



VULNERABILIDADE ÀS ILHAS DE CALOR NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO: UMA ABORDAGEM PARA A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS MITIGADORAS NA GESTÃO URBANA

¹Juliana Siqueira-Gay
²Ana Paula Alves Dibo
³Mariana Abrantes Giannotti

RESUMO

Na prática do planejamento urbano e ambiental, especialmente no contexto de adaptação às mudanças ambientais, há demanda por estudos que integrem informações sociais, econômicas e ambientais da população e de sua exposição ao risco. Especialmente nos grandes centros urbanos, a impermeabilização e verticalização têm potencial de causar elevação da temperatura do ar local, desencadeando o fenômeno das ilhas de calor. Em consequência, outros efeitos decorrem desse fenômeno como problemas de saúde da população, poluição e alteração da circulação de ar. Nesse contexto, diante dos riscos e consequências das ilhas de calor urbanas, este artigo tem como objetivo analisar as áreas prioritárias para a implementação de medidas de mitigação aos efeitos do fenômeno de ilhas de calor urbano no município de São Paulo. Para tal, foi proposto um índice de avaliação de vulnerabilidade que considera as dimensões sociais e ambientais, relacionando a capacidade de adaptação, sensibilidade e exposição à ocorrência do fenômeno de ilhas de calor urbano. Além disso, foram identificadas as medidas de mitigação aos efeitos associados às ilhas de calor no âmbito do planejamento urbano municipal. As áreas centrais da cidade foram identificadas como críticas à exposição, e a periferia como crítica em relação à capacidade de adaptação e sensibilidade. Além disso, são elencadas algumas estratégias como implantação e conservação de espaço verdes, preservação de corpos d'água, alteração de design e forma urbana e uso de materiais com alta reflectância, as quais são parcialmente previstas no Plano Diretor Estratégico do município para mitigação do efeito das ilhas de calor urbano.

Palavras-chave: Ilhas de Calor Urbanas; Áreas Prioritárias; Índice de Vulnerabilidade; Medidas de Mitigação; Plano Diretor Estratégico.

¹ Engenheira ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - EP/USP (Brasil).
Mestranda em Informações Espaciais no Departamento de Engenharia de Transportes na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - EP/USP (Brasil). E-mail: siq.juliana@gmail.com

² Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos - EESC/USP (Brasil). Doutoranda no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - EP/USP (Brasil). E-mail: anapauladibo@gmail.com

³ Doutora em Informações Espaciais pelo Departamento de Engenharia de Transportes na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - EP/USP (Brasil). Professora Doutora no Departamento de Engenharia de Transportes na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - EP/USP (Brasil). E-mail: mariana.giannotti@gmail.com



VULNERABILITY TO URBAN HEAT ISLAND IN SÃO PAULO MUNICIPALITY: AN APPROACH TO SUPPORT THE MITIGATION MEASURES IMPLEMENTATION IN URBAN PLANNING

ABSTRACT

In the practice of urban and environmental planning, especially in the context of adaptation to environmental changes, there is a demand for studies that integrate social, economic and environmental information of the population and related risk. Particularly in large urban centers, waterproofing and verticalization have the potential to increase local air temperature, triggering the phenomenon of heat islands. Therefore, this phenomenon has side effects such as public health problems, pollution and changes in the air circulation. In view of the risks and consequences of the urban heat islands, this paper aims to analyze the priority areas for implementing measures to mitigate the effects of the urban heat islands phenomenon in São Paulo City (Brazil). A vulnerability index was proposed considering the social and environmental

dimensions, relating the capacity of adaptation, sensitivity and exposure to the occurrence of the phenomenon of urban heat islands. Besides that, measures to mitigate the effects associated with heat islands in urban planning were identified. The central regions are critical for exposure and the outskirts, for adaptive capacity and sensitivity. In addition, strategies such as implementation and conservation of green spaces, preservation of water bodies, urban design change, as well as use of materials with high reflectance are also listed and partially foreseen in the Municipal Strategic Master Plan to mitigate the effects of urban heat island.

Keywords: Urban Heat Islands; Priority Areas; Vulnerability Index; Mitigation Measures; Strategic Master Plan.

VULNERABILIDAD A LAS ISLAS DE CALOR URBANA EN EL MUNICIPIO DE SÃO PAULO: UN ENFOQUE DE APOYO A LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN LA GESTIÓN URBANA

RESUMEN

En la práctica de la planificación urbana y ambiental, especialmente en el contexto de adaptación a los cambios ambientales, existe demanda por estudios que integren informaciones sociales, económicas y ambientales de la población y de su exposición al riesgo. Especialmente en los grandes centros urbanos, la impermeabilización y verticalización tienen potencial de causar elevación en la temperatura del aire local, desencadenando el fenómeno de las islas de calor. Los efectos asociados a ese fenómeno traen problemas de salud en la población, polución y alteración de la circulación del aire. Frente a los riesgos y consecuencias de las islas de calor urbanas, este artículo tiene como objetivo analizar las áreas prioritarias para la implementación de medidas de mitigación a los efectos del fenómeno de islas de calor urbano en el municipio de São Paulo. Para tal, fue propuesto un índice de evaluación de vulnerabilidad que considera las dimensiones sociales

y ambientales, relacionando la capacidad de adaptación, sensibilidad y exposición a la ocurrencia del fenómeno de islas de calor urbano; además de la identificación de medidas de mitigación de los efectos asociados a las islas de calor en la planificación urbana. Las regiones centrales de la ciudad fueron identificadas como áreas críticas a la exposición, y las periferias como críticas en relación a la capacidad de adaptación y sensibilidad. Además de eso, son listadas algunas estrategias como implantación y conservación de espacios verdes, preservación de ríos y riachuelos, alteración de diseño y forma urbana y uso de materiales con alta reflectancia, las cuales son parcialmente previstas en el Plan Director Estratégico del municipio para mitigar el efecto de las islas de calor urbanas.

Palabras-clave: Islas de calor urbanas; áreas prioritarias, índice de vulnerabilidad; medidas de mitigación; Plan Director Estratégico.



INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a expansão urbana alterou consideravelmente o uso e cobertura da terra e conseqüentemente, o meio ambiente. A concentração de edifícios altos com materiais de alta retenção de calor, juntamente com calçadas e pavimentos impermeáveis, configuram *canyons* (Fernández, Alvarez-Vázquez, García-Chan, Martínez, & Vázquez-Méndez, 2015). Além disso, a alta concentração de poluentes e a emissão de calor antropogênico, também alteram os padrões locais de circulação de ar (Fernández *et al.*, 2015; O'Malley, Piroozfarb, Farr, & Gates, 2014; Santamouris, Synnefa, & Karlessi, 2011). Essas são potenciais causas das ilhas de calor urbano, fenômeno este que pode ser caracterizado pelo aumento da temperatura do ar no centro de áreas urbanas construídas, em comparação com as áreas circundantes rurais ou suburbanas, principalmente devido às atividades humanas (Yan, Wang, Xia & Feng, 2016). Dentre os impactos decorrentes desse fenômeno, destacam-se: (i) a mudança do clima local com alteração da circulação de ar e dispersão de poluentes (Yan *et al.*, 2016); (ii) o aumento do consumo de energia (Dhalluin & Bozonnet, 2015); e (iii) a alteração da saúde pública da população, com possibilidade da ocorrência de mortes devido ao aumento de temperatura e concentração de poluentes (Mirzaei, 2015), dentre outros.

Diante desse cenário, é evidente a necessidade do desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação, sobretudo nos grandes centros urbanos, uma vez que estes são os locais de maior ocupação antrópica e assim, seus habitantes, são mais suscetíveis a vivenciar os efeitos relacionados às ilhas de calor. Para tal, é necessária a adoção de uma abordagem integradora que considere as dimensões sociais e ambientais de um determinado local para a identificação de regiões prioritárias para a implementação dessas estratégias.

