

Análise espacial da ilha de calor urbana na Região Metropolitana de São Paulo durante episódio de onda de calor

Glícia Ruth Garcia de Araújo^{1*}, Ariane Frassoni¹, Luiz Fernando Sapucci¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista /SP, Brasil

*glicia.garcia@funceme.br

RESUMO

A previsão de eventos extremos é um dos grandes desafios da meteorologia operacional. Entender os processos dinâmicos e termodinâmicos associados a eventos extremos, como as ondas de calor e ilhas de calor urbana (ICU) na América do Sul, é de suma importância para o avanço da Previsão Numérica de Tempo (PNT), que por sua vez contribui para haver formas de mitigação e emissão de alerta para a população. Diante disto, o objetivo da presente pesquisa é investigar os processos sinérgicos das ondas de calor e ICU na temperatura do ar sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Para atender ao objetivo, a cidade mais populosa da América do Sul será considerada. Os episódios de ondas de calor foram identificados por critérios de duração, intensidade e espacialidade utilizando dados de reanálises ERA5. Para a análise espacial foi utilizado o produto de Temperatura de Superfície Terrestre (TST) do sensor MODIS. Além disso, os dados de estações meteorológicas de superfície foram utilizados como referência pontual para avaliação do ciclo diurno da intensidade da ICU. Foi identificado um único caso intenso de onda de calor que atingiu a RMSP no quadrimestre julho – outubro de 2003 a 2009, cujo início do episódio ocorreu no dia 29 de agosto de 2004 com duração de 10 dias. Diante da análise realizada no período pré, durante e após onda de calor, foi possível observar o impacto da onda de calor na amplificação da ICU em termos de intensidade e abrangência espacial sobre a área urbana. Durante a onda de calor, foi observado um acréscimo de 0,6 °C na intensidade da ICU (IICU) em relação aos dias anteriores ao episódio de onda de calor. Após o evento foi notado uma inércia térmica sobre a área urbana. Mesmo com a passagem do evento, as temperaturas continuaram elevadas na área urbana. Já as temperaturas nas áreas suburbana e rural foram menores comparadas durante a onda de calor, voltando ao padrão no período pré-evento, tornando a diferença de temperatura da IICU levemente maior do que durante o episódio.

Palavras-Chave: Extremos de temperatura; ondas de calor; ilhas de calor urbana.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento da intensidade e frequência de ocorrência de eventos extremos de precipitação e temperatura vem ocorrendo em diversas regiões do globo. A comunidade internacional tem apontado como causa o papel do aumento da temperatura média do ar no globo terrestre *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Segundo o sexto relatório (AR6) do IPCC, as projeções climáticas mostram um aumento na temperatura média global na metade do século XXI de até 2 °C em relação ao cenário atual, devido principalmente aos efeitos antrópicos. Com isso, a maioria das regiões habitadas experimentarão mais extremos de calor e um desequilíbrio hídrico com déficits e excessos de precipitação em algumas regiões do globo (IPCC, 2021). Critérios bem definidos para identificação de extremos e métricas adequadas de avaliação são de suma importância para tornar as previsões de eventos extremos (precipitação, secas severas, ondas de calor e de frio) mais acuradas, e conseqüentemente ajudam a gerar avisos meteorológicos para mitigar os impactos causados à população.

As pessoas que vivem nas grandes cidades têm maior risco de sofrer com os impactos das ondas de calor, pois as áreas urbanas já são normalmente mais quentes do que as áreas menos urbanizadas circundantes devido ao efeito da ilha de calor urbana (ICU). A ICU se forma devido ao aumento anômalo das temperaturas do ar sobre áreas urbanizadas em relação às áreas no entorno dos centros urbanos, normalmente chamadas áreas periféricas (OKE, 1973). Além disso, os processos de formação da ICU depende de diversos fatores, como a geometria urbana e materiais com alta capacidade térmica, menor velocidade do vento, redução de corpos d'água e da vegetação, além do calor antrópico (BORNSTEIN, 1968; OKE, 1982; AO et al., 2019). A poluição atmosférica associada com o aumento de temperatura pode amplificar os problemas causados nas grandes cidades. Por exemplo, o estudo de Silva (2016) mostrou uma relação positiva entre o aumento da concentração de poluentes e a Intensidade da ICU (IICU) na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A IICU é obtida a partir da diferença de temperatura entre as áreas urbanas e adjacentes (OKE, 1973). De acordo com Ao et al. (2019), quando estes eventos se relacionam com um período de ondas de calor, pode haver uma alteração ainda maior no balanço de energia, tornando favorável à amplificação da IICU. Os estudos sobre as sinergias entre as ondas de calor e ICU ainda são escassos, principalmente nas áreas tropicais. Logo, entender a interação entre ICU e ondas de calor, e os

