

Análise do ambiente térmico urbano e áreas potencialmente expostas ao calor extremo no município do Porto (Portugal)

Hélder Silva Lopes⁰ Paula C. Remoaldo[^] Vítor Ribeiro[•] Javier Martin-Vide[☒] 

Resumo

A ilha de calor urbano superficial é uma das principais causas para a diminuição do conforto bioclimático em áreas onde os padrões superficiais são heterogêneos, sobretudo no verão. O município do Porto apresenta características de uso do solo e materiais de cobertura cujas propriedades térmicas e radiativas são profundamente dissemelhantes. Neste sentido, o presente estudo procura examinar a influência da cobertura do solo sobre a temperatura de superfície, recorrendo às imagens de satélite. As temperaturas de superfície foram extraídas da imagem Landsat 8-OLI, e vários índices espectrais foram derivados para identificar o potencial de arrefecimento evaporativo. Os principais resultados mostram que as “ilhas de calor urbano superficial” se localizam maioritariamente no núcleo central da cidade do Porto e das principais vias de comunicação, onde os efeitos da densificação urbana e das propriedades materiais de cobertura utilizados impedem a evapotranspiração, favorecem o aumento da absorção radiativa e, consecutivamente, o aumento significativo de temperatura de superfície.

Palavras-chave: clima urbano, detecção remota, ilha de calor urbano, índices espectrais, temperatura da superfície.

Ideias destacadas: artigo de investigação sobre a influência da ilha de calor urbano no município do Porto, em Portugal, a partir da análise por detecção remota (imagem Landsat 8-OLI).



RECEBIDO: 2 DE NOVEMBRO DE 2020. | AVALIADO: 24 DE MAIO DE 2021. | ACEITO: 28 DE FEVEREIRO DE 2022.

COMO CITAR ESTE ARTIGO

Lopes, Hélder Silva; Remoaldo, Paula C.; Ribeiro, Vítor; Martin-Vide, Javier. 2022. “Análise do ambiente térmico urbano e áreas potencialmente expostas ao calor extremo no município do Porto (Portugal).” *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 31 (2): 281-302. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.91309>.

⁰ Universidade do Minho, Guimarães – Portugal. Universitat de Barcelona, Barcelona – Espanha. ✉ htsliago@hotmail.com – ORCID: 0000-0002-2931-5175.

[^] Universidade do Minho, Guimarães – Portugal. ✉ premoaldo@geografia.uminho.pt – ORCID: 0000-0002-9445-5465.

[•] Universidade do Minho, Guimarães – Portugal. ✉ vitor.geografia@gmail.com – ORCID: 0000-0002-5993-3492.

[•] Universitat de Barcelona, Barcelona – Espanha. ✉ jmartinvide@ub.edu – ORCID: 0000-0002-1179-7380.

☒ Correspondencia: Hélder Silva Lopes, Campus de Azurém, Departamento de Geografia, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal.

Analysis of the Urban Thermal Environment and Exposition to Extreme Heat in the Municipality of Porto (Portugal)

Abstract

The surface urban heat island is one of the main causes for the decrease in bioclimatic comfort in areas with heterogeneous surface patterns, especially in the summer. The municipality of Porto has characteristics of land use and roofing materials provide thermal and radiative properties that are widely disseminated. The present study seeks to influence the coverage of land cover over land surface temperature using satellite images. As land surface temperature were extracted from the Landsat 8-OLI image, several spectral indices have been derived to identify the potential for evaporative cooling. Main results show that the “superficial urban heat island” are located mainly in the central core of the city of Porto and the main communication routes, where the effects of urban densification and the material covering properties used prevent evapotranspiration, favor the increase radiation absorption and, consecutively, a significant increase in land surface temperature.

Keywords: urban climate, spectral indices, urban heat island, remote sensing, land surface temperature.

Highlights: research article on the influence of the urban heat island in the municipality of Porto, in Portugal, based on remote sensing analysis (Landsat 8 image-OLI).

Análisis del ambiente térmico urbano y áreas potencialmente expuestas al calor extremo en el municipio de Oporto (Portugal)

Resumen

La isla de calor urbano superficial es una de las principales causas de la disminución del confort bioclimático en áreas donde los patrones de superficie son heterogéneos, en especial en el verano. El municipio de Oporto tiene características de uso del suelo y materiales de cubierta cuyas propiedades térmicas y radiativas son profundamente diferentes. En este sentido, el presente estudio busca examinar la influencia de la cobertura terrestre en la temperatura superficial utilizando imágenes de satélite. Las temperaturas superficiales se extrajeron de la imagen Landsat 8-OLI y se han derivado varios índices espectrales para identificar el potencial de enfriamiento por evaporación. Los principales resultados muestran que las “islas de calor urbano superficiales” se ubican mayoritariamente en el núcleo central de Oporto y las principales vías de comunicación, donde los efectos de la densificación urbana y las propiedades de recubrimiento del material utilizado impiden la evapotranspiración.

Palabras clave: clima urbano, índices espectrales, isla de calor urbano, teledetección, temperatura de la superficie.

Ideas destacadas: artículo de investigación sobre la influencia de la isla de calor urbana en el municipio de Oporto, en Portugal, basado en análisis de teledetección (imagen Landsat 8-OLI).

Introdução

De acordo com dados das Nações Unidas, divulgados no relatório “*World Urbanization Prospects: the 2018 Revision. Highlights*”, em 2017, o 55 % da população mundial reside em áreas urbanas (United Nations 2018), ao passo que para o 2050 se estima que a população que habita nas cidades possa aumentar para 68 % (Li et al. 2011; Giles-Corti, Lowe y Arundel 2020). O crescimento das atividades humanas em espaços urbanos influencia significativamente o clima urbano. Desde logo a redução das áreas naturais e consequente crescimento das superfícies artificiais, a diminuição do *Sky View Factor* (SVF) de vários espaços, o aprisionamento de energia proveniente da radiação refletida a configuração da *street canyons* e a presença de poluentes atmosféricos provocam o aumento do calor residual (Streutker 2002; Kuttler 2008; Qiao, Tian y Xiao 2013; Silva et al. 2018; Ghobadi e Nasrollahi 2021). Desta forma, nas áreas urbanas, o perfil dos edifícios e das vias impede que o calor de superfície seja transportado para a atmosfera superior e provoca atrito, o que impede a perda de calor através da advecção, ou seja, da circulação de ar frio proveniente das áreas rurais (Tiangco Lagmay y Argete 2008). As áreas urbanas tendem, assim, a apresentar temperaturas de superfície — em diante TS — mais elevadas que as áreas rurais, em resultado da artificialização dos solos que privilegiam a retenção da energia solar (Streutker 2002; Voogt e Oke 2003; Zhao et al. 2011; Eum et al. 2011; Senanayake, Welivitiya e Nadeeka 2013; Lemus-Canovas et al. 2019; Martin-Vide e Moreno-Garcia 2020). Estas diferenças são relativamente modestas (na ordem de 1 °C) em relação a pequenas áreas urbanas, mas em comparação com grandes cidades as disparidades podem ser significativas (iguais ou superiores a 4,0 °C). Aliás, a retenção de calor em espaços rurais circundantes aos espaços urbanos tende a ser duas vezes inferior (Odindi, Bangamwabo e Mutanga 2015).

Desta forma, nesta investigação desenvolvida para o município do Porto, com aplicação ao nível da mesoescala urbana (Andrade 2005), pretende-se: (i) avaliar a distribuição espacial das TS, procurando estabelecer uma relação com vários índices espectrais — *Urban Index* (UI), *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI), *Soil-adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) — que reagem de forma dissemelhante aos usos do solo e ao tipo de materiais que estão subjacentes a estes usos, (ii) determinar a contribuição para o arrefecimento evaporativo e aquecimento, em função das TS, por usos do solo e freguesias do município e (iii) inferir o nível de criticidade ambiental e os efeitos resultantes do crescimento urbano.

Este estudo se insere num estudo preliminar no âmbito do WP2 de um projeto de investigação intitulado “A influência do clima e da morfologia urbana na Área Metropolitana do Porto – Perceções e simulação do conforto bioclimático de turistas”, onde se procurou determinar e avaliar as áreas turísticas (ou potenciais) reconhecidas como críticas, considerando a evolução urbana prevista e a suscetibilidade aos extremos climáticos. Desta forma, à introdução segue-se a definição da área de estudo e dos métodos que sustentam a investigação. De seguida, apresentam-se os resultados, nomeadamente os níveis de urbanização e distribuição espacial das TS e o contributo das áreas funcionais para o nível de criticidade ambiental registado no município do Porto. Por fim, apresenta-se a discussão e as principais conclusões do estudo.

Os estudos da climatologia para análise do ambiente térmico urbano

Uma compreensão completa dos fatores que contribuem para o efeito da Ilha de Calor Urbano — em diante ICU, é fulcral para a delimitação de políticas e estratégias de planeamento direcionadas para as cidades e, assim, evitar graves consequências indesejáveis tanto para o ser humano, como para o ambiente (Amorim e Monteiro 2016; Deilami, Kamruzzaman e Liu 2018; Ferreira, Monteiro e Madureira 2019; Madureira et al. 2021). Tal como se depreende da definição de ICU, esta é pautada pelas diferenças da temperatura entre as áreas urbanas e rurais (Martin-Vide e Moreno Garcia 2020).

As diferenças entre fluxos turbulentos de calor latente e sensível entre áreas rurais e urbanas variam em função do conteúdo de água no solo e do coberto vegetal (Weng, Lu e Schubring. 2004). Os fluxos de calor latente predominam em áreas com vegetação, ao passo que as trocas de calor sensível tendem a ser favorecidas em espaços urbanos, pela ausência de vegetação (Owen, Carlson e Gillies. 1998; Weng, Lu e Schubring. 2004). Intrínsecas a estas áreas, as alterações substanciais das propriedades físicas da superfície são, sobretudo, do conteúdo em humidade do solo, da capacidade de transmissão de calor, da condutividade, do albedo e da emissividade pelos materiais causam a diminuição dos processos de evapotranspiração (Deng e Wu 2013; Sarricolea e Meseguer-Ruiz 2019) e são responsáveis pelas modificações dos principais *inputs* e *outputs* de radiação solar e infravermelha e do próprio calor que é armazenado (Abdulateef e Al-Alwan 2022; Lopes 2009; Zhao et al. 2011).

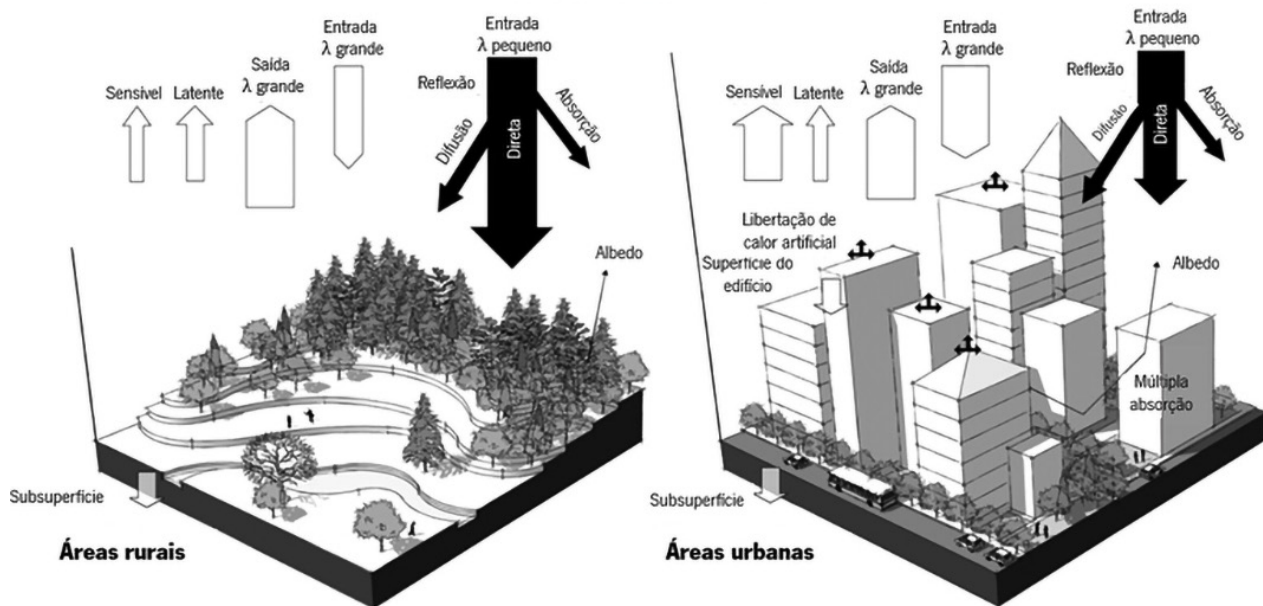


Figura 1. Representação dos fluxos de radiação e energia nas áreas rurais (à esquerda) e nas áreas urbanas (à direita), num dia de céu limpo. Fonte: Traduzido de Zhao et al. 2011.