Nesse contexto, o conceito de vulnerabilidade, e sua avaliação, mostram-se relevantes componentes para essa abordagem, na medida em que relaciona o grau de predisposição de um sistema a ser negativamente afetado, diante da exposição a um determinado risco ambiental. Para Füssel e Klein (2006), as avaliações da vulnerabilidade tem como objetivo: (i) aumentar o conhecimento científico de sistema sensíveis aos riscos ambientais; (ii) informar os alvos específicos para ações de mitigação; (iii) priorizar políticas e esforços científicos para regiões e setores vulneráveis; e (iv) desenvolver estratégias de adaptação que reduzam riscos associados às alterações ambientais. Ainda, o mapeamento da vulnerabilidade integrado ao uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) mostra-se como uma iniciativa essencial para comunicar e facilitar o

entendimento das interações entre a população residente em um território e os riscos aos quais ela é exposta.

No âmbito internacional é crescente o número de trabalhos que buscam avaliar a vulnerabilidade em ambientes urbanos (Wang, Pan, Ke, Wang & Wei, 2014) em diferentes contextos, escalas e riscos (de Sherbinin, Chai-Onn, Jaiteh, Mara, Pistolesi, Schnarr & Trzaska, 2015; Kumar, Geneletti, & Nagendra, 2016). Ainda, há trabalhos que desenvolvem índices visando avaliar a vulnerabilidade às ilhas de calor (Inostroza, Palme & de la Barrera, 2016; Wolf & McGregor, 2013). Apesar da grande motivação, os trabalhos nacionais, como os desenvolvidos por Barros & Lombardo (2016) e Nobre, Young, Saldiva, Osini, Nobre (2011), não buscam integrar informações de forma sistemática, tendo como foco, sobretudo, a análise do fenômeno das ilhas de calor sem considerar informações sociais e econômicas da população.

Assim, considerando a aplicabilidade da avaliação de vulnerabilidade na esfera do ambiente urbano, bem como a necessidade do estabelecimento de estratégias para a minimização dos efeitos das ilhas de calor, esse trabalho tem como objetivo analisar áreas prioritárias para a implementação de estratégias de mitigação dos efeitos do fenômeno de ilhas de calor urbano, no contexto geográfico do município de São Paulo. A escolha desse recorte urbano se justifica devido a configuração da paisagem urbana e a presença de intensas atividades que constituem fontes de calor, as quais contribuem para a formação de ilhas de calor. Ademais, o fenômeno pode ser caracterizado pela diversidade de temperaturas em diferentes áreas em uma cidade, conforme pode ser observado no município de São Paulo, constituído de partes com adensamento urbano maior, que se configuram mais quentes, enquanto que outras apresentam-se mais frias devido à sua menor densidade urbana (Nobre *et al.*, 2011).

Para tal, foi proposto um índice de vulnerabilidade às ilhas de calor no contexto do município, que busca avaliar as dimensões sociais e ambientais associadas à exposição ao fenômeno de ilhas de calor urbano. A elaboração do índice e sua análise espacial configura-se como uma iniciativa de suporte à gestão urbana do município para identificação de áreas prioritárias para implementação de estratégias e medidas de mitigação associadas às ilhas de calor. De modo complementar, foi realizado um levantamento dessas iniciativas discutidas na literatura internacional para a mitigação dos efeitos associados às ilhas de calor, como a posterior reflexão da inserção no escopo do planejamento urbano do município de São Paulo.

A estrutura do trabalho segue com a seção 2, de fundamentação teórica, composta pelos principais conceitos envolvidos na composição dos indicadores



para a construção do índice de vulnerabilidade. Em seguida, na seção 3 são apresentadas as etapas para concepção do índice de avaliação da vulnerabilidade às ilhas de calor urbano, bem como os dados utilizados, tendo como referência o município de São Paulo. Posteriormente, na seção 4 são apresentados os resultados obtidos da aplicação do índice e suas análises para o município em questão. A seção 5 engloba a discussão acerca da identificação das áreas prioritárias e a implementação das estratégias e medidas de mitigação às ilhas de calor, frente ao planejamento urbano municipal, e por fim, são apresentadas as conclusões do trabalho na seção 6.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA COMPOSIÇÃO DE INDICADORES DE VULNERABILIDADE

Vulnerabilidade pode ser definida como o grau de predisposição a ser negativamente afetado, englobando a sensibilidade, capacidade de se adaptar e a exposição de um dado sistema (IPCC, 2014). Sensibilidade é o grau em que um sistema ou espécies são afetadas, adversamente

ou beneficemente, pela variabilidade ou mudança ambiental. Já exposição pode ser entendida como a presença de pessoas, espécies ou ecossistemas, funções ambientais, serviços ou recursos, infraestrutura ou economia, bens culturais ou sociais, em locais e configurações que podem ser adversamente afetados. E por fim, capacidade adaptativa é a habilidade dos sistemas, instituições, pessoas e outros organismos de se ajustarem diante de um dano potencial, de se aproveitarem de oportunidades ou de responderem às consequências de uma determinada mudança ambiental (IPCC, 2014). Assim, na literatura de indicadores de vulnerabilidade, algumas abordagens englobam esses três componentes como referência para composição de seus índices (Adger, 2006).

A metodologia para construção do Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor (IVIC) seguiu as etapas de: (i) seleção de indicadores; (ii) aquisição dos dados; (iii) cálculo dos indicadores; (iv) pré-processamento dos dados; e (v) integração e análise dos dados. Os indicadores selecionados por meio de levantamento bibliográfico são mostrados no Quadro 1.

Componente	Indicadores	Referências
Capacidade de adaptação	Porcentagem de domicílios com água da rede geral	(Fernandez, Bucaram & Renteria, 2015; Weis, Agostini, Roth, Gilmer, Schill, Knowles & Blyther, 2016)
	Porcentagem de domicílios com lixo coletado	(Fernandez <i>et al.</i> , 2015)
	Porcentagem de domicílios com esgoto	(Fernandez <i>et al.</i> , 2015)
	Porcentagem de pessoas alfabetizadas	(Weis <i>et al.</i> , 2016)
	Acessibilidade aos hospitais: número de hospitais a serem atingidos dado um tempo de viagem de 60 minutos	(Inostroza <i>et al.</i> , 2016)
Exposição	Temperatura da Superfície Terrestre	(Inostroza <i>et al.</i> , 2016)
Sensibilidade	Porcentagem de pessoas residentes com até 11 anos (crianças)	(Fernandez <i>et al.</i> , 2015; Inostroza <i>et al.</i> , 2016)
	Porcentagem de pessoas residentes com mais de 65 anos (idosos)	(Fernandez <i>et al.</i> , 2015; Inostroza <i>et al.</i> , 2016)
	Porcentagem de famílias com responsáveis do sexo feminino	(Fernandez <i>et al.</i> , 2015)

Quadro 1 – Indicadores e fontes de dados selecionados para composição do IVIC.

Em geral, os componentes de sensibilidade estão relacionados a características socioeconômicas da população, pois determinam o grau de um sistema a ser negativamente afetado, e assim, identificam grupos mais vulneráveis socioeconomicamente. Na seleção das variáveis disponíveis, os dados censitários que caracterizam a idade e gênero dos respondentes foram usados para composição de três grupos vulneráveis: famílias com crianças, idosos e aquelas chefiadas por

mulheres (Fernandez 2015). Não há consenso nos limites das idades de cada grupo na literatura. Para determinação da composição dos grupos neste estudo, os idosos são caracterizados como adultos com idade superior a 65 anos. Na literatura, as crianças são definidas por idades inferiores a 5 (Inostroza *et al.*, 2016), 11 ou até 18 anos (Hung, Wang, & Yarnal, 2016). Neste trabalho, utilizou-se idade limite de até 11 anos, pois trata-se de um limite aceitável e compatível com a realidade brasileira na



medida em que a partir de 12 anos a pessoa é considerada adolescente, segundo a Lei Federal nº 8.069/90, que dispõe sobre o Estatuto da Criança e do Adolescente (Brasil, 1990).

