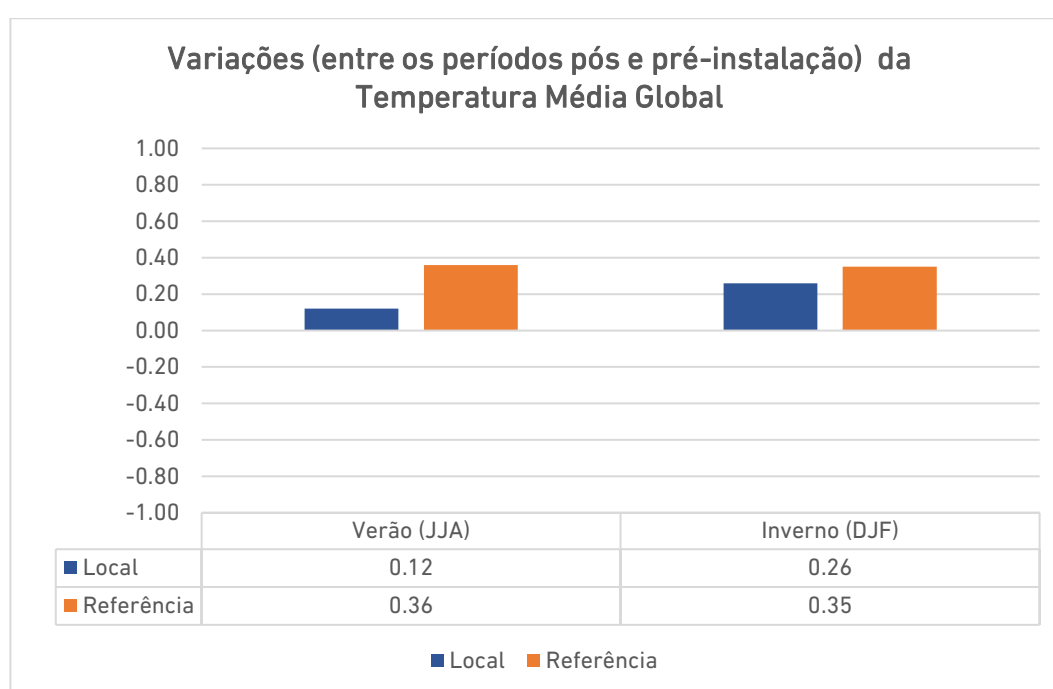


Figura 29. Variações sazonais da temperatura média global entre os períodos pós e pré-instalação

Observa-se que, no local de referência, a temperatura média aumenta de forma semelhante no verão e no inverno, com valores próximos de $+0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$, respetivamente. No local de estudo, o aumento é inferior ao observado no local de referência em ambas as estações, apresentando valores de aproximadamente $+0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ no verão e $+0.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ no inverno. A diferença entre o local de estudo e a referência é, assim, mais pronunciada no verão do que no inverno, embora os valores observados sejam relativamente reduzidos.

A Figura 30 apresenta as variações da média das temperaturas máximas diárias.