Neste sentido, as alterações na cobertura do solo e na composição atmosférica em áreas urbanas criam condições climáticas específicas e são responsáveis pela formação da ICU (Oke 1995; Alcoforado et al. 2005; Alcoforado et al. 2009; Eum et al. 2011; Martin-Vide e Moreno-Garcia 2020). O padrão térmico deste fenómeno decorre da diferenciação de uma cidade mais quente rodeada por áreas mais frescas e distingue um conjunto de microclimas causados pela crescente expansão urbana (Alcoforado et al. 2009; Lopes 2009; Weng 2009; Martin-Vide e Moreno-Garcia 2020). Effat e Hassan (2014) afirmam que o aquecimento antropogénico associado à ICU pode originar, em grandes núcleos urbanos, incrementos da temperatura na ordem dos 2-3 °C, tendo por base um estudo efetuado na cidade do Cairo (Egito). De qualquer modo, distinguem-se vários tipos de “ilhas de calor urbano”, com formação, magnitude e padrão temporal distinto (Tabela 1): a ICU Subsuperficial (ICU_{sub}), a ICU superficial (ICU_{sup}), a ICU da atmosfera urbana inferior (ICU_{AUI}) e a ICU da atmosfera urbana superior (ICU_{AUS}) (Voogt e Oke 2003; Weng et al. 2004; Yuan et al. 2005; Alcoforado et al. 2005; Yuan e Bauer 2007; Kuttler 2008; Lopes 2009; Zhao et al. 2018).

Em último recurso, a intensidade do calor urbano depende da sua localização espacial, bem como das características locais (e.g. materiais, rugosidade da superfície) (Mirzaei e Haghighat 2010; Odindi, Bangamwabo e Mutanga 2015).

Atendendo a estes pressupostos, têm-se multiplicado os estudos de detecção remota com enfoque de análise na ICU_{sup} , que resulta da análise das superfícies urbanas mais quentes relativamente às áreas mais frescas e do contacto com a atmosfera urbana inferior. Para tal, sugere-se o recurso à análise da TS através da resposta da imagem de satélite ao espectro do infravermelho térmico (10,4 μm -12,5 μm) em diversas investigações (Streutker 2002; Weng e Quattrochi 2006; Weng 2009; Lemus-Canovas et al. 2019;). As TS têm vindo a ser utilizadas para avaliar nos espaços urbanos os balanços radioativos e energéticos, a relação com as propriedades físicas da superfície terrestre ou a repartição e arranjo espacial dos usos do solo e os diferentes índices urbanísticos (Amorim e Monteiro, 2011).

Para estas análises pode utilizar-se a TS como *proxy*, embora vários autores afirmem que nesta tipologia de estudos não se estuda verdadeiramente os efeitos da intensidade da ICU (Weng 2001; Li et al. 2009; Senanayake, Welivitiya e Nadeeka 2013; Berger et al. 2017; Morabito et al. 2021). Em contrapartida, outras investigações referem ser essencial relacionar os fatores espaciais e a intensidade da ICU, através da diferença entre as TS das áreas urbanas e das áreas rurais (Zhou et al. 2016; Alves 2016; Li et al. 2017; Xian et al. 2021).

Tabela 1. Resumo dos tipos de Ilha de Calor Urbano (ICU)

Tipo ICU	Escala	Processos	Modelos	Medição direta	Medição por detecção remota
Ilha de Calor Subsuperficial (ICU _{sub})	Local	Subsuperfície - Balanço Energético	Difusão de calor (água) em estado sólido	Dispositivos de temperatura no substrato	-
Ilha de Calor Urbano Superficial (ICU _{sup})	Micro	Balanço energético superficial	Balanço energético da superfície e temperatura da superfície de equilíbrio	Dispositivos de temperatura conectados à superfície	Imagens de satélite/avião
Ilha de Calor da Atmosfera Urbana Inferior (ICU _{AUI})	Local	Balanço energético na superfície e atmosfera urbana inferior	Esquema da subcamada de rugosidade e camada limite incluindo as interações com a camada limite subsuperficial e a atmosfera urbana superior	Dispositivos de temperatura em pontos fixos e dispositivos móveis em atmosfera urbana inferior e na camada da superfície rural	Mini-lidar
Ilha de Calor da Atmosfera Urbana Superior (ICU _{AUS})	Local e meso	Balanço energético no topo da subcamada de rugosidade e camada limite	Esquema da camada limite da atmosfera incluindo a interação da subcamada de rugosidade com a superfície e atmosfera livre	Sensores de temperatura montados em aeronaves, balões e postes altos	Sodar ¹ , Lidar ² , RASS profiler ³

Fonte: adaptação de Oke et al. 2017.

Notas: ¹ o sodar não mede a temperatura, mas pode detectar a estrutura da ICU. Mede o campo de vento na atmosfera urbana. Pode ser usado para estimar o perfil vertical do vento e o estado de turbulência da atmosfera até algumas centenas de metros. ² Localiza os aerossóis (ao detectar os movimentos pode também inferir o vento e a turbulência) e as gotículas de nuvens (base da nuvem e inversões térmicas). Pode também adquirir um modelo digital da superfície de uma área urbana (edifícios, árvores). ³ Uma combinação de sodar e do RASS profiler mede simultaneamente a T_{ar} e o perfil do vento na atmosfera até pelo menos 1,5 km.

Independentemente da metodologia que se assume para os pressupostos estabelecidos no âmbito de uma investigação, as TS resultam das diferenças da natureza da cobertura vegetal, da densidade de vegetação e de área construída, de propriedades térmicas e de humidade do solo, da rugosidade da superfície, dos materiais de construção, da altura e volumetria dos edifícios e do próprio arranjo geométrico tridimensional dos edifícios, ruas, espaços abertos e espaços verdes (Friedl et al. 2002; Weng 2004; Yang et al. 2021;). As diferentes propriedades radiativas e térmicas dos materiais influenciam a forma como a radiação solar é refletida e armazenada na baixa atmosfera urbana, determinando os padrões de distribuição das TS (Lopes 2009). A análise destes padrões permite identificar os locais onde se verifica maior acumulação e produção de calor associado às superfícies urbanas onde subsiste uma elevada carga térmica, o que invariavelmente resulta em TS mais elevadas, assim como os locais de menor produção e armazenamento de calor, como são exemplo as ilhas de frescura.

Área de estudo, dados e métodos

O presente estudo é aplicado ao município do Porto, que se localiza no noroeste de Portugal continental, possui 41,42 km² de área e integra a Área Metropolitana do Porto. Em Portugal é o segundo território com maior dinamismo económico, sendo também o coração da segunda área metropolitana portuguesa mais populosa, com 1.736.491 habitantes, atrás da Área Metropolitana de Lisboa, que tem 2.870.770 habitantes (INE 2021).

O Porto possui uma localização geográfica privilegiada junto ao litoral, com o Oceano Atlântico a oeste, estando delimitado a sul pelo rio Douro, instalando-se numa plataforma de pequena inclinação para o Oceano Atlântico, com amplitude altimétrica de 160 metros (Gomes et al. 2020; Lopes et al., 2022). Por sua vez, apresenta um clima temperado marítimo, com temperaturas médias a oscilar entre 15-25 °C. Os verões podem ocasionalmente atingir os 35 °C, enquanto os invernos são normalmente pluviosos e frescos, com temperaturas entre 5-14 °C. De acordo com

o sistema de classificação climática de Köppen-Geiger, o Porto está numa zona *Csb* (Lopes et al. 2021).

Estas condições repercutem no desconforto térmico em áreas urbanas densas durante o verão, e são provocadas pela ICU e agravadas em alguns casos pelas situações extremas de vagas de calor. No inverno, a ICU pode implicar vantagens, nomeadamente contribuindo para diminuir o consumo energético destinado ao aquecimento (Alcoforado et al. 2005).

Combinação metodológica para a delimitação da vulnerabilidade climática

Para a realização desta investigação, empregamos uma metodologia inovadora, que se baseia na integração de diversas operações, tendo por base os dados de deteção remota. Para o efeito, considerou-se, primeiramente, o cálculo das TS. De seguida, foram utilizados vários índices espectrais que caracterizam o padrão espacial das TS, nomeadamente para a identificação das condições da vegetação ou para a diferenciação das áreas com edificação. Por último, foram utilizados índices compósitos — o *contribution index* (CI) e o nível de criticidade ambiental — para inferir as áreas potencialmente expostas ao calor extremo e, por inerência, mais suscetíveis à vulnerabilidade climática.

Este estudo recai sobre a análise da imagem do satélite Landsat 8-OLI de 09/07/2014, às 10 horas, com uma cobertura de nuvens inferior a 10 %, onde se extraíram as TS para o município do Porto. A imagem que utilizamos corresponde ao período do dia em que as superfícies ainda se encontraram em aquecimento e não atingiram as TS máximas, e foi selecionada entre 30 imagens de satélites Landsat 8-OLI entre 2013 e 2017, por se tratar daquela que apresentava mais baixo nível de ruído provocado pela topografia ou pelos efeitos da nebulosidade. Trata-se de uma imagem com muito boa qualidade para aferir os padrões de TS e o cálculo dos restantes índices, o que é difícil de acontecer para áreas localizadas no litoral como o Porto durante o período da manhã, sobretudo devido aos efeitos da nebulosidade que se fazem sentir ao início da manhã nesta época do ano.

Considere-se também que a imagem foi sujeita a correções atmosféricas, topográficas, radiométricas e geométricas, para atenuar eventuais resíduos. A razão de captação de imagens pelo satélite Landsat 8-OLI às 10 horas (único disponível com este tipo de resolução) considera-se uma limitação à aplicação do estudo, pois não permite analisar fenómenos que ocorrem normalmente à tarde e à noite. Ainda assim, este é o único período temporal disponível.

Cálculo das temperaturas de superfície (TS)

Com base nos dados da faixa do infravermelho térmico (10,4 μm –12,5 μm) derivamos as TS, e para o cálculo da TS recalculamos os valores da radiância espectral no sensor ($L\lambda$) a partir dos números digitais (DN) que estão associados aos pixels da imagem. Desta forma, $L\lambda$ assume a seguinte Eq. (1):

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}{\text{QCAL}_{\text{max}} - \text{QCAL}_{\text{min}}} (\text{DN} - \text{QCAL}_{\text{min}}) + L_{\text{min}}$$

$L\lambda$ corresponde à radiância espectral no sensor medida em $\text{W} (\text{m}^2 \text{sr} \mu\text{m})$, QCAL_{max} (= 255), QCAL_{min} (= 0) corresponde aos valores mínimos e máximos da amplitude redimensionada da radiância dos números digitais (DN) e L_{min} e L_{max} à radiância espectral que é dimensionada em QCAL_{min} e QCAL_{max} (em $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr} \mu\text{m}$) (Yuan e Bauer, 2007). Após este processo, a radiância espectral foi convertida nos valores de TS em Kelvin (T_B), com a utilização da estimativa específica do Landsat da curva de Planck [Eq. (2)] (Senanayake, Welivitiya e Nadeeka 2013; Yuan e Bauer 2007):

$$T_B = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1 \right)}$$

Quando T_B corresponde às TS em Kelvin (K), K_1 e K_2 são as constantes de calibração 1 e 2 ($K_1 = 774,89 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1.321,08 \text{ K}$) e $L\lambda$ que diz respeito à radiância espectral do sensor em $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ (Coelho e Correa 2013; USGS 2013). Subsequentemente, os valores de temperatura calculados em Kelvin (K) foram transformados em valores de T_{sup} em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), gerando uma nova superfície raster. Para tal, utilizou-se a seguinte [Eq. (3)]:

$$TS(^{\circ}\text{C}) = TS(\text{k}) - 273,15$$

em que TS (K) diz respeito à TS em kelvin e 273,15 corresponde ao seu valor absoluto (Senanayake, Welivitiya e Nadeeka 2013).

Determinação de índices multiespectrais

A utilização da imagem Landsat-8 OLI à resposta da superfície a determinada região do espectro eletromagnético permitiu a utilização de vários índices que caracterizam o padrão espacial das TS. O perfil espectral utilizado para a determinação dos índices se circunscreveu ao uso das bandas 4, 5 e 6 e 7 da imagem de satélite Landsat-8 OLI de 09/07/2014, às 10 horas. Com a utilização destas

bandas definimos quatro índices comumente aplicados à caracterização dos usos do solo, nomeadamente:

1. o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que é o mais utilizado para inferir as condições da vegetação (Weng 2004);
2. o SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), que, embora seja semelhante ao NDVI, consegue ajustes em áreas urbanas não captáveis pelo NDVI (Xu 2007);
3. um índice que identifica quer as áreas edificadas, quer as áreas com solo exposto — o NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) — (Zhou et al. 2014); e
4. o UI (*Urban Index*), que tem sido utilizado em vários estudos (Stathakis, Konstantinos e Savin 2012; Mushore et al. 2017; Sekertekin et al. 2018) e cujo enfoque decorre das especificidades territoriais decorrentes da urbanização (Villa 2007).

O índice NDVI é utilizado para definir a densidade da cobertura vegetal é obtido através da utilização da seguinte [Eq. (4)]:

$$NDVI = \frac{[d(\text{banda } 5) - d(\text{banda } 4)]}{[d(\text{banda } 5) + d(\text{banda } 4)]}$$

Aqui d corresponde ao número digital (DN) das bandas 4 e 5 da imagem Landsat 8-OLI.