Já a capacidade adaptativa considera os seus recursos disponíveis, que configuram o potencial de reação da população diante da exposição a um determinado risco. Assim, informação sobre infraestrutura disponível no entorno dos domicílios e acesso a bens e serviços são comumente utilizados de maneira a caracterizar a capacidade física, econômica e de capital humano (Fernandez *et al.*, 2015; Inostroza *et al.*, 2016). Neste trabalho buscou-se variáveis já utilizadas na literatura, como aquelas do entorno do domicílio do Censo 2010, como água da rede geral (Inostroza *et al.*, 2016), presença de esgotamento sanitário (Fernandez *et al.*, 2015), lixo coletado (Fernandez *et al.*, 2015) e acessibilidade a hospitais (Inostroza *et al.*, 2016).

E por fim, a exposição é composta por elementos que tem como função avaliar sua magnitude diante de um risco. Neste estudo, exposição é caracterizada pela temperatura de superfície, variável determinante da identificação de áreas com temperatura do ar mais elevadas. Indicadores semelhantes são utilizados em trabalhos que tratam de vulnerabilidade às ilhas de calor (Inostroza *et al.*, 2016).

Após a formulação da base de dados, o pré-processamento tem como objetivo preparar a base para composição do índice. Valores faltantes e normalização fazem parte dessa etapa. Dados censitários, pela sua natureza de coleta domiciliar, possuem em sua base original alguns dados faltantes. O recenseado pode ou não informar algum dado ou não conseguir obter informações sobre condições do entorno do domicílio, como existência de lixo na rua e calçada, devido a barreiras físicas ou de segurança do local. A substituição de dados faltantes pode corresponder a adição de um único ou múltiplos valores na base de dados. O primeiro caso, por exemplo, média ou mediana de cada variável pode ser utilizada. Sua vantagem é a fácil implementação e replicabilidade, entretanto, tende a subestimar a variância da amostra original. Substituição por múltiplos valores lida melhor com as incertezas, porém exige técnicas estatísticas que considerem outros valores de dados da amostra para estimar cada um dos valores faltantes (OECD, 2008).

De forma a entender a estrutura dos dados, técnicas de análise multivariada são utilizadas para compreender as relações entre os indicadores que serão compostos. Essa etapa mostra-se relevante para melhor informar os planejadores e usuários sobre a importância relativa dos indicadores (OECD, 2008). A Análise de Componentes Principais (ACP) é largamente utilizada em composição de índices de risco e vulnerabilidade

(Beccari, 2016), especialmente aqueles voltados para estudos de vulnerabilidade às ilhas de calor (Inostroza *et al.*, 2016; Wolf & McGregor, 2013). A mesma tem como objetivo transformar um determinado conjunto de dados em um novo por meio da transformação de suas variáveis originais em componentes principais (Gan, Ma & Wu, 2007). Cada uma dessas componentes é uma combinação linear dos atributos originais associados aos dados e explica uma determinada porcentagem da variância dos dados (Zaki & Meira, 2013). Esta é discutida na literatura, pois apresenta-se relevante para evitar a composição de indicadores enviesados (Beccari, 2016; Inostroza *et al.*, 2016; OECD, 2008; Wolf & McGregor, 2013).

Parte do conhecimento adquirido na estrutura dos dados, como por exemplo, a variância explicativa de cada componente, pode ser utilizado para a determinação dos pesos de cada componente principal e posterior integração dos dados. A integração dos índices é comumente feita por meio de fórmulas algébricas que considerem o sistema de ponderação utilizado e, portanto, o caráter de influência de cada variável para o indicador (Inostroza *et al.*, 2016).

A partir do índice composto, a identificação das áreas prioritárias tem como objetivo determinar quais os locais críticos relacionados ao fenômeno de ilhas de calor urbano, considerando o índice como um todo e suas componentes. O índice de Moran apresenta-se como uma relevante métrica para análise espacial da correlação entre polígonos e seu entorno (Anselin, 1995). Assim, informa o nível de interdependência espacial entre um determinado polígono e sua vizinhança. Os índices de Moran têm sido usados em mapeamentos de vulnerabilidade (Hattis, Ogneva-Himmelberger & Ratick, 2012; Harlan, Declat-Barreto, Stefanov & Petitti, 2013) de maneira a identificar regiões onde há concentração de valores semelhantes (Druck, Carvalho, Câmara & Monteiro, 2004). Dessa forma, é possível identificar padrões espaciais de dados identificando regiões de “alta-alta” que apresentam alto valor da variável, bem com sua vizinhança; as áreas de “baixo-baixo” com valores baixos e com vizinhança também baixa. Ainda são determinadas áreas de “alto-baixo” e “baixo-alto” caracterizadas como áreas de transição, em que o centro é alto e vizinhança baixa e o centro é baixo e vizinhança é alta, respectivamente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa caracteriza-se como descritiva (Gil, 2008), visto o desenvolvimento de duas principais etapas: a primeira, buscou relacionar variáveis espaciais de maneira a propor um índice para avaliação da vulnerabilidade ao fenômeno de ilhas de calor e sua análise espacial para o município de São Paulo; e a



segunda pautou-se no levantamento das iniciativas e estratégias de mitigação aos efeitos das ilhas de calor empregadas no âmbito do planejamento urbano do município.

Os indicadores que dependem dos dados censitários brutos são calculados a partir dos dados brutos do censo, como aqueles que compõem a dimensão de sensibilidade, além das informações do entorno do domicílio referente à dimensão de capacidade adaptativa.

Já o indicador acessibilidade aos hospitais segue a metodologia apresentada por Siqueira-Gay, Giannotti & Tomasiello (2016), com a utilização dos dados do portal *Geosampa* (Prefeitura de São Paulo, 2016). Esse indicador é representado pelo número de hospitais a serem atingidos em um tempo de viagem de 60 minutos de transporte público. O cálculo segue as etapas mostradas na

Figura 1.

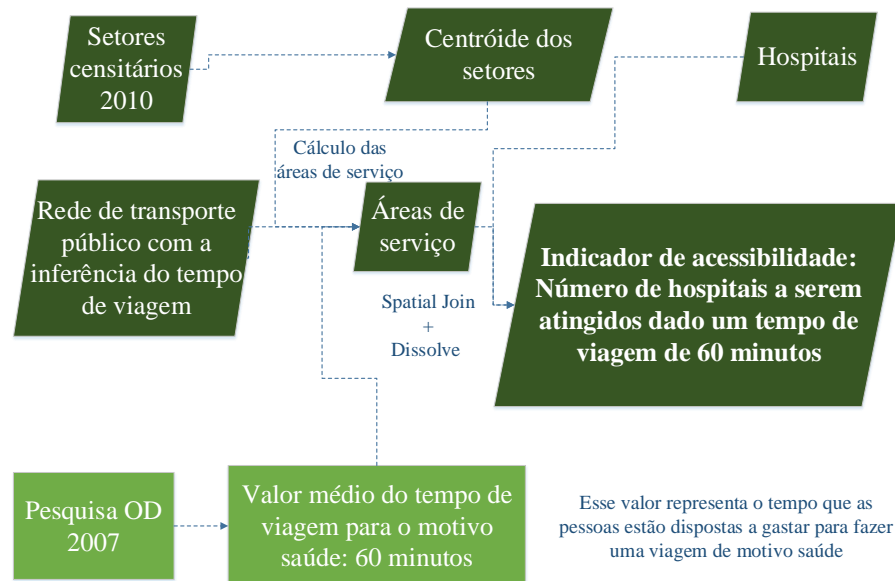


Figura 1 – Metodologia para criação do indicador de acessibilidade

O cálculo da Temperatura da Superfície Terrestre (TST) foi obtido a partir das bandas 10 e 11 da imagem de satélite Landsat 8 (OLI/TIRS- Path 219 Row 76 Date 01-Sep-13) e seu processamento seguiu os passos de: (i) correção atmosférica; (ii) cálculo da temperatura de brilho do satélite; (iii) emissividade baseada na proporção de vegetação; e (iv) cálculo do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), de maneira a compor o valor de temperatura de superfície. As imagens de 2010 e 2013 foram selecionadas de um período de seca (inverno) e com poucas nuvens. A temperatura superficial que compõe a variável de exposição é o valor médio dos resultados das análises dos dois anos (Inostroza *et al.*, 2016). O valor médio de temperatura, oriundo da

imagem, foi associado a cada polígono do setor censitário de 2010, que representam 18.953 unidades do território. Assim, esse e os outros indicadores estão integrados na escala do setor censitário, e, portanto, o indicador final também.