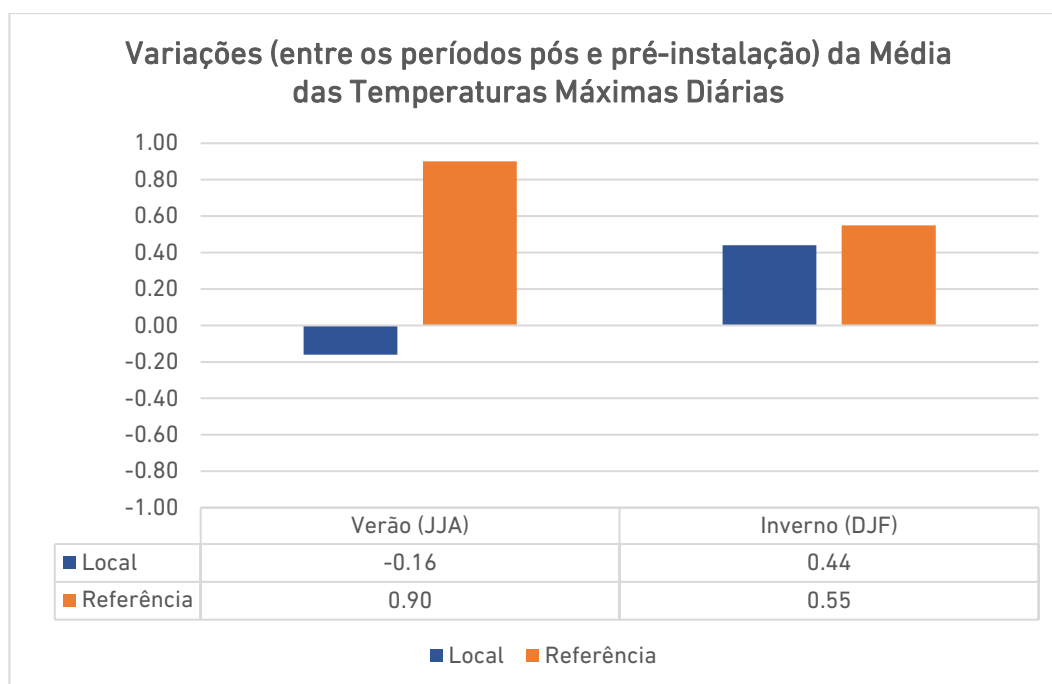


Figura 30. Variações sazonais da média das temperaturas máximas diárias entre os períodos pós e pré-instalação.

Para o caso da média das temperaturas máximas diárias, no verão, a diferença entre os dois locais é mais acentuada. Enquanto no local de referência se verifica um aumento relativamente mais elevado (aproximadamente $+0.90\text{ }^{\circ}\text{C}$), no local de estudo observa-se uma diminuição da média das temperaturas máximas diárias (cerca de $-0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este contraste traduz um $\Delta\Delta T$ próximo de $-1.06\text{ }^{\circ}\text{C}$, evidenciando uma atenuação do aquecimento no local de estudo durante o verão.

No inverno, as diferenças são consideravelmente menos pronunciadas, embora se mantenha a tendência de um aumento inferior no local de estudo ($+0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$) relativamente à referência ($+0.55\text{ }^{\circ}\text{C}$), que se traduz num $\Delta\Delta T$ de $-0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando uma diferença de magnitude reduzida entre os dois locais.

Para concluir a exposição dos resultados sazonais, a Figura 31 apresenta as variações das temperaturas mínimas.