processos físicos envolvidos, poderá contribuir para serem produzidas previsões mais acuradas, sendo de suma importância para mitigar os efeitos causados na sociedade.

A previsão de eventos extremos é um dos grandes desafios da meteorologia operacional. Um problema que vem sendo discutido nos centros operacionais de previsão de tempo e clima é a busca por aumento da destreza dos modelos utilizados para previsões de eventos extremos. Por outro lado, entender os processos dinâmicos e termodinâmicos associados a eventos extremos, como as ondas de calor e ICU na América do Sul, é de suma importância para o avanço da Previsão Numérica de Tempo (PNT), que por sua vez contribui para haver formas de mitigação e emissão de alerta para a população. Diante disto, a obtenção de uma melhor previsão depende do conhecimento mais aprofundado dos processos de interações entre os diferentes componentes do Sistema Terrestre. Logo, compreender as interações entre os eventos extremos de grande escala e pequena escala pode contribuir positivamente para a previsão numérica desses eventos na América do Sul. Diante o exposto, o objetivo principal da presente pesquisa é investigar os processos de interação espacial entre as ondas de calor e a ilha de calor urbana sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

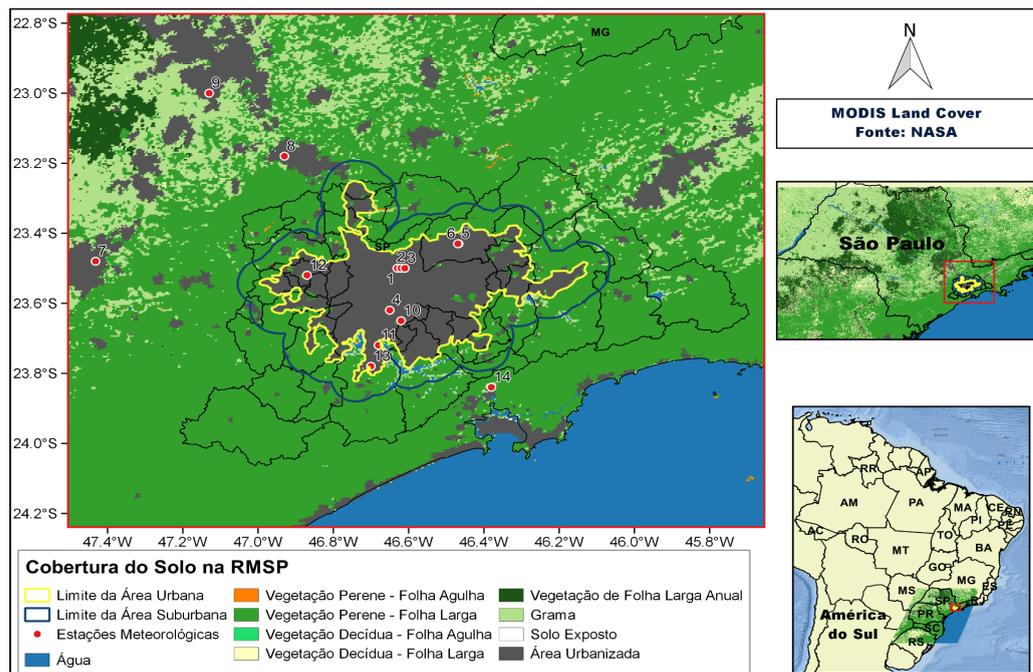
2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A presente pesquisa dará foco na cidade mais populosa da América do Sul (ver Figura 3.1), situada na região Sudeste do Brasil: a RMSP está localizada entre as latitudes de 23.1°S/24.1°S e longitudes de 47.3°W/45.7°W. Aqui são apresentadas 14 estações meteorológicas de superfície, indicadas pelos pontos vermelhos na Figura 1, onde a maioria encontra-se localizadas em áreas urbanas, com exceção da estação de Cubatão (n° 14) situada em uma área menos urbanizada.