A composição dos indicadores seguiu a metodologia apresentada em OECD (2008) e as etapas são apresentadas na Figura 2. Os *softwares* utilizados foram ArcGIS 10.5 para processamento da imagem e integração dos dados, além do Weka (Eibe, Hall & Witten, 2016), para pré-processamento e análise dos dados.



Vulnerabilidade às Ilhas de Calor no Município de São Paulo: Uma Abordagem para a Implantação de Medidas Mitigadoras na Gestão Urbana

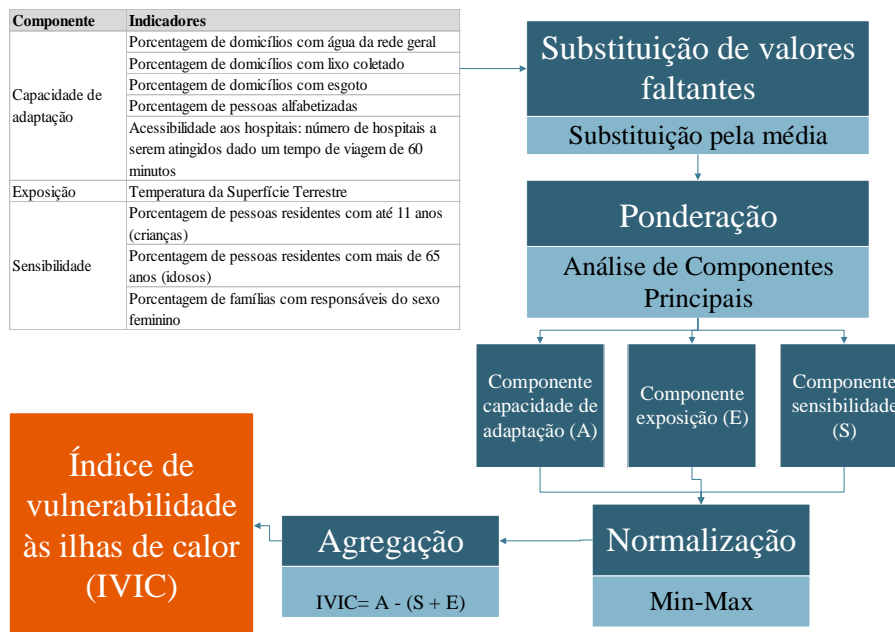


Figura 2 – Metodologia para composição do IVIC

A estatística descritiva de cada uma das variáveis utilizadas por ser observada na Tabela 1. Os dados faltantes representam 3% do total de 18.953 setores censitários, totalizando 614 polígonos vazios inicialmente

identificados. A literatura recomenda que o valor aceitável para substituição é de até 5% dos dados originais (OECD, 2008).

Tabela 1 – Estatística descritiva das variáveis espaciais utilizadas para a composição do IVIC

	PorCrianças	PorCIdosos	PorCFemResp	LST	AcessHospitais	PorCÁgua	PorCEsgoto	PorCLixo	PorAlfMor
Média	0.17	0.08	0.44	25.08	17.26	0.98	0.90	0.99	0.89
Erro padrão	0.0004	0.0004	0.0009	0.0146	0.1210	0.0010	0.0018	0.0007	0.0013
Mediana	0.17	0.07	0.43	25.54	10	1	1	1	0.9
Desvio padrão	0.06	0.05	0.13	2.01	16.66	0.14	0.24	0.10	0.18
Variância da amostra	0.00	0.00	0.02	4.03	277.55	0.02	0.06	0.01	0.03
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	0.98	0.83	1	29.17	72	1	1	1	1
Porcentagem dados faltantes	3%	3%	3%	0%	0%	3%	3%	3%	3%

Para composição do índice são consideradas como componentes positivas aquelas cujo valor maior é mais desejável, ou seja, capacidade de adaptação e seus componentes de acessibilidade aos hospitais, pessoas alfabetizadas e informações do entorno dos domicílios.

Variáveis negativas são, portanto, as de sensibilidade e exposição. A fórmula geral do IVIC para deixá-lo com caráter positivo é apresentada na Equação 1.

$$IVIC = A - (S + E)$$

(Equação 1)

Onde:



A = Componente de adaptação
S = Sensibilidade
E = Exposição

Para a ponderação de cada componente foi utilizada a ACP. Assim, como apresentada pela fundamentação teórica, essa metodologia é largamente utilizada para ponderação de indicadores compostos. Nesta aplicação, as dimensões de sensibilidade e capacidade de adaptação possuem suas próprias componentes principais, cuja combinação é formada a partir das variáveis originais, e o peso de cada uma corresponde ao respectivo valor da variância explicativa (Figura 3). Os dados censitários relativos ao entorno, por exemplo, são correlacionados e para evitar a criação de um índice tendencioso, a análise estatística ACP é aplicada ao conjunto de indicadores de cada componente de sensibilidade e adaptação separadamente, afim de

determinar seus respectivos pesos. A composição da exposição é feita apenas pela variável da temperatura superficial e dessa forma não necessita de análises multivariadas. Seu valor é apenas normalizado na composição do índice geral. Assim, as principais potencialidades dessa técnica exploradas são: (i) criação de nova base de dados com eliminação de ruído; (ii) identificação de variáveis mais importantes para cada componente.

Após a ponderação, cada uma das componentes foi normalizada na escala de 0 a 1 antes da agregação seguindo a fórmula Min-Max (Equação 2).

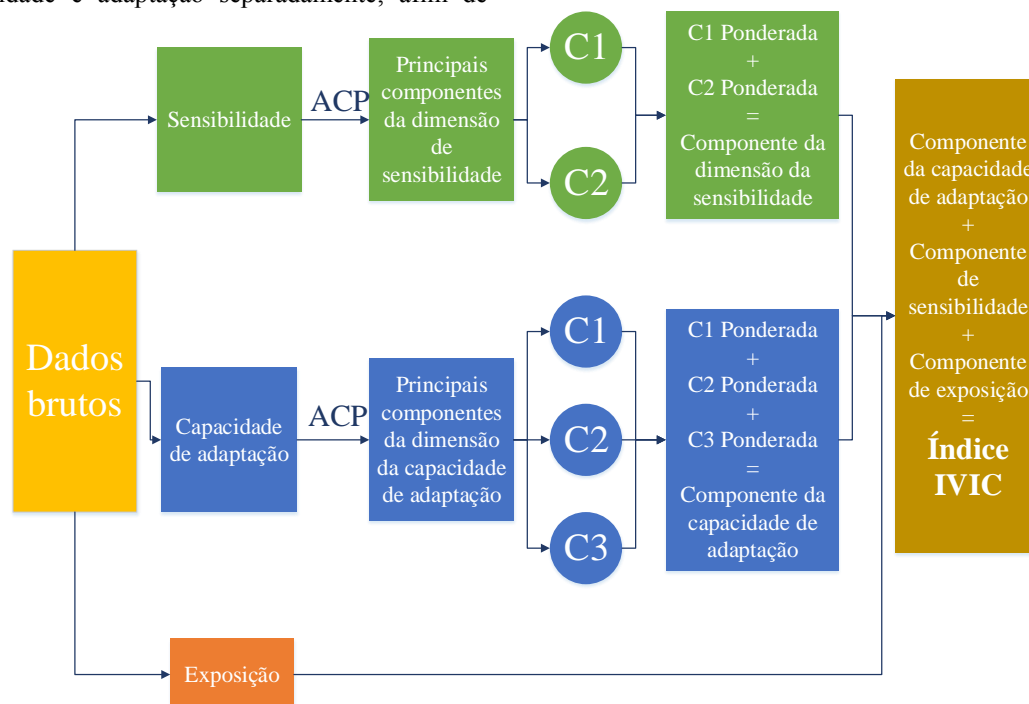


Figura 3 – Ponderação dos componentes por meio da ACP

$$\text{Indicador} = \frac{\text{Valor}(x) - \text{ValorMin}}{\text{ValorMax} - \text{ValorMin}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