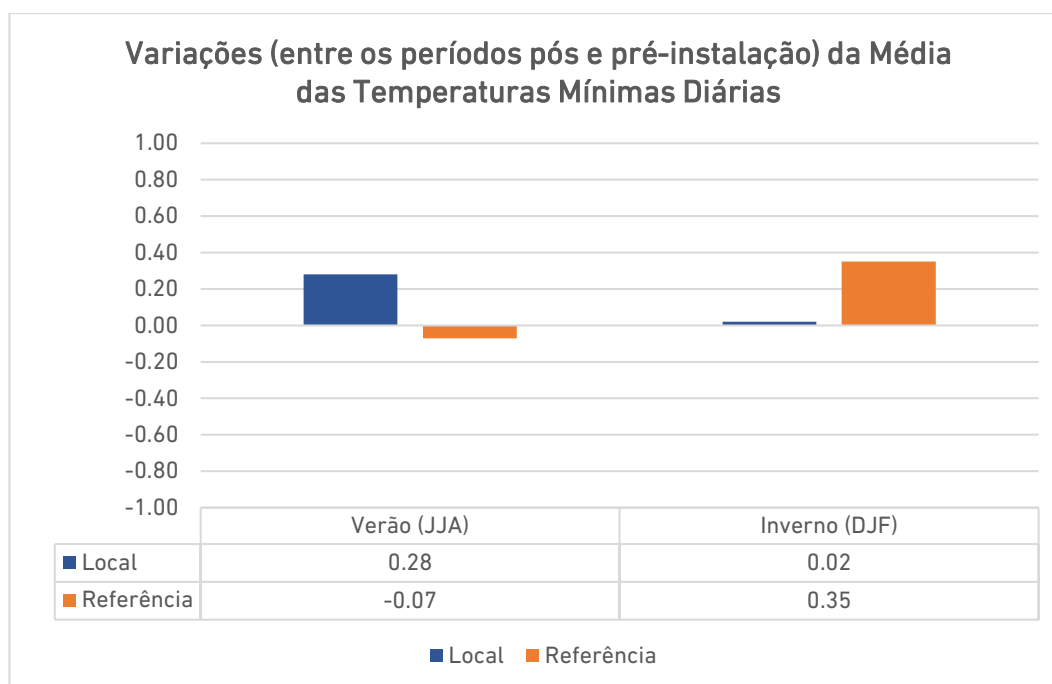


Figura 31. Variações sazonais da média das temperaturas mínimas diárias entre os períodos pós e pré-instalação.

No caso da média das temperaturas mínimas diárias, observa-se uma evolução distinta entre o verão e o inverno. No verão, o local de estudo apresenta um aumento de aproximadamente $+0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto no local de referência se verifica uma ligeira diminuição de cerca de $-0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este contraste corresponde a um $\Delta\Delta T$ de aproximadamente $+0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

No inverno, o local de referência apresenta um aumento de aproximadamente $+0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto a variação no local de estudo é praticamente nula, cerca de $+0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondendo a um $\Delta\Delta T$ de aproximadamente $-0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Assim, embora as diferenças sazonais apresentem sinais opostos, continuam a ser menos expressivas do que as observadas nas temperaturas máximas durante o verão.

Com a metodologia e dados utilizados, a análise desenvolvida para a Central Solar Fotovoltaica da Amareleja não evidencia alterações significativas do regime térmico regional que possam ser diretamente atribuídas à presença da central. As distribuições globais de temperatura nos períodos pré e pós-instalação revelam comportamentos semelhantes no local de estudo e no local de referência, sugerindo que a evolução térmica de fundo é dominada por variabilidade climática de larga escala (estando os valores registados em linha com a ordem de grandeza dos valores estimados pelo Plano Intermunicipal de Adaptação às Alterações Climáticas [26]).

Ainda assim, a aplicação do método *Differences-in-Differences* (DiD) e a análise do ciclo diário indicam uma modulação local de pequena magnitude e não uniforme ao longo do dia. Observa-se uma atenuação relativa da temperatura durante a manhã e o início da tarde,

seguida de um aumento relativo ao final da tarde e nas primeiras horas da noite. A análise dos extremos diários evidencia que as diferenças entre o local de estudo e a referência são mais pronunciadas nas temperaturas máximas, sobretudo durante o verão, permanecendo globalmente menos expressivas nas temperaturas mínimas.

Em termos físicos, este padrão é globalmente compatível com a literatura revista, segundo a qual a presença dos módulos fotovoltaicos pode modular o ciclo térmico local através de alterações na partição da energia à superfície. Esta modulação pode traduzir-se numa redução do aquecimento durante parte do período diurno e numa limitação do arrefecimento após o pôr do sol. Assim, os resultados obtidos para a CSF da Amareleja são globalmente compatíveis com a interpretação de que os impactes microclimáticos de centrais fotovoltaicas são locais, de magnitude reduzida e mais bem descritos como alterações à partição da energia à superfície do que como uma ilha de calor.

A interpretação destes resultados deve também considerar o enquadramento de uso do solo pré-existente. Em termos físicos, a eventual remoção de vegetação arbórea poderia constituir um fator potencialmente favorável ao aumento da temperatura local, por redução do sombreamento e da evapotranspiração. No entanto, conforme amplamente discutido na revisão de literatura, a instalação dos módulos fotovoltaicos introduz simultaneamente novos mecanismos de modulação térmica, nomeadamente o sombreamento do solo, a redução da radiação incidente à superfície e a alteração do armazenamento térmico do solo. Assim, a ligeira modulação intradiária da temperatura relativa identificada no local de estudo deve ser entendida como compatível com um balanço entre efeitos concorrentes, não sendo possível atribuir esse sinal térmico exclusivamente à presença dos módulos fotovoltaicos, às alterações da ocupação do solo/cobertura vegetal ou a outro tipo de intervenções locais, resultando provavelmente de uma combinação destes fatores.