O SAVI permite salientar as características de vegetação, constituindo uma vantagem de aplicação quando comparado com o NDVI nas áreas que apresentam baixa cobertura vegetal, tais como os espaços urbanos (Xu 2007). Tal como evidencia Ray (1994), o SAVI se diferencia do NDVI, pelo facto de funcionar eficazmente em áreas cuja vegetação corresponda a menos de 15 %, enquanto o NDVI apenas consegue obter resultados substanciais em áreas com cobertura vegetal superior a 30 %. O cálculo do SAVI segue a seguinte [Eq. (5)], onde é um fator utilizado para a correção do brilho do solo:

$$SAVI = (1+L) \times \frac{[d(\text{banda } 5) - d(\text{banda } 4)]}{[d(\text{banda } 5) + d(\text{banda } 4) + L]}$$

Na maioria dos casos, o valor é igual a 0,5, ao conseguir reduzir consideravelmente o ruído em todas as densidades de vegetação (Hua et al. 2017; Huete 1988). O valor d corresponde ao número digital (DN) das bandas 4 e 5 da imagem Landsat 8-OLI.

Por sua vez, o NDBI é um índice que é sensível às áreas edificadas. O resultado esperado corresponde aos valores dos pixels próximos de 0 em bosques e espaços agrícolas,

valores negativos para corpos de água ou valores positivos para pixels situados em áreas construídas (Chen et al. 2006). O índice se obtém a partir da seguinte [Eq. (6)], na qual d corresponde ao número digital (DN) das bandas 5 e 6 da imagem Landsat 8-OLI:

$$NDBI = \frac{[d(\text{banda } 6) - d(\text{banda } 5)]}{[d(\text{banda } 6) + d(\text{banda } 5)]}$$

Efetivamente, o NDBI apresenta algumas limitações na aplicação às áreas urbanas, quando se verifica que os espaços se encontram distribuídos de forma misturada ou quando outros usos do solo apresentam refletância sazonal (Zha et al. 2003).

Para a derivação de um índice menos sensível a essas variações relativas à urbanização, foi utilizado o IU, que assume a seguinte fórmula [Eq. (7)], onde d corresponde ao número digital (DN) das bandas 5 e 7 da imagem Landsat 8-OLI:

$$UI = \frac{[d(\text{banda } 7) - d(\text{banda } 5)]}{[d(\text{banda } 7) + d(\text{banda } 5)]}$$

O UI assume valores elevados e positivos associados às superfícies artificiais, ao invés dos pixels de áreas de vegetação que apresentam valores extremamente negativos. A utilização deste índice é sugerida por captar distinções nítidas entre áreas muito urbanizadas e áreas com cobertura arbórea (Villa 2007).

Para a calcular estes índices utilizou-se o software de Sistemas de Informação Geográfica ArcGIS (Versão 10.7). Como os valores dos índices são normalizados, os resultados assumem sempre valores entre -1 e 1.

No sentido de perceber a relação entre os usos do solo e a assinatura térmica que é retida pelas bandas, foram estabelecidos três perfis de amostragem que tentam recolher as diferenças significativas entre os usos de solo, a altura e a densidade dos edifícios e as TS. Os transectos foram traçados para a equidistância de 25 metros através da utilização do ArcGIS 10.3 (Figura 2). O primeiro perfil [Perfil A (A-B)] foi traçado entre o Parque da Cidade e o Ramalde, com direção WSW-ENE e extensão de 2,7 km. O Perfil B (C-D) foi designado por Foz do Douro-Ramalde, com orientação WSW-ENE e uma extensão de 3,4 km, enquanto o Perfil C (E-F) tomou a designação Clérigos – Corujeira, com orientação SW-NE, e comprimento de 3,4 km. Ao passo que para o Perfil I foram definidos 107 pontos para a amostragem, os Perfis II e III têm uma representação de 137 pontos.

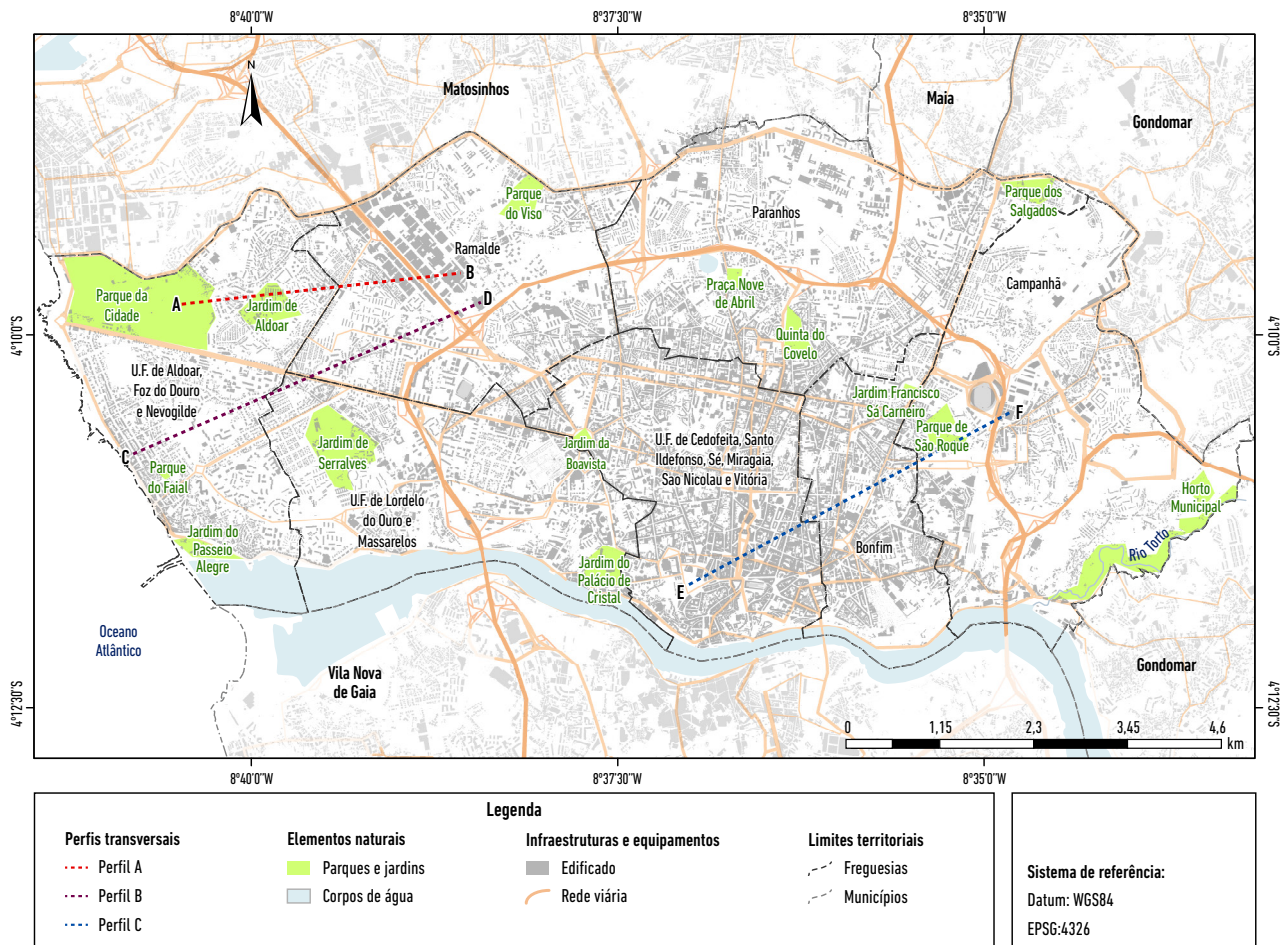


Figura 2. Localização dos perfis de amostragem.

Dados: edificado e rede viária das Câmaras Municipais da Área Metropolitana do Porto e levantamento da equipa de trabalho.

Após a definição dos pontos dos perfis, usamos a ferramenta Sample integrada em Extraction, da extensão Spatial Analyst do ArcGIS 10.3. Foram escolhidas 6 séries de dados, que após terem sido submetidas ao teste de normalidade Shapiro-Wilk, se verificou que, em qualquer caso, não apresentavam uma distribuição normal. Para o efeito, procedeu-se, então, ao uso do teste não-paramétrico do coeficiente de correlação de Spearman, sujeitando as duas séries de dados a um prévio ranking (di) dos valores x_i nos valores x , que antecede a associação ente variáveis. O valor de coeficiente p assume valores entre -1 e 1 e o afastamento ao valor 0 aumenta quanto maior é a associação verificada entre as variáveis. Quando o valor assume sinal negativo, estamos perante variáveis que variam em sentido inverso.

Contribution Index (ci)

O *Contribution Index* (CI) foi utilizado no sentido de perceber a contribuição da razão entre o produto da TS média da área funcional em relação à área total com a proporção da área funcional na área total (Odindi, Bangamwabo e Mutanga 2015; Qiao, Tian e Xiao 2013). Para tal, utilizou-se a média da temperatura em relação à área das freguesias e, por outro lado, à área das diferentes classes do uso do solo. O *Contribution Index* foi calculado com a seguinte [Eq.(8)]:

$$CI = Dt \times s$$

Na fórmula, CI diz respeito à contribuição da área funcional na sua área total, Dt é a diferença entre a temperatura média entre a área (i) e a temperatura média de toda a área urbana (x) ($Dt = T_i - T_x$, sendo T_i a temperatura

média da temperatura num determinado espaço funcional e T_x , a TS média de toda a área), enquanto S corresponde à proporção entre a área funcional (i) e a área total. A_i corresponde à área do espaço funcional, enquanto A_x diz respeito a toda a área. Deve-se reter que a área da zona funcional afeta, em grande medida, a amplitude do índice de contribuição (Qiao, Tian e Xiao 2013).

Nível de Criticidade Ambiental

Através da combinação da TS e do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) calculamos o nível de criticidade ambiental para o município do Porto. Os valores da TS e do índice de vegetação (NDVI) foram alargados com o método *histogram equalisation* para valores de pixels entre 1 e 255, de forma a aumentar o contraste e a claridade que resulta da *layer* inicial e por forma a evitar os valores infinitos do *Environmental Criticality Index* (ECI), resultantes da presença de valores de NDVI iguais a 0 (Senanayake, Welivitiya e Nadeeka 2013). O ECI é obtido através da [Eq. (9)], em que TS (stretched 1-255), diz respeito aos valores alargados das TS, ao passo que NDVI (stretched 1-255) corresponde ao alargamento dos valores dos pixels de NDVI:

$$ECI = (TS - Veg) \frac{TS \text{ (stretched 1) - 255}}{NDVI \text{ (stretched 1) - 255}}$$

Às áreas com valores < 1 foi atribuída a classe de espaços não críticos (nível de criticidade reduzido) com base na combinação das TS e no NDVI. Depois foram definidas 3 classes de criticidade com valores de pixels ≥ 1 , com a utilização do método de classificação por quantis (nível de criticidade moderado, elevado e severo). Embora as massas de água produzam os menores valores de NDVI, estas não representam áreas ambientalmente críticas, pelo que tiveram que ser excluídas da análise (Senanayake, Welivitiya e Nadeeka 2013).

Resultados

Níveis de urbanização e distribuição espacial das temperaturas de superfície (ts)

No município do Porto confirmam-se dissemelhanças significativas dos níveis de urbanização que possibilitam a diferenciação entre as áreas com maior coberto vegetal e as mais densamente povoadas. Efetivamente, a Figura 3 representa a resposta espectral da imagem de satélite ao *Urban Index*.