Valor (x) = valor de referência a ser normalizado

ValorMin = valor mínimo da distribuição geral do indicador

ValorMax = valor máximo da distribuição geral do indicador

Para fins de visualização e análise dos dados, o índice final IVIC também foi normalizado. Para análises de proximidade espacial e de dados de área (Anselin, Syabri & Kho, 2006; Tobler, 1970), o índice Local Moran

foi aplicado nos valores de IVIC, resultando em um mapa com os diferentes agrupamentos e regiões críticas da cidade.



Com os resultados da aplicação do índice de vulnerabilidade, seguiu-se para a segunda etapa, que consistiu na identificação de medidas de mitigação comumente discutidas e aplicadas em outras jurisdições, por meio de pesquisa bibliográfica da literatura internacional, enfatizando o potencial de aplicabilidade no contexto do município de São Paulo. A busca foi realizada na base de dados *ScienceDirect* com a seleção da palavra-chave “*urban heat island mitigation*”. Após, seguiu-se para a análise do Plano Diretor Estratégico do município de São Paulo - instrumento básico que orienta o planejamento urbano e seus objetivos no município -, para verificar se as estratégias definidas empregam as iniciativas levantadas em vista à minimização dos efeitos das ilhas de calor.

RESULTADOS

A seção de resultados é dividida em duas seções que buscam atingir o objetivo de análise das áreas prioritárias, e que apresenta dois produtos: a elaboração e análise espacial do índice de vulnerabilidade, bem

como a identificação de medidas mitigadoras aos efeitos das ilhas de calor urbano.

Índice de vulnerabilidade às ilhas de calor (IVIC)

Após a aquisição dos dados necessários, os indicadores que compõem o IVIC foram calculados. O cálculo da temperatura de superfície revela uma alta concentração de áreas menos quentes na região do extremo norte e sul da cidade (Figura 4). Esses padrões já foram investigados por outros trabalhos na cidade e Região Metropolitana de São Paulo com resultados semelhantes (Barros & Lombardo, 2016; Nobre *et al.*, 2011; Lombardo, 1985).

As variáveis foram integradas e submetidas à análise de componentes principais. Essa metodologia foi empregada nas componentes de sensibilidade (Tabela 2(a)) e capacidade adaptativa (Tabela 2(b)) e são essas as componentes que cumulativamente explicam, respectivamente, 90% e 85% da referente amostra original.

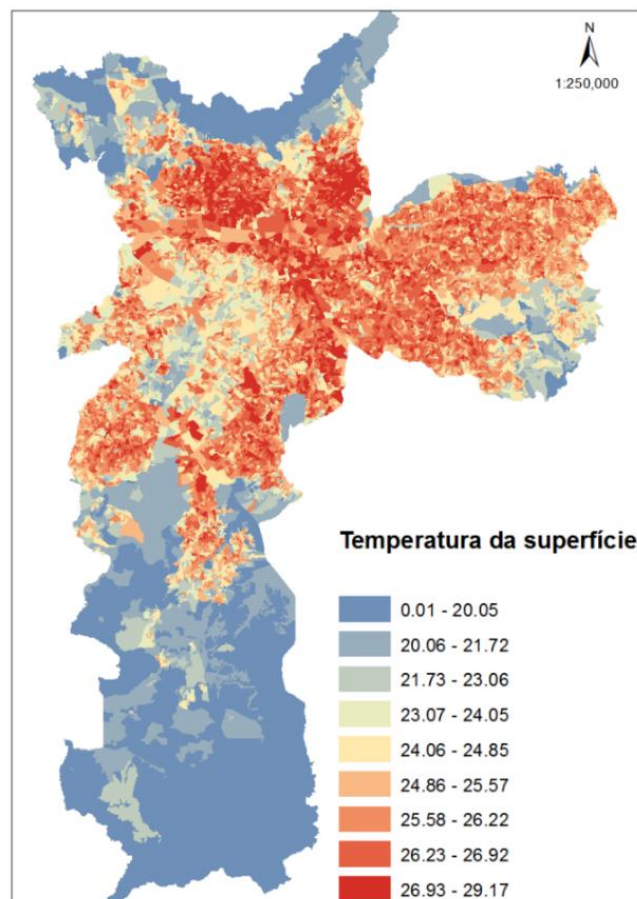


Figura 4 – Mapa da temperatura de superfície calculada a partir da imagem do satélite Landsat 8



Tabela 2 – Resultado da ACP e pesos para composição do indicador

a) Componentes principais referentes à sensibilidade

	C1s	C2s
Variância de cada componente (autovalores)	0.58	0.33
Porcentagem de crianças moradoras	0.70	0.08
Porcentagem de idosos moradores	-0.71	-0.04
Porcentagem de mulheres chefes de família	-0.08	1.00

b) Componentes principais referentes à adaptação

	C1a	C2a	C3a
Variância de cada componente (autovalores)	0.49	0.20	0.15
Acessibilidade aos hospitais	-0.18	0.93	0.05
Porcentagem de residências com água da rede geral	-0.55	-0.20	-0.27
Porcentagem de residências com esgoto	-0.47	0.17	-0.53
Porcentagem de residências com coleta de lixo	-0.53	-0.28	0.10
Porcentagem de moradores alfabetizados	-0.42	0.02	0.80

Na análise dos pesos atribuídos a cada componente, nota-se a prevalência das variáveis de porcentagem de crianças moradoras e acessibilidade aos hospitais, respectivamente na componente de sensibilidade e capacidade de adaptação, como as componentes que melhor explicam a base original. Especialmente para adaptação, as duas primeiras componentes mostram-se mais relacionadas à porcentagem de acessibilidade aos hospitais e indicam a importância relativa dessa variável na amostra (Tabela 2). A capacidade de adaptação é, portanto, caracterizada pelas oportunidades espacialmente distribuídas de hospitais. A fórmula geral, atualizada com os valores dos pesos é apresentada na Equação 3.

A agregação das variáveis resultou em três principais dimensões de análise e o índice resultante da união delas. Em geral, os mapas (Figura 5) mostram, em vermelho, áreas mais críticas e em verde, menos críticas, de acordo com a orientação de cada componente. A divisão das classes foi feita de acordo com as regras das quebras naturais presente no software ArcGIS, na qual as quebras de cada classe são estabelecidas, a partir do histograma de distribuição de frequência da variável, de maneira a agrupar valores semelhantes, além de maximizar a diferença entre classes. Portanto, seus limites são definidos em valores que apresentam maior diferença relativa na distribuição da amostra.

$$IVIC = (0.49C1a + 0.20C2a + 0.15C3a) - (LST + (0.58C1s + 0.33C2s)) \quad \text{(Equação 3)}$$