Assim, pode-se inferir que, a título indicativo, no contexto territorial da Central Fotovoltaica Sophia, as tendências de variação térmica e microclimática poderão ser análogas às aqui observadas e genericamente na bibliografia acima referenciada, com efeitos circunscritos à instalação e cujas eventuais variações de temperatura verificáveis em aglomerados e povoações vizinhas ou na região se devam a fenómenos climáticos de maior escala ou outro tipo de variáveis externas à central fotovoltaica. Neste enquadramento, eventuais variações de temperatura verificadas em aglomerados populacionais, povoações vizinhas ou à escala regional deverão ser avaliadas prioritariamente no contexto de fenómenos climáticos de maior escala e de outras variáveis externas à central fotovoltaica.

4. Conclusões

O presente estudo teve como objetivo avaliar os impactes microclimáticos associados a centrais fotovoltaicas, combinando uma revisão bibliográfica do estado da arte com a análise aplicada ao caso de estudo da Central Solar Fotovoltaica da Amareleja. A revisão da literatura mostrou que os efeitos térmicos associados a instalações fotovoltaicas dependem fortemente do contexto climático, do uso do solo, da configuração da central e da metodologia de análise adotada. No seu conjunto, os estudos mais recentes e robustos convergem na conclusão de que os impactes observados resultam sobretudo de uma redistribuição do balanço energético à superfície, e não da formação de uma ilha de calor.

Em particular, a literatura evidencia que a presença de módulos fotovoltaicos tende a reduzir a radiação incidente no solo e o armazenamento térmico superficial, promovendo frequentemente um arrefecimento da superfície ou do solo na área ocupada pelos painéis. Em simultâneo, pode verificar-se um aquecimento moderado do ar na proximidade imediata dos módulos durante o período diurno, associado ao aumento do fluxo de calor sensível. Contudo, esse efeito é geralmente confinado à escala local da instalação (e sem expressividade em povoações vizinhas), de pequena magnitude e sem propagação significativa no espaço nem persistência durante a noite.

Com base na metodologia e dados utilizados, comparando o período pré-instalação, compreendido entre 1998 e 2008, com o período pós-instalação, compreendido entre 2008 e 2025, a análise desenvolvida para o caso de estudo da CSF da Amareleja mostrou que não existem indícios de alterações significativas do regime térmico global da região associadas à instalação da central. As diferenças observadas entre os períodos pré e pós-instalação são globalmente dominadas por fatores climáticos regionais, com um aumento térmico relativamente homogêneo em toda a área de estudo.

Ainda assim, a aplicação do método *Differences-in-Differences* (DiD) permitiu identificar uma ligeira modulação intradiária da temperatura relativa no local de estudo face à referência, caracterizada por uma atenuação durante a manhã e o início da tarde e por um aumento relativo ao final da tarde e nas primeiras horas da noite. A análise dos extremos diários mostrou que a atenuação relativa da temperatura no local de estudo, face à referência, é mais pronunciada nas temperaturas máximas do que nas mínimas, sendo particularmente evidente durante o verão — período em que se regista a maior diferença observada em todo o estudo ($\Delta T \approx -1.06^\circ\text{C}$), consistente com um reforço do efeito de sombreamento nos dias mais quentes.