O período de estudo compreende desde o mês de julho de 2003 a outubro de 2009. Ressalta-se que o período analisado da ICU dependerá dos dias em que a onda de calor atinge a RMSP.

Figura 1. Mapa de cobertura e uso do solo na RMSP em agosto de 2004 com destaque na delimitação das áreas urbana (linha contínua amarela) e suburbana (linha contínua azul). Os pontos vermelhos representam as estações meteorológicas de superfície numeradas.



2.2 Dados

A identificação dos episódios de ondas de calor foi realizada a partir dos dados de reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA5/ECMWF) com resolução espacial de 25 km. Apesar da disponibilidade horária, foi utilizado aqui somente o horário correspondente ao máximo diário de temperatura do ar a 2 metros em relação à superfície (T_{max}) para identificação das ondas de calor.

Foram utilizadas duas fontes de dados, como as estações meteorológicas e o sensor MODIS dos satélites americanos Terra/Aqua com resolução espacial de 1 km para caracterizar a ICU.

2.3 Critérios de identificação de ondas de calor

As ondas de calor foram identificadas em áreas homogêneas de T_{max} por meio da análise de cluster. (i) A primeira etapa de identificação é verificar em cada ponto de grade se a T_{max} diária é superior ao somatório do seu valor médio (\bar{T}_{max}) e desvio-padrão (σ) climatológico, isto é, $T_{max} \geq \bar{T}_{max} + \sigma$, cujo ponto tem que registrar o critério por no mínimo três dias consecutivos. Feito isso, (ii) a segunda etapa é aplicada para caracterização espacial do evento extremo, onde o critério de abrangência é verificar a porcentagem de pontos de grade, mínimo de 25% em relação ao conjunto total de pontos da área homogênea de T_{max} que obedeceram aos critérios da etapa i ($T_{max} \geq \bar{T}_{max} + \sigma$ em três dias consecutivos). Por último, (iii) o

evento extremo de Tmax só é classificado como onda de calor quando o parâmetro de intensidade (PI) é superior ao terceiro quartil da série. O PI é definido pela média espacial da Tmax entre os dias do evento (mínimo de três dias). Mais detalhes da técnica da análise de cluster aplicada na definição das áreas homogêneas, e do método de identificação das ondas de calor podem ser encontrados em Araújo et al. (2022).

2.4 Caracterização dos extremos de temperatura na RMSP

Nesta pesquisa, a ICU foi caracterizada por imagens de sensoriamento remoto, utilizando o índice de ICU, expresso por:

$$\Delta T = T - T_{sub},$$

onde T representa a TST do produto MODIS de cada grade (*pixel*), e Tsub é a TST média da área suburbana (PENG et al., 2020). Desse modo, a aplicação do índice fornece a abrangência espacial da ICU e sua intensidade nas cidades em que se encontram sobre a influência de eventos de ondas de calor classificados com severidade intensa, caracterizando-a também no período pré e pós a esse evento. Para caracterização da ICU, foi necessário definir os polígonos das áreas urbanas e suburbanas (PENG et al., 2012; ZHOU et al., 2014; MONTEIRO et al., 2021). Para definição das áreas será utilizado o produto *Land Cover* do MODIS na resolução espacial de 1 km, onde este identifica as superfícies vegetais, solo exposto, água e áreas urbanas (PENG et al., 2012). De acordo com Peng et al. (2012), o limite de extensão do subúrbio pode ser definido pelo mesmo tamanho da área urbana em proporção, como também em área menor (50%) e maior (150%) em relação à região urbana. Nesta pesquisa, será considerado 100% da área, ou seja, a quantidade de *pixels* da área suburbana é a mesma da área urbana.