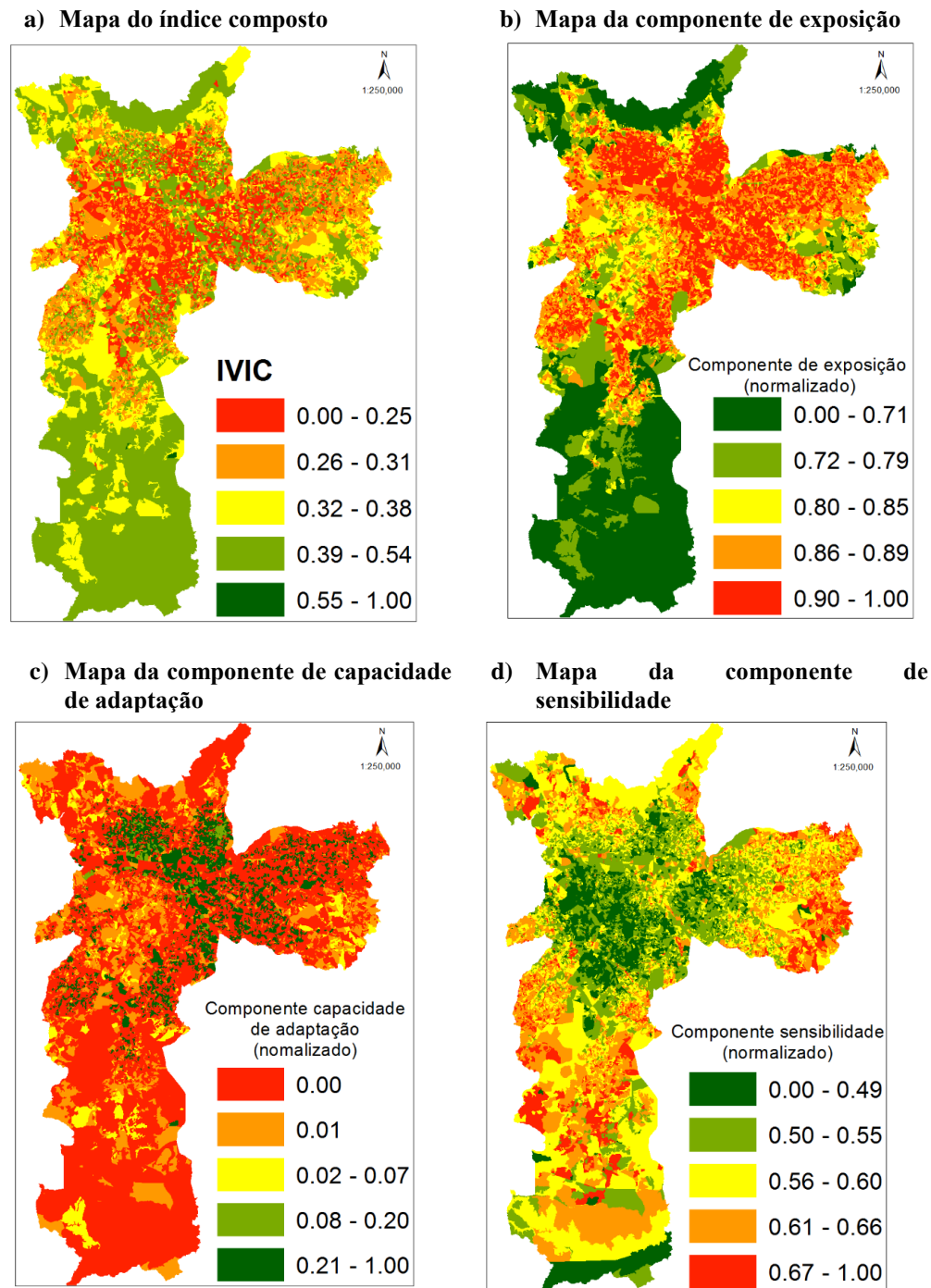


Figura 5 – Resultados da agregação de cada componente e IVIC

O mapa do índice composto (Figura 5(a)) mostra que os lugares melhores classificados estão localizados no extremo sul e norte da cidade, em conformidade à componente de exposição (Figura 5(b)). A região centro-sul da cidade mostra-se como mais crítica, uma vez que concentra baixos valores de capacidade de adaptação

(Figura 5(c)) e maiores de sensibilidade (Figura 5(d)). A componente de adaptação apresenta tendência geral de valores menores, com exceção do centro-leste, enquanto a sensibilidade mostra regiões sobretudo, menos sensíveis. Dessa forma, cada componente apresenta um



padrão distinto ao longo do território do município de São Paulo.

Analisando a composição do indicador de acordo com cada uma de suas componentes, seus valores foram separados em cinco classes, de muito baixo até muito alto (Figura 6). É possível notar que a componente de adaptação é mais alta que a média geral apenas para a classe de valores mais altos do índice, em conformidade com o padrão mostrado pelo mapa da Figura 4(c), no qual a maior parte dos polígonos é associada à baixos valores.

A sensibilidade segue uma tendência uniforme, sendo considerada acima da média geral apenas para a classe de mais altos valores do IVIC. Por ser a componente mais dependente de valores brutos do censo, foi a mais influenciada pela substituição de dados faltantes. Assim, alguns polígonos do extremo sul,

apresentam baixos valores de sensibilidade, e assim são classificados por terem valores médios, entretanto, essas regiões caracterizam-se por vazios populacionais e o censo não possui contagem para essas áreas. Essa é, portanto, uma considerável limitação do indicador que poderia ser melhorada com a exploração de outras técnicas e abordagem para substituição de dados faltantes. A exposição, determinada apenas pelo valor da temperatura de superfície, mostra valores constantes para todas as classes do índice. Desse modo, é possível que os valores extremos do índice, muito alto e muito baixo, revelam também os extremos resultantes da avaliação da capacidade de adaptação e sensibilidade, respectivamente.

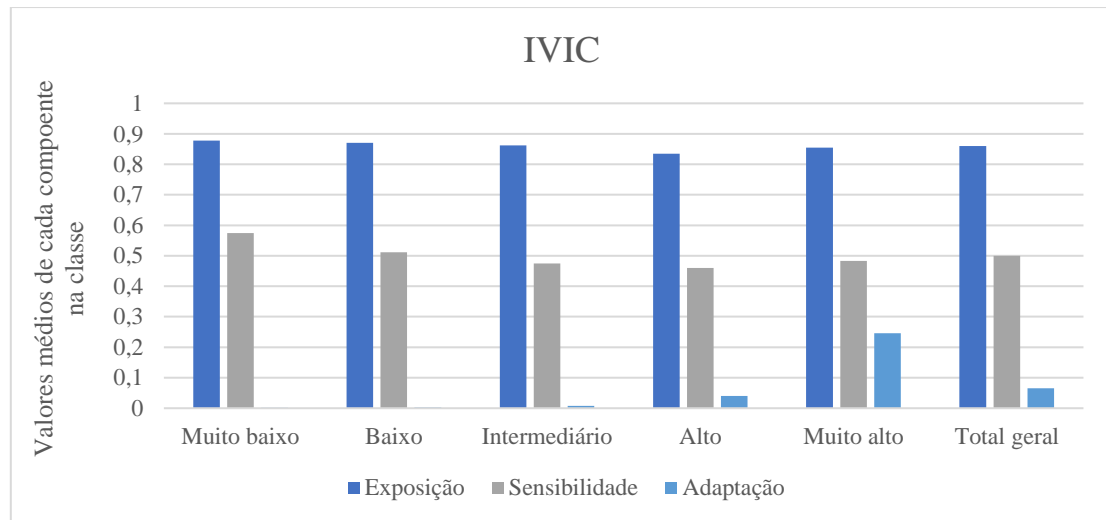


Figura 6 – Valores médios das componentes em cada classe do IVIC

Identificação de medidas mitigadoras aos efeitos das ilhas de calor urbano

Dentre os principais efeitos das ilhas de calor, destacam-se: (i) o aumento do número de mortes relacionadas ao aumento da temperatura e poluição (Dhalluin & Bozonnet, 2015; Kleerekoper, Van Esch & Salcedo, 2012; Mirzaei, 2015); (ii) o aumento do consumo de energia devido ao uso do ar condicionado (Dhalluin & Bozonnet, 2015; Mirzaei, 2015); (iii) a alteração da circulação de ar, favorecendo a convecção local e precipitação (O'Malley *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2016); (iv) a redução da velocidade do ar e dispersão de poluentes (Fernández *et al.*, 2015; Santamouris *et al.*, 2011); e (v) a alteração de temperatura pode influenciar negativamente na fauna e flora urbanas (Gartland, 2008).