Os resultados obtidos para a Amareleja são, por isso, globalmente compatíveis com os mecanismos físicos identificados na literatura, sugerindo que a presença da central fotovoltaica poderá estar associada a uma modulação microclimática local, e não regional, de pequena magnitude. Esta modulação apresenta um comportamento dependente da hora do dia, com redução relativa da temperatura durante a manhã e o início da tarde e aumento relativo ao final da tarde e nas primeiras horas da noite. Esta interpretação deve, no entanto, ser analisada tendo em consideração os pressupostos e condicionantes inerentes ao estudo, nomeadamente a reconstrução de aproximadamente 15% dos valores horários para preenchimento dos períodos sem observações horárias disponíveis e a necessidade de assumir a comparabilidade climática entre o local de estudo e o local de referência.

Em termos práticos, a revisão da literatura internacional e o caso de estudo da Amareleja suportam a conclusão de que centrais fotovoltaicas de grande escala não induzem, à luz da evidência disponível, impactes microclimáticos regionais, mas sim potenciais alterações locais subtis (de pequena magnitude tal como quantificado na secção 3.3) e fortemente dependentes do contexto.

A breve análise complementar da ocupação do solo prévia à construção da central evidencia uma matriz agroflorestal heterogénea. A evolução posterior da cobertura vegetal poderá ter influenciado as condições térmicas locais através do sombreamento e da evapotranspiração, embora a informação analisada não permita confirmar ou quantificar esse contributo. Ainda assim, a literatura sustenta a consideração, em futuros projetos, de medidas adequadas de reforço paisagístico e do coberto vegetal. A preservação das estruturas húmidas existentes poderá igualmente ser considerada no âmbito da gestão ambiental e microclimática do território, devendo a eficácia destas medidas ser avaliada em função da configuração da central, da ventilação local e das características ambientais do território.

Neste enquadramento, o caso de estudo da Central Fotovoltaica da Amareleja constitui uma referência nacional relevante para a futura Central Fotovoltaica Sophia. Assim, pode inferir-se, a título indicativo, que, no contexto territorial de Sophia, as tendências de variação térmica e microclimática poderão ser globalmente análogas às observadas no presente estudo e às genericamente identificadas na bibliografia analisada, traduzindo-se em efeitos predominantemente locais, de pequena magnitude e circunscritos à instalação e à sua envolvente próxima. Eventuais variações de temperatura observadas em aglomerados populacionais, povoações vizinhas ou à escala regional deverão ser avaliadas prioritariamente no contexto da variabilidade meteorológica, das tendências climáticas de maior escala e de outras alterações locais ou territoriais, salvaguardando as características específicas do projeto Sophia e do respetivo contexto territorial.

Trabalhos futuros poderão aprofundar e reforçar esta análise através da utilização de séries de medições horárias com maior continuidade temporal, da inclusão de um maior número de pontos de controlo e/ou da aplicação de modelação numérica atmosférica avançada, que poderá ser aplicada tanto para centrais já existentes como para projetos em fase de desenvolvimento, recorrendo a modelos de mesoescala complementados, quando pertinente, por modelação computacional de microescala.