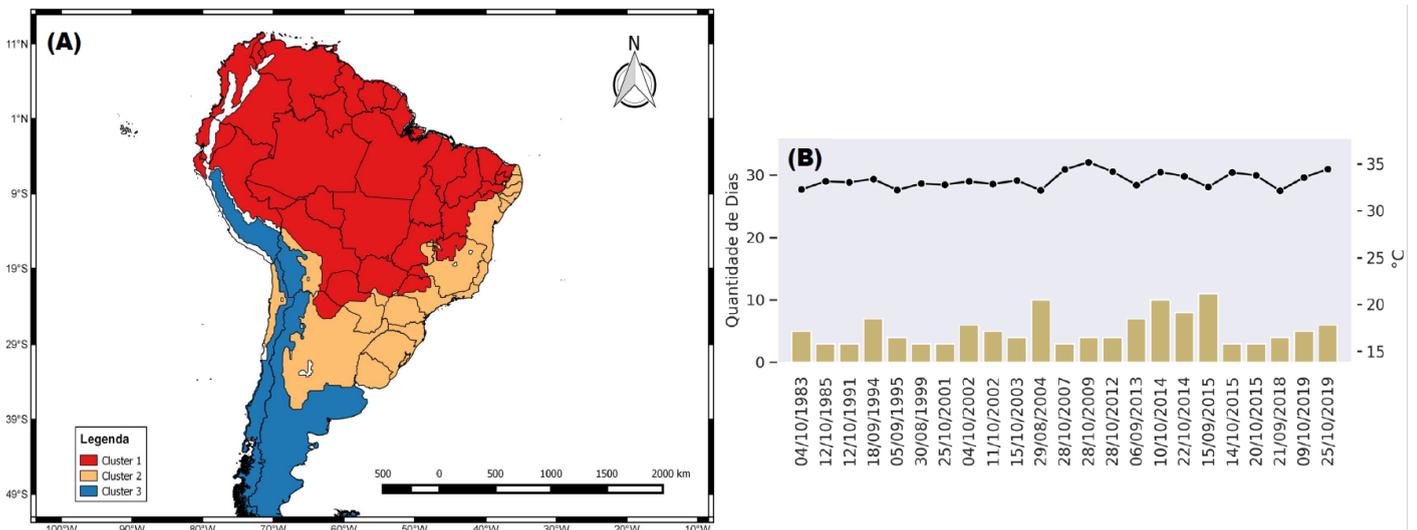
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Episódio de onda de calor intensa

A princípio, foram analisados episódios de ondas de calor intensos identificados no estudo de Araújo et al. (2022) no *cluster 2* (região amarela situada no mapa da Figura 2) definida pela autora para o quadrimestre de julho/agosto/setembro/outubro de 1979 – 2019 com os dados de reanálise ERA5. Como a RMSP encontra-se localizada no *cluster 2*, logo os episódios intensos foram investigados somente nessa área. Dos 23 casos de ondas de calor identificados entre o período de 1983 a 2019 na Área 2 (Figura 2), apenas os episódios que

ocorreram nos anos de 2003 a 2009 foram analisados espacialmente com intuito de averiguar se a onda de calor atingiu a cidade de São Paulo. Estes anos específicos foram analisados devido à disponibilidade de dados do sensor MODIS baixados até o momento. Com esta verificação, o único caso intenso de onda de calor que atingiu a RMSP no período de 2003 a 2009 foi o episódio que teve início no dia 29 de agosto de 2004 com duração de 10 dias. Ressalta-se que apenas os três últimos dias (5 a 7 de setembro de 2004) da onda de calor atingiu a cidade de São Paulo.

Figura 2. Mapa com três áreas homogêneas de Tmax do quadrimestre julho–agosto–setembro–outubro de 1979 – 2019 (A) e episódios de ondas de calor intensos na Área 2 (cluster 2 – amarelo) (B).