Diante desse cenário, faz-se necessária a discussão e implementação de medidas e estratégias de mitigação aos efeitos das ilhas de calor no planejamento das cidades,

de forma a assegurar, sobretudo, a qualidade de vida dos habitantes no ambiente urbano. Como resultado do levantamento bibliográfico, foram identificadas as seguintes iniciativas:

- *Implantação e conservação de parques e espaços verdes, bem como, plantio de árvores e telhados verdes.* O aumento da superfície vegetal tem como objetivo amenizar a temperatura, bem como favorecer processos como evapotranspiração. Nesse sentido, contribui para absorção de calor e liberação de água na atmosfera. Este comportamento é oposto de materiais impermeáveis como asfalto, que absorvem calor e não a água. Além disso, as árvores contribuem para o sombreamento de superfícies, prevenindo a incidência direta de radiação solar e sobreaquecimento tanto de



Vulnerabilidade às Ilhas de Calor no Município de São Paulo: Uma Abordagem para a Implantação de Medidas Mitigadoras na Gestão Urbana

superfícies como do ar (Gago, Roldan, Pacheco-Torres & Órdonez, 2013).

- *Preservação de corpos d'água.* Rios, córregos e lagos contribuem para o resfriamento por meio da evapotranspiração. Seu resfriamento é efetivo quando há grandes dimensões de massa de água ou correntes de ar que promovem a circulação atmosférica do ar resfriado (Kleerekoper *et al.*, 2012).
- *Design e forma urbana.* A forma de distribuição dos edifícios e estruturas interfere na absorção de radiação solar bem como na formação de correntes de ar, afetando a formação das ilhas de calor. Essa medida afeta a maneira com que a radiação solar chega às superfícies e camadas de ar (Gago *et al.*, 2013).
Utilização de materiais e superfícies. A quantidade de calor absorvida pela superfície depende do material que são revestidos prédios e pavimentos. A proporção entre a quantidade de energia que é absorvida e liberada, isto é, seu coeficiente de reflexão ou albedo, influencia consideravelmente na temperatura do ar no entorno da superfície (Gago *et al.*, 2013). Materiais permeáveis e de baixo albedo são considerados as soluções mais baratas para mitigação dos efeitos negativos das ilhas de calor (Kleerekoper *et al.*, 2012).

No âmbito do planejamento urbano do município de São Paulo, o PDE (Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo) é o instrumento básico da Política de Desenvolvimento Urbano do Município de São Paulo. Este considera, como parte de seus objetivos estratégicos, a contenção do processo de expansão horizontal da aglomeração urbana, além da ampliação e

requalificação de espaços públicos, áreas verdes e permeáveis, de forma a contribuir para a mitigação de fatores antropogênicos, os quais intensificam as mudanças climáticas (São Paulo, 2014).

O PDE determina em seu capítulo II, da Política Ambiental, “*contribuir para a minimização dos efeitos das ilhas de calor*” (São Paulo, 2014, p. 107) como uma das diretrizes da Política Ambiental do Plano. Ademais, é em seu capítulo I – de estruturação e ordenação territorial - que há uma especificação de medidas relacionadas à mitigação dos efeitos das ilhas de calor, como a previsão da recuperação de áreas vegetadas, bem como sua ampliação, sobretudo em fundos de vale e cabeceiras de drenagem, respectivamente na Macroárea de Estruturação Metropolitana e Macrozona de Estruturação e Qualificação Urbana. Ainda, o PDE prevê recuperação de planícies fluviais bem como qualidade de rios e córregos na Macroárea de Estruturação Metropolitana. No entanto, ressalta-se que o instrumento de planejamento urbano não menciona diretrizes a respeito de orientações de prédios, fachadas e materiais de superfície, pois tem como objetivo estabelecer diretrizes gerais para urbanização na cidade. Essas medidas relacionadas poderiam adicionalmente ser consideradas em nível de projeto, durante o processo de elaboração do Estudo de Impacto de Vizinhança. O mesmo deve ser apresentado no âmbito do licenciamento ambiental de empreendimentos ou atividades causadoras de impacto de vizinhança, como aqueles relacionados à sobrecarga na capacidade de atendimento da infraestrutura urbana e viária, e à deterioração das condições de qualidade de vida do entorno (São Paulo, 2005).

Considerando o discutido, o Quadro 2 apresenta uma síntese da comparação entre as medidas de mitigação relacionadas às ilhas de calor preconizadas na literatura internacional e as diretrizes determinadas no PDE.

Estratégias propostas pelo PDE	Recomendações para mitigação de ilhas de calor	
Capítulo I Artigo 12; Artigo 25 (São Paulo, 2014)	Implantação e conservação de espaços verdes, plantio de árvores e telhados verdes	(Akbari & Kolokotsa, 2016; Gago <i>et al.</i> , 2013; O'Malley <i>et al.</i> , 2014)
	Preservação de corpos d'água	(Kleerekoper <i>et al.</i> , 2012)
-	Design e forma urbana	(Aflaki, Mirnezhad, Ghaffarianhoseini, Omrany, Wang & Akbari, 2016; Gago <i>et al.</i> , 2013)
-	Utilização de materiais com alta refletância solar nas fachadas dos prédios, telhados e pavimentos	(Aflaki <i>et al.</i> , 2016; Akbari & Kolokotsa, 2016; Gago <i>et al.</i> , 2013; O'Malley <i>et al.</i> , 2014)

Quadro 2 – Quadro síntese das estratégias propostas no PDE e as principais recomendações encontradas na literatura



DISCUSSÃO

A proposição do IVIC subsidia o planejamento estratégico por meio da identificação de áreas prioritárias. Juntamente com o levantamento das potenciais medidas mitigadoras, configuram uma abordagem integrada, pois tratam tanto da análise do território quanto de estratégias a serem implantadas para minimização dos efeitos negativos das ilhas de calor.

Pondera-se que, apesar de suas potencialidades, há limitações na aplicação do índice de vulnerabilidade. De forma geral, indicadores compostos, que têm como objetivo compilar informações em um único valor, se mal interpretados por planejadores, podem potencialmente fornecer uma compreensão simplista do fenômeno (OECD, 2008). Além disso, outras variáveis poderiam ser consideradas para composição de indicadores, sobretudo no que tange, dados não públicos, disponíveis sob o domínio das secretarias municipais e partes intervenientes.

Este trabalho objetivou a busca por dados públicos acessíveis, bem como utilização de metodologia referenciada na prática internacional de desenvolvimento de índices. Dessa forma, apresenta-se replicável para outros contextos, guardadas às restrições de disponibilidade e qualidade dos dados. O uso de dados censitários permite a replicabilidade para todo Brasil. Porém, ainda que atendendo ao critério da porcentagem aceitável de dados faltantes na base original para substituição, essa operação trouxe limitações na interpretação do fenômeno em regiões extremas e áreas não urbanizadas da cidade, uma vez que essas apresentam a maior parte dos dados faltantes. Assim, outras técnicas para substituição desses dados podem ser exploradas de forma a melhorar a interpretabilidade dos mapas e sobrepor essa identificada lacuna prática.

Na ACP obteve-se como principal componente de sensibilidade aquela relacionada a porcentagem de crianças e a segunda, relacionada à porcentagem de mulheres chefes de família. A mesma componente relacionada a crianças foi identificada em Inostroza *et al* (2016), todavia, como a segunda principal componente de sua amostra. Desse modo, a variável que caracteriza a dependência financeira e social dos ocupantes mostra-se

relevante para as duas realidades de análise. Outra semelhança se dá na análise da capacidade adaptativa, em que os dois trabalhos apresentam a componente principal que explica 20% da variância da amostra relacionada à variável de abastecimento de água e também alta porcentagem para variável de provisão de serviços médicos, revelando similaridades entre as duas amostras analisadas. Ainda que valores semelhantes informem sobre a importância relativa de cada variável em cada um dos contextos, não é possível argumentar que cidades analisadas são semelhantes como um todo, com base nos estudos apresentados.