5. Referências

- [1] V. Fthenakis and Y. Yu, "Analysis of the Potential for a Heat Island Effect in Large Solar Farms," 2013.
- [2] G. A. Barron-Gafford, R. L. Minor, N. A. Allen, A. D. Cronin, A. E. Brooks, and M. A. Pavao-Zuckerman, "The photovoltaic heat island effect: Larger solar power plants increase local temperatures," *Sci. Rep.*, vol. 6, Oct. 2016, doi: 10.1038/srep35070.
- [3] A. M. Broadbent, E. S. Krayenhoff, M. Georgescu, and D. J. Sailor, "The observed effects of utility-scale photovoltaics on near-surface air temperature and energy balance," *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 58, no. 5, pp. 989–1006, May 2019, doi: 10.1175/JAMC-D-18-0271.1.
- [4] R. Chang, Y. Shen, Y. Luo, B. Wang, Z. Yang, and P. Guo, "Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China," *Renew. Energy*, vol. 118, pp. 131–137, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.007.
- [5] R. Chang, Y. Luo, and R. Zhu, "Simulated local climatic impacts of large-scale photovoltaics over the barren area of Qinghai, China," *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 478–489, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.059.
- [6] R. Chang *et al.*, "A coupled WRF-PV mesoscale model simulating the near-surface climate of utility-scale photovoltaic plants," *Solar Energy*, vol. 245, pp. 278–289, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.09.023.
- [7] "Weather Research & Forecasting Model (WRF) | Mesoscale & Microscale Meteorology." Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>
- [8] H. J. Williams, K. Hashad, H. Wang, and K. Max Zhang, "The potential for agrivoltaics to enhance solar farm cooling," *Appl. Energy*, vol. 332, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120478.
- [9] J. Zheng, Y. Luo, R. Chang, and X. Gao, "An observational study on the microclimate and soil thermal regimes under solar photovoltaic arrays," *Solar Energy*, vol. 266, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.112159.
- [10] Z. Xu, Y. Li, Y. Qin, and E. Bach, "A global assessment of the effects of solar farms on albedo, vegetation, and land surface temperature using remote sensing," *Solar Energy*, vol. 268, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2023.112198.
- [11] Y. He, D. J. C. Hii, and N. H. Wong, "Solar photovoltaics deployment impact on urban temperature: Review and assessment recommendations," Oct. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111920.
- [12] E. Fassbender, J. Rott, and C. Hemmerle, "Impacts of Photovoltaic Façades on the Urban Thermal Microclimate and Outdoor Thermal Comfort: Simulation-Based Analysis," *Buildings*, vol. 14, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.3390/buildings14040923.

- [13] V. Masson, M. Bonhomme, J. L. Salagnac, X. Briottet, and A. Lemonsu, "Solar panels reduce both global warming and urban heat island," *Front. Environ. Sci.*, vol. 2, no. JUN, Jun. 2014, doi: 10.3389/fenvs.2014.00014.
- [14] M. Fagnano *et al.*, "Effects of a Photovoltaic Plant on Microclimate and Crops' Growth in a Mediterranean Area," *Agronomy*, vol. 14, no. 3, Mar. 2024, doi: 10.3390/agronomy14030466.
- [15] A. Armstrong, N. J. Ostle, and J. Whitaker, "Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling," *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 7, Jul. 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/7/074016.
- [16] J. Vervloesem, E. Marcheggiani, M. A. M. Choudhury, and B. Muys, "Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/su14127493.
- [17] A. Hurduc, S. L. Ermida, M. C. Brito, F. M. Götsche, and C. DaCamara, "Impact of a small-scale solar park on temperature and vegetation parameters obtained from Landsat 8," *Renew. Energy*, vol. 221, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119827.
- [18] "Landsat 8 - NASA Science." Accessed: May 20, 2026. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/mission/landsat-8/>
- [19] "Amareleja Photovoltaic plant | ACCIONA | Business as unusual." Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.acciona-energia.com/projects/amareleja-photovoltaic-plant>
- [20] "Visualizador do SNIG." Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://snig.dgterritorio.gov.pt/mapa/snig?serviceUrl=https%3A%2F%2Fgeo2.dgterritorio.gov.pt%2Fgeoserver%2FCOS-S1%2Fwms%3Fservice%3Dwms%26version%3D1.3.0%26request%3DGetCapabilities&serviceType=wms>
- [21] Hersbach H. *et al.*, "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present," 2023, *ECMWF*. doi: 10.24381/cds.adbb2d47.
- [22] P. Zippenfenig, "Open-Meteo.com Weather API," 2023. doi: 10.5281/zenodo.7970649.
- [23] J. Muñoz Sabater, "ERA5-Land hourly data from 2001 to present," 2019, *ECMWF*. doi: 10.24381/CDS.E2161BAC.
- [24] Schimanke S. *et al.*, "CERRA sub-daily regional reanalysis data for Europe on single levels from 1984 to present," 2021, *ECMWF*. doi: 10.24381/CDS.622A565A.
- [25] "Amareleja - EMA." Accessed: May 27, 2026. [Online]. Available: <https://ema.ipma.pt/emas/amareleja/>
- [26] CIMBAL, "PIAACBA - Plano Intermunicipal de Adaptação às Alterações Climáticas do Baixo Alentejo." Accessed: Sep. 11, 2026. [Online]. Available: <https://cibal.pt/pt/16442/piaacba---plano-intermunicipal-de-adaptacao-as-alteracoes-climaticas-do-baixo-alentejo.aspx>