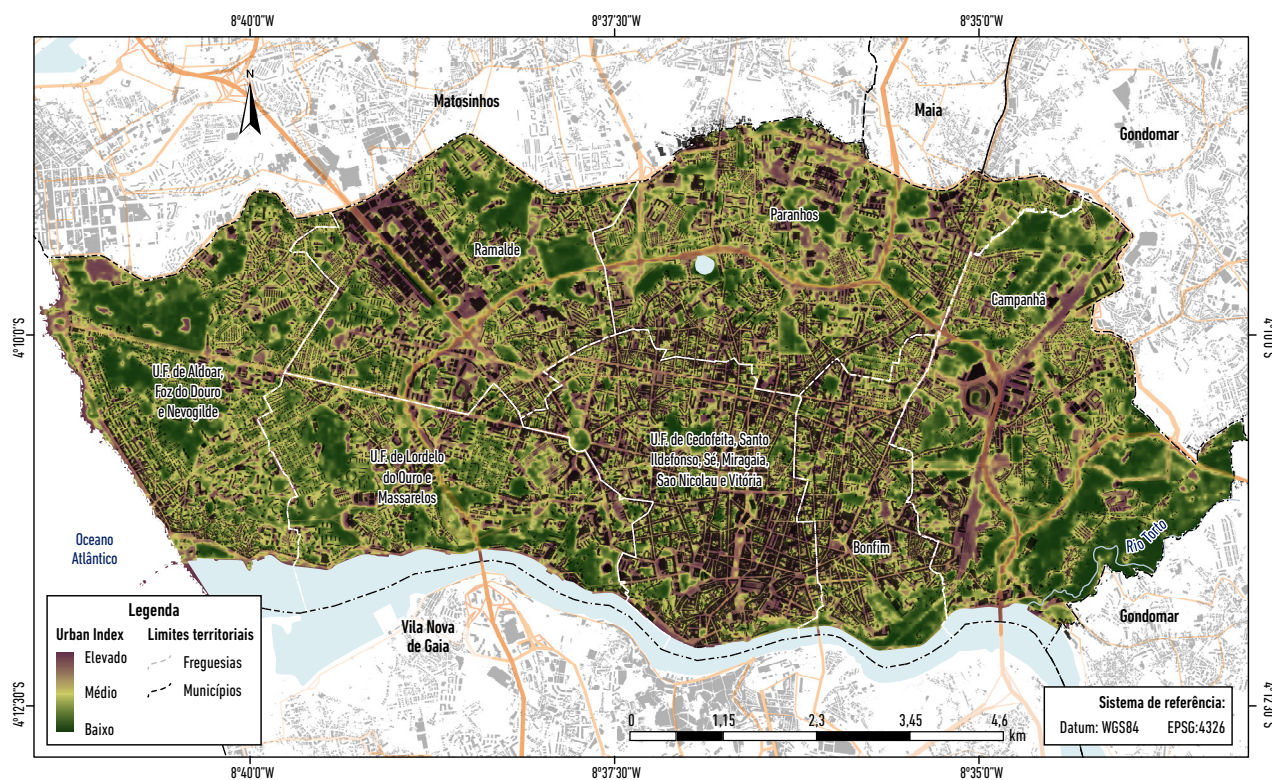


Figura 3. Urban Index para o município do Porto.

Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 09/07/2014, edificado e rede viária das Câmaras Municipais da Área Metropolitana do Porto.

Os valores mais baixos verificados neste índice estão associados às áreas arborizadas, ao passo que se assumem valores de índice mais elevados no perímetro urbano e, essencialmente, nas vias rodoviárias e equipamentos industriais, onde o tipo de material apresenta maior resposta espectral. De forma a facilitar a leitura, foi usada a função *stretch* no ArcGIS 10.7 para distribuir os valores entre 0 e 255 numa classificação qualitativa de baixo, médio e elevado. Neste sentido, deve referir-se que as áreas com cobertura vegetal,

localizadas nos setores oeste (e.g. Parque da Cidade) e este, por serem mais permeáveis, concorrem para o aumento do arrefecimento evaporativo proporcionado pela sombra, impedindo a radiação solar de atingir, de forma direta, a superfície terrestre (Senanayake, Welivitiya e Nadeeka 2013). Neste sentido, tal como se infere pela análise do índice de urbanização, as áreas com menor potencial de arrefecimento evaporativo correspondem às que apresentam maiores valores de TS (Figura 4).

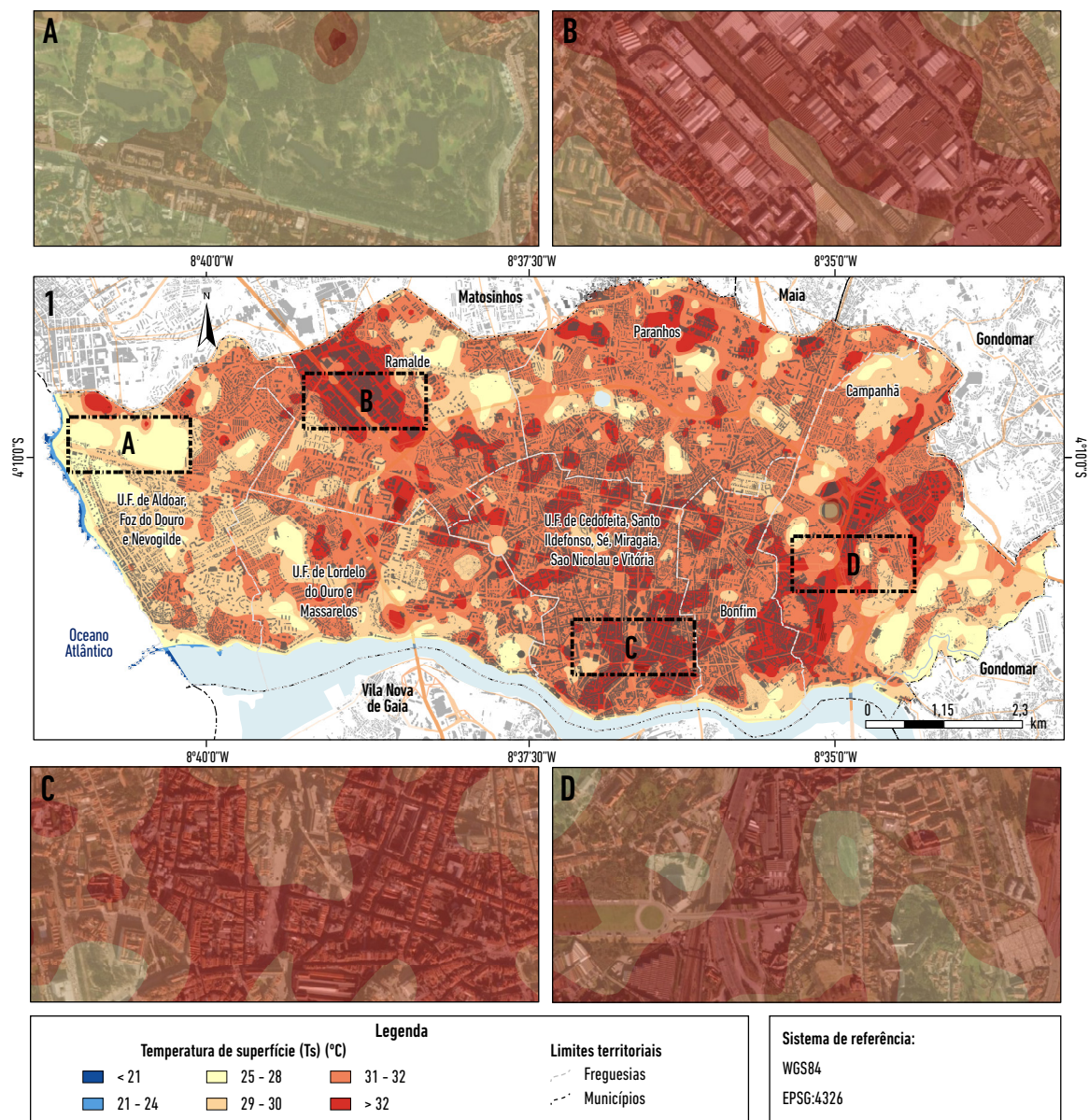


Figura 4. Temperatura de Superfície (TS) no município do Porto, de 09/07/2014, às 10 horas.

Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 09 de julho de 2014, edificado e rede viária das Câmaras Municipais da Área Metropolitana do Porto.

Notas: (a) Parque da Cidade; (b) Área Industrial do Ramalde; (c) Aliados; (d) Via de Cintura Interna (vci).

As TS variam significativamente entre as áreas urbanas mais densamente ocupadas e as áreas limítrofes do município mais arborizadas, ou sobre influência de frentes ribeirinhas que contribuem para uma amplitude de TS na ordem dos 20 °C.

A distribuição espacial das TS permite inferir os locais de produção e acumulação de calor causados, sobretudo, pela emissão de radiação de longo do comprimento de onda e da libertação de calor sensível. Concomitantemente, as ICU_{sup} formam-se na Área Industrial de Ramalde (B), no núcleo urbano central do Porto-Aliados (C) e na Via de Cintura Interna (VCI) (D). Em áreas onde se verifica a retenção e produção de calor mais reduzida, estimulada pela reflexão de radiação de pequeno comprimento de onda e libertação de calor latente, como são as ilhas de frescura, destaca-se a registada no Parque da Cidade (A).

Nas áreas identificadas com as letras B, C e D predominam TS situadas acima de 30 °C e, em alguns dos casos, superiores a 32 °C, motivadas pelo tipo de materiais utilizados em áreas industriais (zinco), pela retenção de calor em área urbana densa ou pelo calor associado às infraestruturas viárias causado pelo asfalto e intrínseco ao tráfego viário. Por seu turno, a área identificada em A apresenta as TS mais reduzidas, situadas entre os 24-28 °C e 28-30 °C, pelo contributo de áreas com cobertura arbórea que diminuem a exposição à radiação solar e aumentam a humidade do ar.

Os valores máximos, médios e mínimos da TS, bem como a respetiva amplitude térmica e o desvio-padrão por freguesia reforçam os resultados anteriores (Tabela 2). De facto, os valores de TS média mais elevados registam-se nas freguesias com maior densidade de edifícios, cujos materiais favorecem o armazenamento de energia proveniente da radiação solar e a libertação de calor artificial, tal como sucede na U.F. de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, S. Nicolau e Vitória (mediana de 31,7 °C), localizada no núcleo central do Porto.

Por seu turno, confirmam-se as formações de ICU_{sup} intrínsecas a áreas industriais ou a infraestruturas rodoviárias com intensidade de tráfego elevado e com características muito diferentes aos espaços limítrofes, tal como se patenteia na freguesia de Campanhã (17,1 °C de diferença entre a área mais quente e a mais fria) com a VCI e os espaços circundantes. Não obstante, outras freguesias apresentam TS médias amenas, em resultado da localização em áreas de frente ribeirinha que permitem a penetração de brisas terrestres à noite e marítimas de dia, e dos ventos dominantes (Ng 2009), tal como ocorre na U.F. de Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde e na

U.F. Lordelo de Ouro e Massarelos. Neste contexto, as áreas com maior afastamento das frentes de água originam similaridades de TS, cuja amplitude térmica, em termos espaciais, é mais reduzida e às quais se associam TS mínimas e máximas mais elevadas, embora seja necessário enquadrar na estação do ano a que os dados se referem (Verão). Com efeito, as freguesias de Ramalde e de Paranhos gozam da sua posição geográfica continental, que se imprime nos padrões de TS registados, embora não seja possível desvincular das características dos materiais utilizados nos equipamentos e infraestruturas (e.g. Área Industrial do Ramalde), que em muito influenciam estas áreas.

Tabela 2. Quadro-síntese das Temperatura de Superfície (TS) por freguesia, no Porto

Freguesia	T_{min}	T_{max}	AmpTerm	T_{median}	D.p.(σ)
Bonfim	19,9	34,3	14,4	31,3	2,4
Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória	20,7	35,1	14,5	31,7	1,6
Campanhã	20,0	37,1	17,1	30,6	2,3
Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	15,2	34,1	19,0	29,3	3,4
Ramalde	25,5	36,8	11,2	31,0	1,8
Paranhos	26,2	36,0	9,8	30,9	1,2
Lordelo do Ouro e Massarelos	18,0	33,6	15,5	30,0	3,3

Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI 9 de julho de 2014.

Notas: T_{min} = Temperatura de superfície mínima (°C); T_{max} = Temperatura de superfície máxima (°C); AmpT = Amplitude Térmica; T_{median} = Mediana da Média (°C); D.p. (σ) = Desvio-padrão.

Atendendo aos padrões apontados anteriormente, os três perfis de amostragem (Figuras 5, 6 e 7) mostram dissemelhanças nítidas entre as áreas mais urbanizadas e os espaços com vegetação arbórea, no que respeita ao gradiente térmico da superfície. No perfil I (Parque da Cidade-Área Industrial do Ramalde) (Figura 5), as baixas TS registadas estão intrinsecamente relacionadas com os valores mais elevados de NDVI e SAVI (geralmente $\geq 0,4$), onde a presença de vegetação cria condições favoráveis ao aumento da humidade do ar, por libertação de vapor de água para a atmosfera circundante e à concretização do processo de evapotranspiração. Pelo contrário, o NDBI regista os valores mais reduzidos ($\leq -0,2$). Findo o Parque da Cidade, os efeitos destas áreas de vegetação fazem-se sentir até distâncias

muito reduzidas (Andrade e Vieira 2007), pelo que o aumento da TS é muito significativo. Entre Vila Nova do Aldoar (300-400 m) e a Área Industrial do Ramalde (2.000 m), as elevadas TS se correlacionam com os valores mais altos de NDBI e com os valores mais baixos de NDVI e SAVI. Com efeito, a Área Industrial regista os valores mais elevados de TS (32 °C–36 °C) e de NDBI, provocados pelas superfícies zincadas, onde tem maior incidência a energia com grande comprimento de onda.

O segundo transecto, localizado entre a Foz do Douro até ao Ramalde (Figura 6), apresenta padrões de TS cuja interpretação é mais complexa, uma vez que atravessam áreas do município do Porto com uma miscelânea de ocupações do solo e, simultaneamente, com uma heterogeneidade de comportamentos às respostas espectrais.

Aos primeiros 200 metros do perfil estão associadas habitações de residência maioritariamente unifamiliar ou condomínios que se localizam junto à foz (Praia da Luz), cujas TS rondam os 29 °C e onde os valores de NDBI são ≥ 0 . Efetivamente, os valores de TS se reduzem nas áreas de prado e com vegetação onde os valores de SAVI e NDVI são simultaneamente mais elevados. Deve referir-se, ainda, que o perfil reflete em quase toda a sua extensão valores de NDVI e SAVI $\geq 0,2$ e NDBI ≤ 0 , à exceção da área industrial do Ramalde, onde tal como no perfil anterior, as TS ascendem a valores entre 32 °C–35 °C e o NDBI a valores ≥ 0 .