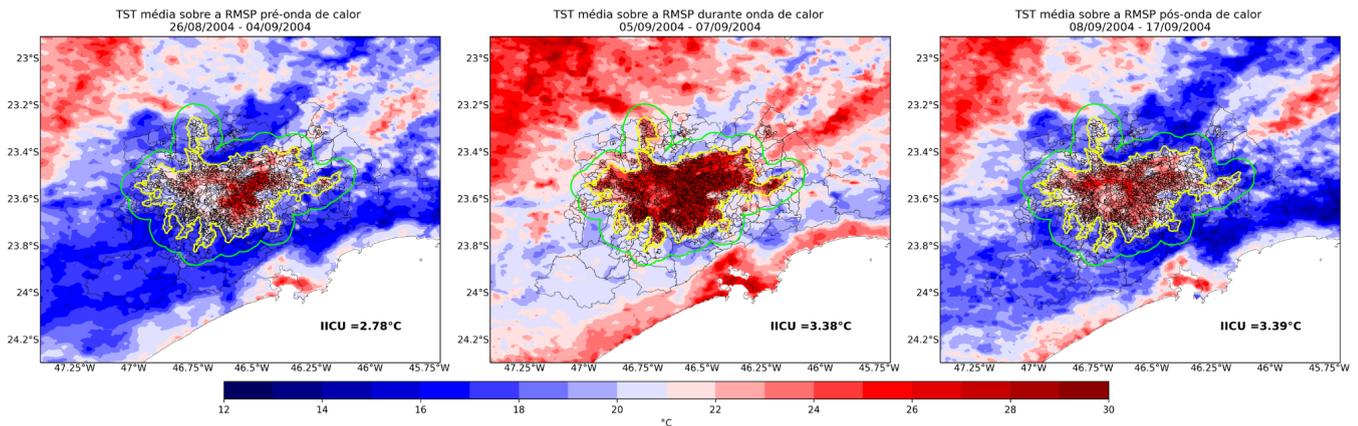


3.2 Interação entre a ilha de calor urbana na RMSP e a onda de calor

Apesar de as temperaturas estarem mais elevadas ao redor da RMSP, fica evidente o impacto da onda de calor na amplificação da ICU em termos de intensidade e abrangência espacial sobre a área urbana. Observa-se na Figura 4.3 que durante a onda de calor, além das temperaturas se elevarem na área urbana, também nota-se um aumento da TST na área suburbana. No entanto, este aumento não ocorre na mesma proporção nas duas áreas, a IICU é de 3, 38 °C durante a onda de calor comparada aos dias anteriores ao evento, onde a IICU foi de 2, 78 °C, mostrando um acréscimo de 0,6 °C na intensidade da ilha. Após o evento de onda de calor é notado uma inércia térmica sobre a área urbana, mesmo com a passagem da onda de calor, as temperaturas continuam elevadas nesta área. Já as temperaturas nas áreas suburbana e rurais são menores comparadas durante a onda de calor, voltando ao padrão visto

no período pré-onda de calor, tornando a diferença de temperatura entre a IICU (3,39 °C) levemente maior do que durante o episódio.

Figura 3. Temperatura da Superfície Terrestre média diurna do sensor MODIS sobre a RMSP no período pré-onda de calor (26/08/2004–04/09/2004), durante (05/09/2004–07/09/2004) e pós-onda de calor (08/09/2004–17/09/2004).



Podemos observar na Figura 4, o comportamento da TST e temperatura do ar no período pré, durante e pós-onda de calor. A Figura 4A mostra a TST média diária do sensor MODIS na área urbana (linha contínua vermelha) e área suburbana (linha contínua verde). Nota-se que há falhas em alguns dias no gráfico da TST, devido à falta de informação do satélite nestes dias. Apesar das falhas, é possível notar a diferença de temperatura entre às duas áreas, com temperaturas mais elevadas na área urbana em relação à área suburbana (Figura 4A). Além disso, podemos observar um leve aumento das temperaturas em ambas áreas durante a onda de calor, reforçando os resultados anteriores na Figura 3.