Anexos

A.1 Metodologia de Reconstrução da Série Temporal da Temperatura Horária da Estação Meteorológica da Amareleja

- **Objetivo**

O objetivo deste procedimento consiste na reconstrução de uma série temporal horária da temperatura do ar num local de estudo onde apenas se encontram disponíveis valores diários de temperatura mínima (T_{MIN}), máxima (T_{MAX}), e média (T_{MEAN}), recorrendo à estrutura temporal do ciclo diário proveniente de modelo de macroescala, numa localização relativamente próxima.

- **Dados de entrada**

$T_s(t)$: Temperatura no local de estudo (dados diários);

$T_{\text{model}}(t)$: Temperatura horária do modelo de macroescala;

Dados da estação meteorológica:

$T_{\text{MIN}}(D)$: Temperatura mínima diária;

$T_{\text{MAX}}(D)$: Temperatura máxima diária;

$T_{\text{MEAN}}(D)$: Temperatura média diária.

Nos dados fornecidos pelo IPMA, o dia climatológico considerado corresponde ao intervalo 09UTC $\rightarrow$ 09UTC.

- **Extração do ciclo diário**

Para cada dia D , extrai-se a série horária do modelo:

$$T_{\text{model}}(t), \quad t = 1, (\dots), 24 \text{ [h]}$$

- **Normalização do ciclo diário**

O ciclo diário é normalizado de modo a remover o nível absoluto e a amplitude:

$$S(t) = \frac{T_{\text{model}}(t) - \min(T_{\text{model}})}{\max(T_{\text{model}}) - \min(T_{\text{model}})}, \quad 0 \leq S(t) \leq 1$$

- **Escalonamento para os extremos observados**

O ciclo normalizado é ajustado aos valores observados (este passo garante que $\min(T_0) = T_{\text{MIN}}$ e que $\max(T_0) = T_{\text{MAX}}$):

$$T_0(t) = T_{\text{MIN}}(D) + S(t)(T_{\text{MAX}}(D) - T_{\text{MIN}}(D))$$

- **Ajuste ao valor médio diário**

Calcula-se a média da série reconstruída:

$$\overline{T_0} = \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} T_0(t)$$

Define-se a correção:

$$\Delta = T_{\text{MEAN}}(D) - \overline{T_0}$$

E aplica-se:

$$T_1(t) = T_0(t) + \Delta$$

- **Reimposição dos extremos**

Para garantir a consistência com os dados observados:

$$\min(T_1) = T_{\text{MIN}}$$

$$\max(T_1) = T_{\text{MAX}}$$

- **Vantagens**

Este método permite preservar a forma do ciclo diário, garantir a correspondência com os dados observados (T_{MIN} , T_{MAX} , T_{MEAN}) e incorporar variabilidade meteorológica real.

- **Limitações**

Os valores horários obtidos correspondem a estimativas e não a medições diretas. O método baseia-se na hipótese de que o ciclo diário de temperatura no local de estudo é semelhante ao do ponto de referência, cuja informação é proveniente de modelos de macroescala. Esta hipótese poderá não constituir uma limitação crítica, uma vez que o ponto de referência se encontra geograficamente próximo do local de estudo, partilhando, condições meteorológicas semelhantes.

Adicionalmente, a imposição simultânea dos valores diários de temperatura mínima, máxima e média pode introduzir pequenas distorções locais na forma do ciclo diário, particularmente na proximidade dos extremos.

MAIS DE 40 ANOS
A CONVERTER
CONHECIMENTO
EM VALOR

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação
em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

Campus da FEUP | Rua Dr. Roberto Frias, 400 | 4200-465 Porto | Portugal
T. +351 22 957 87 10 | inegi@inegi.up.pt

www.inegi.pt