Por sua vez, o perfil entre os Clérigos e a Corujeira (Perfil III) (Figura 7) apresenta alguma complexidade de análise, em resultado das observações de comportamentos térmicos muito distintos entre as diversas superfícies, que refletem os níveis de urbanização do núcleo central do Porto.

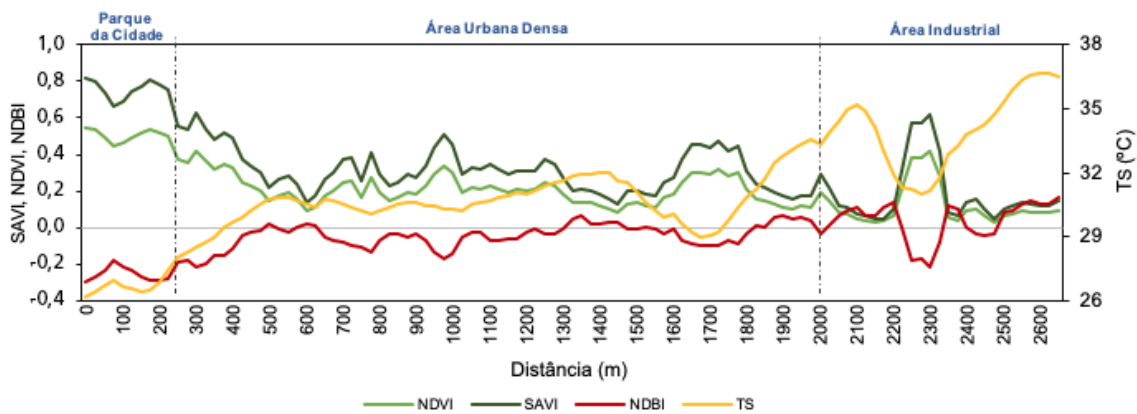


Figura 5. Perfil (A) Parque da Cidade-Área Industrial (Ramalde), WSW-ENE: variação de TS, NDVI, SAVI, NDBI. Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 9 de julho de 2014.

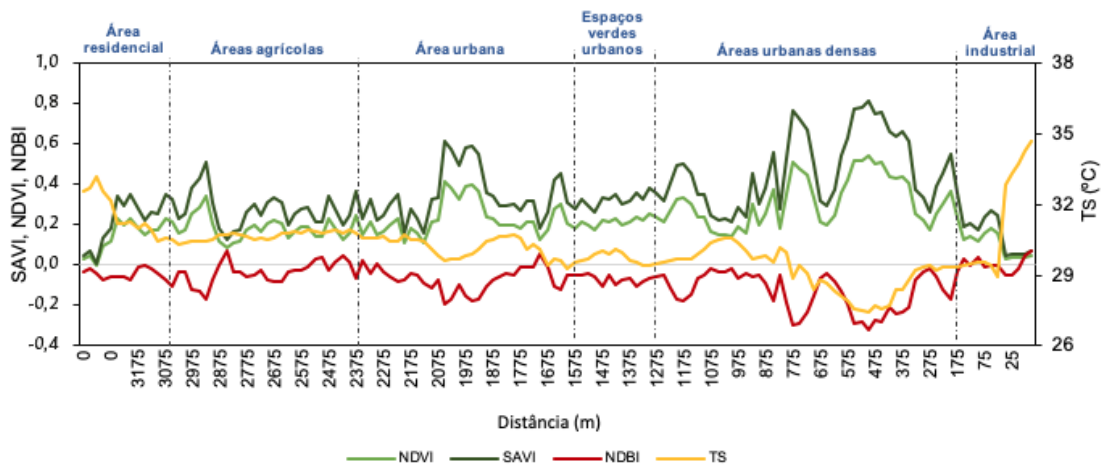


Figura 6. Perfil (B) Foz do Douro-Ramalde, WSW-ENE: variação de TS, NDVI, SAVI, NDBI. Dados: imagem de satélite Landsat 8-oli de 9 de julho de 2014.

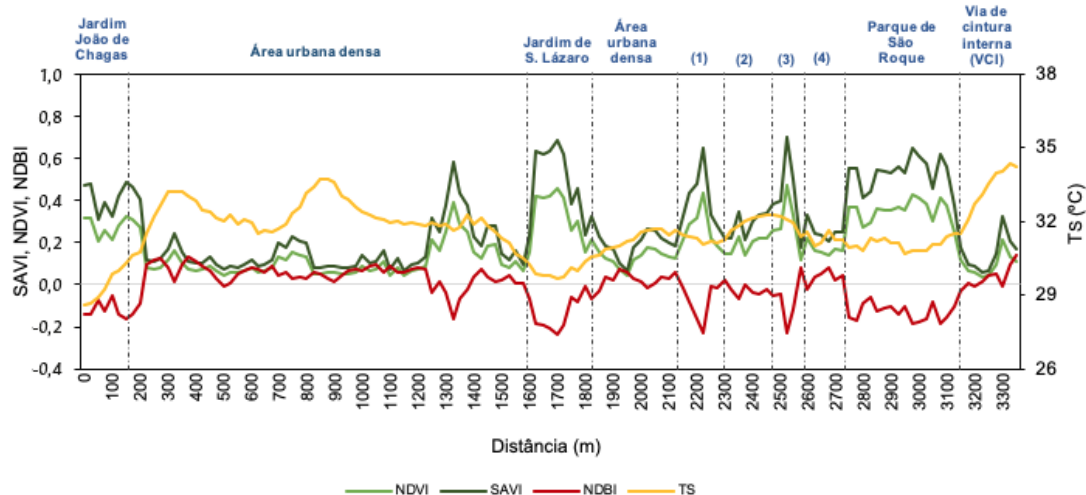


Figura 7. Perfil (c) Clérigos-Cocujreira, SW-NE: variação de TS, NDVI, SAVI, NDBI.

Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 9 de julho de 2014, edificado e rede viária das Câmaras Municipais da Área Metropolitana do Porto.

Nota: (1) área de prado junto ao Hospital de Joaquim Urbano; (2) área urbana; (3) Jardim J. G. Oliveira; (4) área Urbana.

Desta forma, toda a área urbana regista TS muito elevadas, com origem na preponderância de edifícios em banda e em altura (15 m). Diga-se, a propósito, que os valores de NDBI são maioritariamente ≥ 0 . As TS mais elevadas se verificam na VCI (Via de Cintura Interna), onde ascende a valores ≥ 32 °C. No entanto, é possível identificar pequenas manchas verdes dispersas, como o Jardim de S. Lázaro e o Jardim de João Chagas (Cordoaria), que, entre outros, concorrem para valores de NDVI e SAVI $\geq 0,2$, potenciando o arrefecimento evaporativo e, consecutivamente, o conforto bioclimático nestes espaços.

Embora o tráfego rodoviário contribua significativamente para o aumento da TS, deve referir-se que a altura dos edifícios se correlaciona positivamente com os valores de TS e de NDBI, e apresenta um comportamento contrário relativamente aos índices de SAVI e NDVI. Aliás, as áreas mais edificadas serão aquelas que têm NDBI $\geq 0,1$ e NDVI $\leq 0,2$.

A correlação entre a TS e os índices calculados é patenteada na Tabela 3 e resulta da amostra de pontos dos Perfis I, II e III, das figuras 5, 6 e 7, respetivamente. Deste modo, em concomitância com os resultados anteriores, nota-se uma correlação positiva perfeita entre NDVI e SAVI, visto que servem os mesmos propósitos. Atendendo a este facto, quer o NDVI, quer o SAVI, apresentam uma correlação negativa muito forte com o NDBI. Além disso, o NDVI e SAVI se correlacionam negativamente com a TS, ao passo que as elevadas TS se correlacionam com os valores mais altos de NDBI.

Tabela 3. Coeficientes p do teste de correlação de Spearman ($p < 0,0001$) entre TS, SAVI, NDVI e NDBI

Variáveis	NDBI	NDVI	SAVI	TS
NDBI	1,000			
NDVI	-0,887	1,000		
SAVI	-0,887	1,000	1,000	
TS	0,701	-0,694	-0,694	1,000

Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 9 de julho de 2014, edificado e rede viária das Câmaras Municipais da Área Metropolitana do Porto.

Por esta razão, as áreas onde se apuram TS mais elevadas correspondem aos espaços não arborizados ou cuja vegetação é muito pouco densa. Esta questão é elementar, considerando que a composição vegetal assume um papel muito relevante para a diminuição das TS, mais que a exposição das vertentes, a altitude ou a topografia.

Contributo de áreas funcionais para os valores de temperatura de superfície (ts)

Após terem sido apuradas as TS, procurou-se determinar os usos do solo que contribuem para o aquecimento ou arrefecimento do município do Porto (Figura 8). Efetivamente, os usos do solo que mais contribuem para o aumento da TS correspondem aos territórios artificializados (0,63), ao passo que os corpos de água apresentam um contributo positivo para o arrefecimento (-0,36). No que respeita aos espaços verdes urbanos, embora detenham um papel significativo, em teoria, para o resfriamento evaporativo, o desprovimento de espaços

dedicados a áreas arborizadas, que se circunscrevem ao parque da cidade e a alguns jardins dispersos pelo município, aos quais se associam muitas vezes áreas de elevado, reduzem a capacidade reguladora da temperatura desta classe de usos do solo.

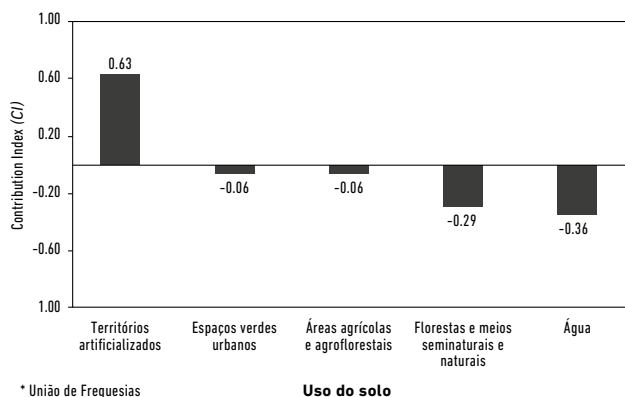


Figura 8. Contributo dos diferentes usos do solo para a TS. Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 9 de julho de 2014, edificado e rede viária das Câmaras Municipais da Área Metropolitana do Porto.

Atendendo a estes resultados, a consideração das diversas freguesias do município para o índice de contribuição permite-nos detalhar a informação presente ao nível dos usos do solo. A Figura 9 ilustra a contribuição das freguesias para os valores de TS registados. A TS média da U.F. de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, S. Nicolau e Vitória freguesia (localizada no núcleo central) e das freguesias de Ramalde e Paranhos (onde já não se sentem os efeitos reguladores da frente ribeirinha) são as que contribuem mais significativamente para o aquecimento de todo o município. Por seu turno, a U.F. de

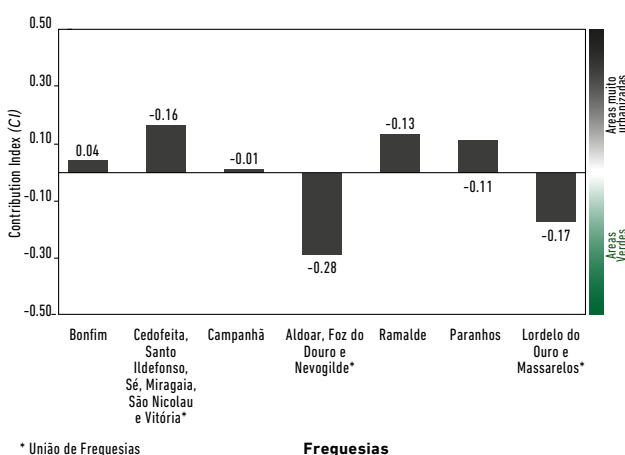


Figura 9. Contributo das freguesias para a TS. Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 9 de julho de 2014 e carta de uso e ocupação do solo do município do Porto.

Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde e a U.F. de Lordelo do Ouro e Massarelos contribuem para o efeito de arrefecimento, pela existência de um parque da cidade, no primeiro caso, e pela sua posição sobre influência oceânica, em ambos. Assim, é possível distinguir claramente estas duas freguesias com maior capacidade de arrefecimento por evapotranspiração, ao passo que as restantes se assumem como mais urbanizadas, em função dos níveis de impermeabilização, que aumentam as TS.

Nível de criticidade ambiental

A combinação dos valores de TS e de NDVI permitiu a geração do cartograma de criticidade ambiental do Porto (Figura 10). Como esperado, o nível de criticidade ambiental severo associa-se às áreas de maior impermeabilização intrínsecas ao núcleo urbano. As áreas industriais e as principais vias estruturantes geradoras de tráfego se incluem no mesmo nível de severidade, pese as TS serem muito altas.