Devido às limitações dos dados diários de TST, foram analisadas o comportamento da temperatura máxima do ar de estações meteorológicas de superfície (Figura 4B). Ressalta-se que as estações selecionadas para análise foram escolhidas conforme o período disponível e localização. Apesar da maioria das estações se encontrarem na área urbana, pode-se observar que existe um certo gradiente de temperatura na área urbanizada. Logo, foram escolhidas duas estações que se encontram mais próximo do centro da área urbana, que são a estação de Mirante de Santana (linha vermelha escura contínua) e do Aeroporto de Congonhas (linha vermelha contínua), além de uma terceira estação mais afastada do centro que é a do Aeroporto de Guarulhos (linha contínua verde). Na Figura 4B podemos ver uma pequena diferença de temperatura entre as estações, principalmente entre as estações dos aeroportos de

Congonha e Guarulhos. Podemos observar melhor esta diferença durante a onda de calor, com temperaturas mais elevadas no Aeroporto de Congonhas em relação ao Aeroporto de Guarulhos. Além disso, no período pré-onda de calor, as temperaturas do ar são relativamente amenas comparadas durante a onda de calor, quando se nota uma elevação nas temperaturas (Figura 4B). Ainda analisando a Figura 4B, com a passagem da onda de calor podemos observar uma queda nas temperaturas com um aumento sucessivo ao passar dos dias em todas as estações meteorológicas.

Figura 4. Comportamento da TST do sensor MODIS (A) e Tmax diária das estações meteorológicas (B) na RMSP no período pré-onda de calor, durante e pós-onda de calor em agosto/setembro de 2004.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do aumento de temperatura ser notado tanto na área urbana, quanto na área suburbana e rural durante a onda de calor, foi possível observar o impacto da onda de calor na amplificação da ICU em termos de intensidade e abrangência espacial. Além disso, após a passagem do evento foi notado que a ICU se torna ainda mais amplificada devido à área urbana apresentar temperaturas elevadas em relação às áreas suburbanas.

Outros casos de interação entre ondas de calor e a ICU da RMSP deverão ser analisados para verificar se o comportamento da ICU é linear no período pré, durante e pós-evento. O método orientado a objeto MODE/SCANTEC do CPTEC/INPE será utilizado para avaliação espacial da ICU objetivamente. Com a aplicação da metodologia MODE, é esperado que a eficiência do método seja demonstrada para avaliar a ICU, possibilitando a identificação do aumento do formato e intensidade da ICU, como o surgimento de outros núcleos de temperaturas elevadas sobre a área urbana da RMSP durante ou após a ocorrência de episódios de ondas de calor.

5. AGRADECIMENTOS

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

6. REFERÊNCIAS

AO, X.; WANG, L.; ZHI, X.; GU, W.; YANG, H.; LI, D. Observed synergies between urban heat islands and heat waves and their controlling factors in Shanghai, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 58, n. 9, p. 1955–1972, 2019. ISSN 15588432.

ARAÚJO, G. R. G., FRASSONI, A., SAPUCCI, L. F., BITENCOURT, D., & de BRITO NETO, F. A. Climatology of heatwaves in South America identified through ERA5 reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 2022.

BORNSTEIN, R. D. Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City. *Journal of Applied Meteorology*, v. 7, p. 575–582, 1968.

IPCC. Climate change 2021: The physical science. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.l.: s.n.], 2021.

MONTEIRO, F. F.; GONÇALVES, W. A.; ANDRADE, L. d. M. B.; VILLAVICENCIO, L. M. M.; dos Santos Silva, C. M. Assessment of Urban Heat Islands in Brazil based on MODIS remote sensing data. *Urban Climate*, v. 35, p. 1–19, 2021. ISSN 22120955.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, v. 7, p. 769–779, 1973.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982. ISSN 1477870X.

PENG, J.; HU, Y.; DONG, J.; LIU, Q.; LIU, Y. Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: A radius approach. *Science of the Total Environment*, Elsevier B.V., v. 714, p. 136792, 2020. ISSN 18791026. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136792>>.

PENG, S.; PIAO, S.; CIAIS, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; OTTLE, C.; BRÉON, F. M.; NAN, H.; ZHOU, L.; MYNENI, R. B. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science and Technology*, v. 46, n. 12, p. 6889–6890, 2012. ISSN 0013936X.

SILVA, F. B. Análise dos efeitos combinados da Ilha de Calor Urbana e poluição do ar. 269 p. (INPE-10394-TDI/920). Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.

ZHOU, D.; ZHAO, S.; LIU, S.; ZHANG, L.; ZHU, C. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, n. 152, p. 51–61, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.017>>.