Embora os espaços adjacentes a vias de elevado tráfego ou a edifícios com cobertura zincada possam apresentar TS mais reduzidas, é certo que não integram espaços com vegetação arbórea densa, pelo que apresentam, vulgarmente, nível de criticidade moderado a elevado.

Os resultados permitem, ainda, inferir que os setores de vegetação arbórea densa localizados a oeste (designadamente o parque da cidade) e a este (no Soutelo) contribuem para níveis de criticidade reduzidos. Contudo, note-se, em traços gerais, a presença de um conjunto de áreas com nível criticidade reduzido, em toda a extensão do município, mesclados por outras áreas cuja criticidade é moderada a severa. Tendo em conta a observação destas condições, atesta-se a preponderância de áreas com nível de criticidade reduzido (30,2%), embora seja imprescindível considerar as áreas com grau de criticidade severo, por também apresentarem um peso relativo significativo (24,9%) à escala municipal.

A Tabela 4 sintetiza os principais resultados do nível de criticidade ambiental por freguesia. Com efeito, sobressai o facto da U.F. de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, S. Nicolau e Vitória apresentar um nível de criticidade severo, em consequência da proporção de áreas impermeabilizadas, onde os efeitos potenciais por esfriamento evaporativo são reduzidos. Além disso, áreas de consolidação urbana ou onde predominam unidades industriais promovem níveis de criticidade elevado. Em sentido inverso, a U.F. de Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde apresenta grau de criticidade reduzido, em consequência da proximidade à foz e à presença do parque da cidade, que ocupa uma extensão de 13,2% de área da freguesia.

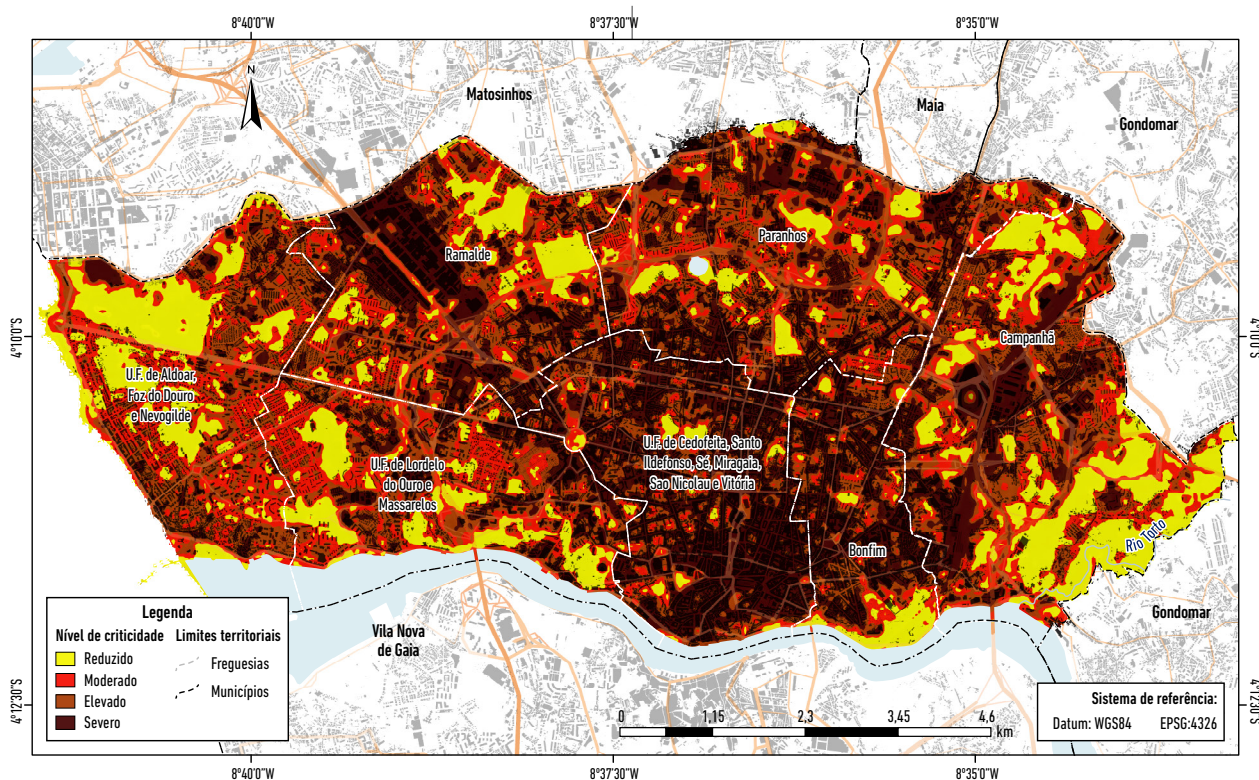


Figura 10. Nível de criticidade ambiental no município do Porto.

Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 9 de julho de 2014, edificado e rede viária das Câmaras Municipais da Área Metropolitana do Porto.

Tabela 4. Nível de criticidade global por freguesias do Porto

Freguesia	Nível de criticidade
Bonfim	Severo
Campanhã	Moderado
Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	Reduzido
Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória	Severo
Lordelo do Ouro e Massarelos	Moderado
Paranhos	Moderado
Ramalde	Elevado

Dados: imagem de satélite Landsat 8-OLI de 9 de julho de 2014.

Discussão

Os resultados obtidos sugerem uma relação direta entre a densidade de áreas construídas e as TS mais elevadas e, paralelamente, o efeito de vegetação para a constituição de importantes “ilhas de frescura superficial” (e.g. parque da cidade), quer durante o dia, quer durante a noite, que são providenciados por padrões distintos dos usos do solo (Monteiro e Madureira 2019). Os valores de TS mais elevados das áreas industriais localizadas no município são

causados pelo maior albedo que está associado a folhas de amianto ou zinco ($0,50\alpha-0,70\alpha$), pois apesar de absorverem menos energia, esta é suficiente para aquecer o corpo, visto que não é eliminada ou utilizada, devido à natureza do material (Lopes 2009; Cardoso 2012; Forman 2014;). Pelo contrário, as principais vias asfaltadas, com tráfego intenso, apresentam baixo albedo e são responsáveis pelo armazenamento de radiação solar durante o dia e a sua conversão em energia térmica à noite (Bowler et al. 2010; Senanayake, Welivitiya e Nadeeka 2013) pelo processo de irradiação terrestre. Estes resultados são coincidentes com os resultados apresentados por Madureira et al. (2021) e Monteiro et al. (2018) para a mesma área de estudo, e com os de van Hove et al. (2015) para a Área Metropolitana de Roterdão (Holanda) ou com os de Lemus-Canovas et al. (2019) para a Área Metropolitana de Barcelona.

Essas conclusões são reiteradas na leitura dos transectos das Figuras 5, 6 e 7, em que se verificam: (i) áreas mais quentes no centro histórico e núcleo urbano, em resultado da densidade de construções e da altura dos edifícios; (ii) área industrial na fração noroeste, em Ramalde, com $TS \geq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, em resultado dos prédios

com coberturas zincadas; (iii) área muito quente a Nordeste, consequência de vias de circulação intensa e rápida; e (iv) espaços vegetados com TS mais baixas, nomeadamente nas áreas situadas a oeste e a este do município. A este respeito, Monteiro (1993) apurou que as áreas a oeste e a este do município apresentavam anomalias térmicas mais baixas, ao contrário do núcleo urbano e da área industrial que patenteiam anomalias positivas entre 3-4 °C. A Figura 8 é reveladora disso mesmo ao apurar contribuições de TS mais significativas na freguesia de Ramalde e na U.F. de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, S. Nicolau e Vitória. Em relação a esta última, verifica-se um nível de criticidade severo (Figura 9 e Tabela 3). Por sua vez, as freguesias de Ramalde e Bonfim apresentam níveis de criticidade elevados. Neste caso, merece especial atenção a freguesia de Bonfim, cujos resultados do CI não substanciavam uma influência tão significativa para o aumento da temperatura do município.

Desta forma, através da comparação de índices de combinação sintéticos, *Contribution Index* (CI) e o Nível de Criticidade Ambiental, verificou-se que os dados relativos às freguesias eram suplementares, visto que ambos consideravam padrões dissemelhantes, decorrentes dos elementos ponderados. Para tal, as principais diferenças de ambos os índices decorrem: (i) do emprego da área funcional na fórmula aplicada pelo CI, que afeta em grande medida a amplitude de valores do índice (Qiao, Tian e Xiao 2013) na freguesia em análise; (ii) o uso exclusivo da TS em função da área para a derivação do CI, que por si só não é capaz de avaliar todas as situações, pois áreas densamente construídas em alguns casos não apresentam TS tão elevadas e outras áreas arborizadas não asseguram, inevitavelmente, TS mais baixas; (iii) a relação entre as TS e o NDVI no Nível de Criticidade favorece a interpretação dos resultados, pois ambas as variáveis têm um papel fundamental nestas análises e apresentam relações já documentadas na literatura (Weng 2004; Deng et al. 2015; Guha e Govil 2021; Jamali et al. 2022).

Refira-se, a propósito, que embora exista uma correlação inversa nítida entre estas variáveis (TS e NDVI), é certo que esta não é perfeita, tal como ficou patente na análise da Tabela 2 ($p = -0,694$). Para este facto, podem contribuir os níveis de humidade que caracterizam a área de estudo e conforme as descobertas identificadas nos estudos de Lambin e Ehrlich (1996) ou de Marzban, Sodoudi e Preusker (2018). Deste modo, a aplicação destas duas variáveis neste índice conclusivo é essencial e

em nada invalida os resultados do CI. Ainda a respeito do NDVI, convém referir que este não consegue incluir todos os detalhes, atendendo a que a informação substanciada é muito generalista (Yuan e Bauer 2007). No que respeita aos valores de NDBI, estes são, em média, mais baixos aos verificados para as áreas construídas por Chen et al. (2006) (0,1-0,3), não por se verificar densidades de construção mais reduzidas, mas por ajustamentos na transição da imagem Landsat 7 ETM+ para Landsat 8-OLI para a derivação dos índices (embora se utilizem fórmulas para bandas diferentes com base nos procedimentos da NASA). A respeito, Zhou et al. (2014) menciona que a aplicabilidade do índice ao Landsat 8 continua ainda a ser determinado e não existe nenhuma referência de investigação relevante que tenha considerado as suas limitações. De qualquer modo, os resultados identificados precedentemente não invalidam práticas futuras de planeamento urbano que lhes possam estar subjacentes face à vulnerabilidade climática que poderá agudizar-se nas próximas décadas no município do Porto.

Este mapeamento serve para validar algumas das áreas mais atrativas ou repulsivas para o cidadão, particularmente durante os eventos associados aos extremos climáticos (e.g. ondas de calor, ondas de frio, ventos fortes, tempestades ou precipitação intensa) (Madureira et al. 2021). A proposta desta abordagem metodológica para a identificação da vulnerabilidade climática é muito simples e baseia-se em dados captados através de uma análise por detecção remota das imagens do Landsat 8-OLI. Esta informação permite, em último recurso, orientar os cidadãos que se deslocam na cidade do Porto quando ocorrem temperaturas extremas, minimizando os riscos climáticos e prejudiciais à saúde da população.

Face ao exposto, recomenda-se que sejam consideradas algumas estratégias de deslocação na cidade em áreas com ICU mais elevada, especialmente durante os dias com temperaturas extremas elevadas. Tendo em consideração as áreas identificadas, perante temperaturas extremamente altas, a nossa sugestão será a de que se opte no horário de maior calor desses dias por alguns dos espaços verdes da cidade (nomeadamente o Parque da Cidade, os Jardins do Palácio de Cristal e os Jardins da Fundação de Serralves), bem como locais mais próximos de pontos de água (bebedouros, chafarizes e fontes). Além disso, é importante não olvidar que as áreas próximas do rio Douro e do Oceano Atlântico são beneficiadas nesta época do ano pelo efeito moderado

da temperatura, contribuindo para a redução dos níveis de criticidade ambiental e a vulnerabilidade climática subjacente a estas áreas.

Conclusões

Os resultados permitem validar a hipótese inicial que sustenta a formação de ICU_{sup} em áreas edificadas que podem ser analisadas com recurso ao tratamento de imagem de satélite. Efetivamente, corroborou-se a existência de alguns espaços do município que apresentam condições desajustadas ao conforto térmico, por possuírem mais fontes de calor (TS muito elevadas) e apresentarem níveis de criticidade severos. Com efeito, os valores mais elevados de TS média estão intrinsecamente associados a áreas de construção vertical e densa ou onde os materiais de cobertura armazenam calor, à hora da manhã em estudo, e possibilitam que esta energia esteja disponível para libertação na atmosfera urbana durante a noite, propiciando condições reduzidas ao arejamento e arrefecimento do ar. Em condição oposta, as áreas de vegetação arbórea, essencialmente localizadas na fração oeste e este do município, contribuem significativamente para o arrefecimento evaporativo, para a renovação do ar, e associam-se aos valores mais elevados de NDVI e SAVI. Assim, estas áreas estão confinadas espacialmente a duas áreas diametralmente opostas (Parque da Cidade-Soutelo), mas têm uma influência significativa sobre os padrões de TS mais baixos. As áreas com maiores TS estão associadas aos materiais de cobertura com baixo albedo como o amianto ou o concreto, que podem ser solucionados com a utilização de materiais de construção de maior albedo.

Conjuntamente, evidenciou-se com esta investigação que os efeitos e *nuances* térmicas provocados pelas atividades humanas em espaço urbano podem deter um maior significado do que os fatores climáticos associados às características geográficas, designadamente a amplitude altimétrica, a proximidade atlântica/ao rio ou a exposição, corroborados por outras investigações anteriores realizadas na área de estudo por outros autores (Amorim e Monteiro 2011; Lopes et al., 2022; Madureira et al. 2021; Monteiro 2006; Monteiro et al. 2012; Monteiro et al. 2018). Estas características poderão diminuir ou acentuar a vulnerabilidade, a curto e médio prazo. As áreas verdes, nomeadamente na cidade do Porto, tais como o Parque da Cidade, os Jardins do Palácio de Cristal e os Jardins da Fundação de Serralves, são importantes refúgios climáticos durante os meses mais quentes do verão.

Não menos importante, e numa perspectiva de médio e longo prazo, a plantação de árvores, estrategicamente, com o emprego de sistemas de aspersão, em alguns locais, e a dotação de áreas públicas destinadas a espaços verdes, cuja estrutura arbórea tenha um papel fundamental na promoção de condições bioclimáticas favoráveis, possibilitam o arrefecimento em espaço urbano, através do processo de evapotranspiração e do efeito criado pela sombra. Ainda assim, estas soluções são deveras utópicas, atendendo a que, em Portugal, os instrumentos legais nem sempre substanciam informações relativas ao ambiente térmico urbano e o Plano Diretor Municipal (PDM) limita-se a incluir algumas referências às condições climáticas regionais, e quando a mesma informação existe, é escassa ou insuficiente.

O estudo dos fatores espaço-temporais que contribuem para o efeito da ICU nas cidades aumenta o nosso conhecimento sobre as causas e a sua variação espacial. Esse conhecimento é fundamental para projetar estratégias eficazes de mitigação do efeito da ICU. Tendo em conta a investigação desenvolvida para o município do Porto, prevê-se a realização de mais investigações, onde se procurará:

1. avaliar as relações entre as mudanças espaço-temporais e a intensidade da ICU, com a utilização de, pelo menos, duas imagens de satélite com intervalo temporal alargado;
2. comparar os padrões obtidos através da utilização de imagens de satélite com os resultados das medições itinerantes efetuadas pelos autores ou através dos dados dos sensores de monitorização climática regional;
3. desenhar algumas estratégias de planeamento territorial e urbano que visem mitigar os efeitos da ICU face à suscetibilidade a extremos de calor.

Referências

- Abdulateef, Maryam, e Al-Alwan Hoda. 2022. "The Effectiveness of Urban Green Infrastructure in Reducing Surface Urban Heat Island." *Ain Shams Engineering Journal* 13 (1). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.012>
- Alcoforado, Maria-João, Henrique Andrade, António Lopes, e João Vasconcelos. 2009. "Application of Climatic Guidelines to Urban Planning: The Example of Lisbon (Portugal)." *Landscape and Urban Planning* 90 (1): 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.006>
- Alcoforado, Maria-João, António Saraiva Lopes, Henrique Andrade, e João Vasconcelos. 2005. "Orientações climáti-

- cas para o ordenamento em Lisboa.” Em *Relatório nº 4 da Área de Geo-Ecologia*, editado por Maria-João Alcoforado, António Saraiva Lopes, Henrique Andrade e João Vasconcelos, 1-83. Lisboa: CEG.
- Alves, Elis Dener Lima. 2016. “Seasonal and Spatial Variation of Surface Urban Heat Island Intensity in a Small Urban Agglomerate in Brazil.” *Climate* 4 (4): 1-11. <https://doi.org/10.3390/cli4040061>
- Amorim, Margarete Cristiane de Costa Trindade, e Ana Monteiro. 2011. “As temperaturas intraurbanas: exemplos do Brasil e de Portugal.” *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia* no. 13. <https://doi.org/10.4000/confins.7284>
- Andrade, Henrique. 2005. “O clima urbano–natureza, escalas de análise e aplicabilidade.” *Finisterra: Revista portuguesa de geografia* 40 (80): 67-91. <https://doi.org/10.18055/Finis1479>
- Andrade, Henrique, e Rute Vieira. 2007. “A Climatic Study of an Urban Green Space: The Gulbenkian Park in Lisbon (Portugal).” *Finisterra: Revista portuguesa de geografia* 42 (84): 27-46. <https://doi.org/10.18055/Finis1420>
- Berger, C., J. Rosentreter, M. Voltersen, C. Baumgart, C. Schmutli, e S. Hese. 2017. “Spatio-Temporal Analysis of the Relationship Between 2D/3D Urban Site Characteristics and Land Surface Temperature.” *Remote Sensing of Environment* 193: 225-243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.020>
- Bowler, Diana, Lisette Buyung-Ali, Teri Knight, e Andrew Pullin. 2010. “Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence.” *Landscape and Urban Planning* 97 (3): 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Cardoso, Renata dos Santo. 2012. “O campo e a cidade em Presidente Prudente: uma contribuição aos estudos de clima urbano.” Tese de Geografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- Chen, Xiao-Ling, Hong-Mei Zhao, Ping-Xiang Li, e Zhi-Yong Yin. 2006. “Remote Sensing Image-Based Analysis of the Relationship Between Urban Heat Island and Land Use/Cover Changes.” *Remote sensing of environment* 104 (2): 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>
- Coelho, André Luiz, e Wesley de Souza Campos Correa. 2013. “Temperatura de superfície celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações.” *Revista Geográfica Acadêmica* 7 (1): 31-45.
- Deilami, Kaveh, M. D. Kamruzzaman, e Yan Liu. 2018. “Urban Heat Island Effect: A Systematic Review of Spatio-Temporal Factors, Data, Methods, and Mitigation Measures.” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 67: 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
- Deng, Chengbin, e Changshan Wu. 2013. “Examining the Impacts of Urban Biophysical Compositions on Surface Urban Heat Island: A Spectral Unmixing and Thermal Mixing Approach.” *Remote Sensing of Environment* 131: 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.020>
- Deng, Yuanhong, Shijie Wang, Xiaoyong Bai, Yichao Tian, Luhua Wu, Jianyong Xiao, Fei Chen, e Qinghuan Qian. 2018. “Relationship Among Land Surface Temperature and LUCC, NDVI in Typical Karst Area.” *Scientific reports* 8 (1): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-19088-x>
- Effat, Hala Adel, e Ossman Abdel Kader Hassan. 2014. “Change Detection of Urban Heat Islands and Some Related Parameters Using Multi-Temporal Landsat Images; A Case Study for Cairo City, Egypt.” *Urban Climate* 10: 171-188. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.10.011>
- Eum, Jeong-Hee, Dieter Scherer, Ute Fehrenbach, e Jung-Hun Woo. 2011. “Development of an Urban Landcover Classification Scheme Suitable for Representing Climatic Conditions in a Densely Built-up Asian Megacity.” *Landscape and Urban Planning* 103 (3-4): 362-371. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.08.010>
- Fernandes, José Alberto. 2020. *Geografia do Porto*. Porto: Book Cover Editora.
- Ferreira, Cássia, Ana Monteiro, e Helena Madureira. 2019. “Percepção de risco climático: uma análise para a cidade do Porto-Portugal e Juiz de Fora-Brasil.” *Revista de Geografia-PPGEO-UFJF* 9 (1): 126-155. <https://doi.org/10.34019/2236-837X.2019.v9.18088>
- Forman, Richard. 2014. *Urban Ecology: Science of Cities*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Friedl, M. A., D. K. McIver, J. C. F. Hodges, X. Y. Zhang D. Muchoney, A. H. Strahler, C. E. Woodcock, S. Gopal, A. Schneider, A. Cooper, A. Baccini, F. Gao, e C. Schaaf. 2002. “Global Land Cover Mapping from MODIS: Algorithms and Early Results.” *Remote Sensing of Environment* 83 (1-2): 287-302. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00078-0)
- Ghobadi, Parisa, e Nazanin Nasrollahi. 2021. “Assessment of Pollutant Dispersion in Deep Street Canyons Under Different Source Positions: Numerical Simulation.” *Urban Climate* 40. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101027>
- Giles-Corti, Billie, Melanie Lowe, e Jonathan Arundel. 2020. “Achieving the SDGs: Evaluating Indicators to be Used to Benchmark and Monitor Progress Towards Creating Healthy and Sustainable Cities.” *Health Policy* 124 (6): 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2019.03.001>
- Gomes, António, José Teixeira, e Isabel Fernandes. 2020. “Geomorfologia.” Em *Geografia do Porto*, editado por J. Rio Fernandes. Porto: Book Cover.

- Guha, Subhanil, e Himanshu Govil. 2021. "An Assessment on the Relationship Between Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index." *Environment, Development and Sustainability* 23: 1944-1963. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00657-6>
- Hua, Lizhong, Xinxin Zhang, Xi Chen, Kai Yin, e Lina Tang. 2017. "A Feature-Based Approach of Decision Tree Classification to Map Time Series Urban Land Use and Land Cover with Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI in a Coastal City, China." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6 (11): 331. <https://doi.org/10.3390/ijgi6110331>
- Huete, A. R. 1988. "A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)." *Remote Sensing of Environment* 25 (3): 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- INE (Instituto Nacional de Estatística). 2021. "População residente (n°) por local de residência (NUTS-2013), sexo e grupo Etário." Recuperado em 11 de fevereiro de 2022. https://ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&contexto=pi&indOcorrCod=0011166&selTab=tabo
- Jamali, Ali Akbar, Reza Ghorbani Kalkhajeh, Timothy O. Randhir, e Songtang He. 2022. "Modeling Relationship Between Land Surface Temperature Anomaly and Environmental Factors Using GEE and Giovanni." *Journal of Environmental Management* 302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113970>
- Kuttler, Wilhelm. 2008. "The Urban Climate-Basic and Applied Aspects." Em *Urban ecology*, editado por John M. Marzluff, Eric Shulenberg, Wilfried Endlicher, Marina Alberti, Gordon Bradley, Clare Ryan, Ute Simon, e Craig ZumBrunnen 233-248. Nova York: Springer.
- Lambin, E. F., e D. Ehrlich. 1996. "The Surface Temperature-Vegetation Index Space for Land Cover and Land-Cover Change Analysis." *International Journal of Remote Sensing* 17 (3): 463-487. <https://doi.org/10.1080/01431169608949021>
- Lemus-Canovas, Marc, Javier Martin-Vide, Carmen Moreno-García, e Joan López-Bustins. 2020. "Estimating Barcelona's Metropolitan Daytime Hot and Cold Poles Using Landsat-8 Land Surface Temperature." *Science of the Total Environment* 699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134307>
- Li, Juan-juan, Xiang-rong Wang, Xin-jun Wang, Wei-chun Ma, e Hao Zhang. 2009. "Remote Sensing Evaluation of Urban Heat Island and Its Spatial Pattern of the Shanghai Metropolitan Area, China." *Ecological Complexity* 6 (4): 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.02.002>
- Li, Junxiang, Conghe Song, Lu Cao, Feige Zhu, Xianlei Meng, e Jianguo Wu. 2011. "Impacts of Landscape Structure on Surface Urban Heat Islands: A Case Study of Shanghai, China." *Remote Sensing of Environment* 115 (12): 3249-3263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>
- Li, Xiaoma, Yuyu Zhou, Ghassem R. Asrar, Marc Imhoff, e Xuecao Li. 2017. "The Surface Urban Heat Island Response to Urban Expansion: A Panel Analysis for the Conterminous United States." *Science of the Total Environment* 605-606: 426-435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.229>
- Lopes, António. 2009. "O sobreaquecimento das cidades. Causas e medidas para a mitigação da ilha de calor de Lisboa." *Territorium* 15: 39-52. https://doi.org/10.14195/1647-7723_15_4
- Lopes, Hélder. 2022. "A influência do clima e da morfologia urbana na atividade turística da Área Metropolitana do Porto-Perceções e simulação do conforto bioclimático dos turistas." Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Braga.
- Lopes, Hélder, Paula C. Remoaldo, Vítor Ribeiro, e Javier Martin-Vide. 2021. "Perceptions of Human Thermal Comfort in an Urban Tourism Destination-A Case Study of Porto (Portugal)." *Building and Environment* 205. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108246>
- Lopes, Hélder, Paula C. Remoaldo, Vítor Ribeiro, e Javier Martin-Vide. 2022. "Pathways for Adapting Tourism to Climate Change in an Urban Destination – Evidences Based on Thermal Conditions for the Porto Metropolitan Area (Portugal)." *Journal of Environmental Management* 315: 115161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115161>
- Martin-Vide, Javier, e M. Carmen Moreno-García. 2020. "Probability Values for the Intensity of Barcelona's Urban Heat Island (Spain)." *Atmospheric Research*: 240. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104877>
- Marzban, Forough, Sahar Sodoudi, e René Preusker. 2018. "The Influence of Land-Cover Type on the Relationship Between NDVI-LST and LST-T air." *International Journal of Remote Sensing* 39 (5): 1377-1398. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1402386>
- Mirzaei, Parham A., e Fariborz Haghighat. 2010. "Approaches to Study Urban Heat Island-Abilities and Limitations." *Building and Environment* 45 (10): 2192-2201. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>
- Madureira, Helena, Ana Monteiro, e Sara Cruz. 2021. "Where to Go or Where Not to Go—A Method for Advising Communities During Extreme Temperatures." *Climate* 9 (3), 49. <https://doi.org/10.3390/cli9030049>
- Monteiro, Ana. 1993. "O clima urbano do Porto: contribuição para a definição das estratégias de planeamento e ordenamento do território." Tese de doutoramento, Universidade do Porto, Porto.
- Monteiro, Ana. 2006. "A climatologia urbana enquanto indicador de sustentabilidade urbana: estudos de caso na Área Metropolitana do Porto." Em *PLURIS*, editado por J. Mendes, A. Rodrigues e L. Souza, 1-13. Braga: Escuela de Ingeniería de la Universidad de Minho.

- Monteiro, Ana, M. Amorim, e F. L. Matos. 2017. "As temperaturas de superfície no Porto: análise dos contextos bioclimáticos nos bairros sociais." Em *Livro de atas do XI Congresso da Geografia Portuguesa. As dimensões e a responsabilidade social da Geografia*, 9-11 de novembro de 2012, editado por T. Marques, J. Fernandes, J. Teixeira, P. Abrantes, F. Matos, e L. Soares, 489-493. Porto: Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto.
- Monteiro, Ana, L. Fonseca, M. Almeida, C. Sousa, S. Velho, e V. Carvalho. 2012. *Atlas da saúde e da doença-vulnerabilidades climáticas e socioeconómicas na Grande Área Metropolitana do Porto e Município do Porto*. Porto: CHERG.
- Monteiro, Ana, Helena Madureira, Luís Fonseca, e Paula Gonçalves. 2018. *METROCLIMA: Plano Metropolitano de Adaptação às Alterações Climáticas—Área Metropolitana do Porto*. Porto: Área Metropolitana do Porto.
- Monteiro, Ana, e Helena Madureira. 2019. "Riscos atmosféricos mistos." Em *Catástrofes mistas: uma perspetiva ambiental*, editado por L. Lourenço e A. Nunes. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Morabito, Marco, Alfonso Crisci, Giulia Guerri, Alessandro Messeri, Luca Congedo, e Michele Munafò. 2021. "Surface Urban Heat Islands in Italian Metropolitan Cities: Tree Cover and Impervious Surface Influences." *Science of the Total Environment* 751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142334>
- Mushore, Terence Darlington, John Odindi, Timothy Dube, e Onesimo Mutanga. 2017. "Prediction of Future Urban Surface Temperatures Using Medium Resolution Satellite Data in Harare Metropolitan City, Zimbabwe." *Building and Environment* 122: 397-410. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.033>
- Ng, Edward. 2009. "Policies and Technical Guidelines for Urban Planning of High-Density Cities-Air Ventilation Assessment (AVA) of Hong Kong." *Building and Environment* 44 (7): 1478-1488. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013>
- Odindi, John, Victor M. Bangamwabo, e Onesimo Mutanga. 2015. "Assessing the Value of Urban Green Spaces in Mitigating Multi-Seasonal Urban Heat using MODIS Land Surface Temperature (LST) and Landsat 8 data." *International Journal of Environmental Research* 9 (1): 9-18.
- Oke, T. R. 1995. "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects." Em *Wind climate in cities*, editado por J. Cermak, 81-107. Países Baixos: Springer.
- Oke, T. R., Gerald Mills, Andreas Christen, e James Vogt. 2017. *Urban climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Owen, Timothy W., Toby Carlson, e Robert Gillies. 1998. "An Assessment of Satellite Remotely-Sensed Land Cover Parameters in Quantitatively Describing the Climatic Effect of Urbanization." *International Journal of Remote Sensing* 19 (9): 1663-1681. <https://doi.org/10.1080/014311698215171>
- Qiao, Zhi, Guangjin Tian, e Lin Xiao. 2013. "Diurnal and Seasonal Impacts of Urbanization on the Urban Thermal Environment: A Case Study of Beijing Using modis data." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 85: 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.08.010>
- Ray, Terril. 1994. "Vegetation in Remote Sensing Faqs, Applications." ER Mapper, Ltd., Perth, unpaginated CD-ROM.
- Sarricolea, Pablo, e Oliver Meseguer-Ruiz. 2019. "Urban Climates of Large Cities: Comparison of the Urban Heat Island Effect in Latin America." *Urban Climates in Latin America*, editado por Pablo Sarricolea e Oliver Meseguer-Ruiz, 17-32. Cham: Springer.
- Sekertekin, Alihsan, Saygin Abdikan, e Aycan Murat Marangoz. 2018. "The Acquisition of Impervious Surface Area from Landsat 8 Satellite Sensor Data Using Urban Indices: A Comparative Analysis." *Environmental Monitoring and Assessment* 190 (7): 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6767-3>
- Senanayake, I. P., W. D. D. P. Welivitiya, e P. M. Nadeeka. 2013. "Remote Sensing Based Analysis of Urban Heat Islands with Vegetation Cover in Colombo City, Sri Lanka Using Landsat-7 ETM+ Data." *Urban Climate* 5: 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.07.004>
- Silva, T., F. Fonseca, D. Rodrigues, y A. Campos. 2018. "Assessing the Influence of Urban Geometry on Noise Propagation by Using the Sky View Factor." *Journal of Environmental Planning and Management* 61 (3): 535-552. <https://doi.org/10.1080/09640568.2017.1319804>
- Stathakis, Demetris, Konstantinos Perakis, e Igor Savin. 2012. "Efficient Segmentation of Urban Areas by the VIPI." *International Journal of Remote Sensing* 33 (20): 6361-6377. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.687842>
- Streutker, D. R. 2002. "A Remote Sensing Study of the Urban Heat Island of Houston, Texas." *International Journal of Remote Sensing* 23 (13): 2595-2608. <https://doi.org/10.1080/01431160110115023>
- Tiangco, M., A. Lagmay, e J. Argete. 2008. "ASTERBased Study of the NightTime Urban Heat Island Effect in Metro Manila." *International Journal of Remote Sensing* 29 (10): 2799-2818. <https://doi.org/10.1080/01431160701408360>
- United Nations. 2018. *World Urbanization Prospects. The 2017 Revision. Highlights*. Nova York: Department of Economic and Social Affairs.
- USGS. 2013. "Using the USGS Landsat 8 Product." Recuperado o 14 de maio de 2015. http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php

- Van Hove, L., C. Jacobs, B. Heusinkveld, J. A. Elbers, B. L. Van Driel, e A. Holtslag. 2015. "Temporal and Spatial Variability of Urban Heat Island and Thermal Comfort within the Rotterdam Agglomeration." *Building and Environment* 83, 91-103.
- Villa, Paolo. 2007. "Imperviousness Index Performance Evaluation for Mapping Urban Areas Using Remote Sensing Data." *Urban Remote Sensing Joint Event IEEE*: 1-6. <https://doi.org/10.1109/URS.2007.371830>
- Voogt, J. A., e T. Oke. 2003. "Thermal Remote Sensing of Urban Climates." *Remote Sensing of Environment* 86 (3): 370-384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Weng, Qihao. 2001. "A Remote Sensing? gis Evaluation of Urban Expansion and its Impact on Surface Temperature in the Zhujiang Delta, China." *International Journal of Remote Sensing* 22 (10): 1999-2014. <https://doi.org/10.1080/713860788>
- Weng, Qihao. 2009. "Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: Methods, Applications, and Trends." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (4): 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>
- Weng, Qihao, e Dale A. Quattrochi. 2006. "Thermal Remote Sensing of Urban Areas: An Introduction to the Special Issue." *Remote Sensing of Environment* 104 (2): 119-122. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.002>
- Weng, Qihao, Dengsheng Lu, e Jacquelyn Schubring. 2004. "Estimation of Land Surface Temperature-Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies." *Remote Sensing of Environment* 89 (4): 467-483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Xian, George, Hua Shi, Qiang Zhou, Roger Auch, Kevin Gallo, Zhuoting Wu, e Michael Kolian. 2021. "Monitoring and Characterizing Multi-Decadal Variations of Urban Thermal Condition Using Time-Series Thermal Remote Sensing and Dynamic Land Cover Data." *Remote Sensing of Environment* 269. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112803>
- Xu, Hanqiu. 2007. "Extraction of Urban Built-Up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic-oriented Index Combination Technique." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73(12), 1381-1391.
- Yang, Jun, Yuxin Yang, Dongqi Sun, Cui Jin, e Xiangming Xiao. 2021. "Influence of Urban Morphological Characteristics on Thermal Environment." *Sustainable Cities and Society* 72: 103045. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103045>
- Yuan, Fei, Kali E. Sawaya, Brian C. Loeffelholz, e Marvin E. Bauer. 2005. "Land Cover Classification and Change Analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by Multitemporal Landsat Remote Sensing." *Remote Sensing of Environment* 98 (2): 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.006>
- Yuan, Fei, e Marvin Bauer. 2007. "Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery." *Remote Sensing of Environment* 106 (3): 375-386. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
- Zha, Yong, Jingqing Gao, e S. Ni. 2003. "Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery." *International Journal of Remote Sensing* 24 (3): 583-594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
- Zhao, Caijun, Guobin Fu, Xiaoming Liu, e Fan Fu. 2011. "Urban Planning Indicators, Morphology and Climate Indicators: A Case Study for a North-South Transect of Beijing, China." *Building and Environment* 46 (5): 1174-1183. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.009>
- Zhao, Lei, Michael Oppenheimer, Qing Zhu, Jane W. Baldwin, Kristie L. Ebi, Elie Bou-Zeid, Kaiyu Guan, e Xu Liu. 2018. "Interactions Between Urban Heat Islands and Heat Waves." *Environmental Research Letters* 13 (3): 034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
- Zhou, Decheng, Liangxia Zhang, Lu Hao, Ge Sun, Yongqiang Liu, e Chao Zhu. 2016. "Spatiotemporal Trends of Urban Heat Island Effect Along the Urban Development Intensity Gradient in China." *Science of the Total Environment* 544: 617-626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.168>
- Zhou, Yi, Guang Yang, Shixin Wang, Litao Wang, Futao Wang, e Xiongfei Liu. 2014. "A New Index for Mapping Built-Up and Bare Land Areas from Landsat-8 OLI Data." *Remote Sensing Letters* 5 (10): 862-871. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.973996>

Hélder Silva Lopes

Licenciado em Geografia e Planeamento pela Universidade do Minho (com 17 valores-Classificação ECTS-A), mestre em Geografia, especialista em Ordenamento e Gestão do Território (com classificação máxima-20 valores-Classificação ECTS-A) e doutor na Universidade do Minho e na Universidade de Barcelona sobre a relação entre turismo e alterações climáticas. É Professor Auxiliar Convidado no Departamento de Geografia da Universidade do Minho e investigador do Laboratório de Paisagem, Património e Território (Lab2PT) e do Grupo de Climatologia do IdRA, Universidade de Barcelona. Os seus principais interesses de investigação são: os sistemas de informação geográfica, deteção remota, turismo urbano, gestão ambiental, ciência cidadã, alterações climáticas e o desenvolvimento regional e local.

Paula Remoaldo

Professora catedrática e exerce funções no Departamento de Geografia do Instituto de Ciências Sociais da Universidade do Minho. Obteve o seu doutoramento em Geografia Humana em 1999, na Universidade do Minho, com a colaboração da Universidade de Louvain-La-Neuve (Bélgica). É membro e Coordenadora Adjunta do Grupo SpAcER (Space and Representation) do Lab2PT (Laboratório de Paisagens, Património e Território.) Investiga nas seguintes áreas do foro científico: turismo cultural, turismo criativo, desenvolvimento local e regional e geografia da saúde.

Vítor Ribeiro

Professor de Geografia no Departamento de Geografia da Universidade do Minho e no Departamento de Formação de Professores da Escola Superior de Educação de Paula Frassinetti. Possui um doutoramento em Geografia e Planeamento Regional pela Universidade do Minho/Universidade Complutense de Madrid e um pós-doutoramento em Tecnologias Educativas pela Universidade do Minho. É membro integrado do Lab2PT na Universidade do Minho, centrando a sua investigação em SIG, Geografia dos Transportes, Turismo, Desenvolvimento Local e Regional, Geografia do Crime e Educação Geográfica. Integra e colabora em vários projetos de investigação europeus (e.g. Aquastress, Creatour, Othukumana Formação Professores – ICT Aprendizagem à distância em S. Tomé e Príncipe).

Javier Martin-Vide

Licenciado em Ciências Matemáticas e doutor em Geografia e História pela Universidade de Barcelona. Professor de Geografia Física na Universidade de Barcelona. Académico titular da Real Academia de Ciências e Artes de Barcelona. Os seus principais interesses de investigação são os seguintes: variabilidade e mudanças climáticas, análise probabilística de precipitação, clima urbano e climatologia sinóptica.