O padrão espacial do IVIC apresentado na cidade de São Paulo corresponde em geral a valores altos em áreas mais urbanizadas, impermeabilizadas e de maior densidade demográfica. Wolf & McGregor (2013) indicam que as áreas mais vulneráveis de Londres também correspondem à região central da cidade. Já Inostroza *et al* (2016) apresenta também uma tendência dos padrões do índice mais próximo dos padrões de exposição, entretanto, o centro da cidade de Santiago não é a área mais crítica.

Os resultados do índice Local Moran mostram a análise de correlação espacial dos valores do IVIC associados aos polígonos (Figura 7). A distância usada foi a euclidiana e raio de busca de cerca de 4300m, determinado automaticamente de maneira a englobar na análise todos os setores censitários do município. As regiões consideradas aglomerados de “alto-alto” indicam que a variável naquele polígono é alta, em comparação à média de todo município, e que seus vizinhos também possuem valores altos. Regiões do extremo sul e norte da cidade apresentam a classe “alto-alto”, portanto são áreas de fato melhor avaliadas pelo índice. As áreas críticas, de “baixo-baixo”, estão concentradas na região centro-leste da cidade, que é a área caracterizada como mais impermeabilizada e que concentra maior parte da população de São Paulo. As classes “alto-baixo” e “baixo-alto” configuram regiões de transição. Na região central e leste da cidade aparecem áreas de “alto-baixo” em vermelho escuro e nas áreas mais periféricas que circundam a região central e leste aparecem áreas de “baixo-alto” em azul escuro.

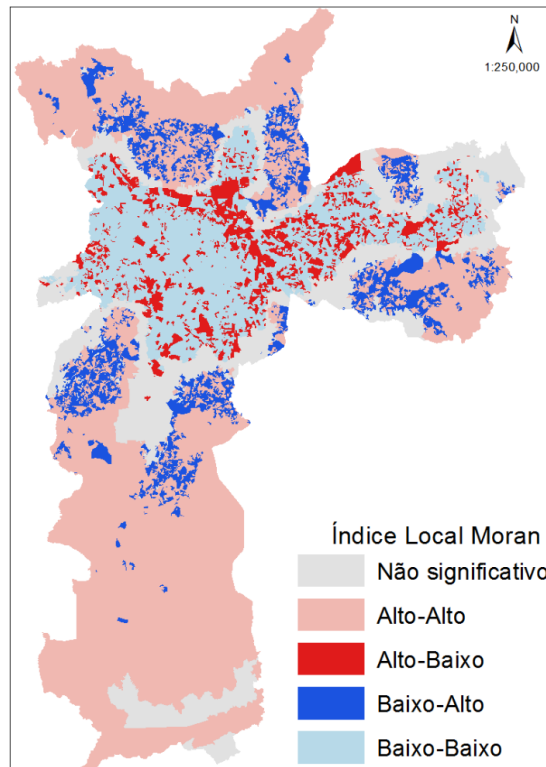


Figura 7 – Índice Local Moran

Como resultado da aplicação do índice de avaliação de vulnerabilidade às ilhas de calor, essa análise buscou identificar áreas prioritárias para implementação de estratégias e medidas de mitigação aos efeitos das ilhas de calor. É possível então, perceber que, para cada componente, uma região da cidade mostra-se relevante, sendo o centro-leste o mais crítico considerando a análise geral do indicador composto.

De modo complementar, consideramos a sobreposição das áreas avaliadas pelo IVIC e as áreas determinadas pelo PDE que possuem previsão para implementação de medidas mitigadoras (

Figura 8). Como resultado, é possível verificar que as áreas melhores avaliadas estão na Macrozona de

Proteção e Recuperação Ambiental – considerada um território ambientalmente frágil – a qual possui diretrizes gerais para proteção ambiental devido à presença de remanescentes florestais significativos e áreas de produção agrícola. Entretanto, não são mencionadas especificamente questões voltadas às ilhas de calor. As áreas avaliadas como mais críticas estão na Macroárea de Estruturação Metropolitana, a qual apresenta grande diversidade de padrões de uso e ocupação do solo, desigualdade socioespacial, dentre outros fatores, onde são previstas, sobretudo, implementação de áreas verdes, considerando o objetivo de recuperar a qualidade de rios, córregos e áreas vegetadas.

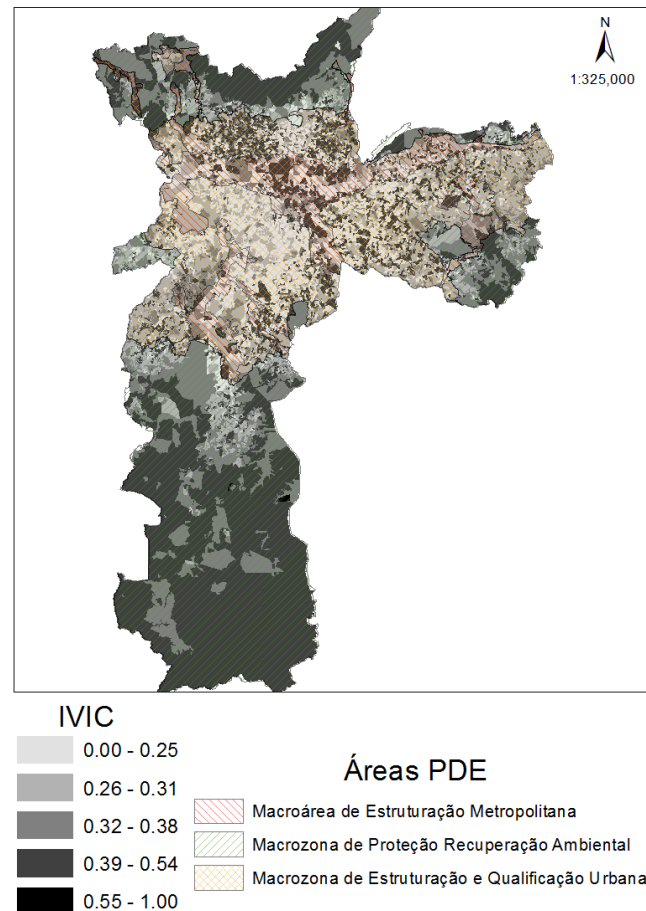


Figura 8 - IVIC e áreas e zonas previstas no PDE

Discute-se, nesse contexto, a necessidade de um planejamento para a implementação das áreas verdes no município, considerando as áreas prioritárias identificadas. Carbone, Coutinho, Tomerus & Philippi Junior (2015) analisaram a gestão pública de áreas verdes em São Paulo, destacando que o processo de planejamento dessas áreas ainda é deficiente, e que, de acordo com atores envolvidos na gestão das áreas verdes, “... não foi realizado um plano que atribuisse a distribuição das áreas verdes utilizando critérios como a priorização de implantação em áreas que sofrem enchentes e ilhas de calor, que, geralmente, são os locais mais adensados...” (Coutinho *et al.*, 2015, p. 207).

No âmbito do PDE, há a definição para a implantação do Sistema de Áreas Protegidas, Áreas Verdes e Espaços Livres que tem, dentre outros objetivos, a qualificação das áreas verdes públicas. Segundo informações da SVMA (2016), o sistema deve ser estruturado a partir da formulação do Plano de Áreas Protegidas, Áreas Verdes e Espaços Livres pela Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente. Um ciclo de debates foi realizado em 2016 visando a

discussão dos macrotemas: Áreas Protegidas, Áreas Verdes, Espaços Livres e Gestão e Indicadores de Monitoramento. Não foram obtidas maiores informações sobre o andamento do plano em questão.

Outras oportunidades de aplicação do IVIC poderiam ser exploradas, considerando o grau de detalhamento do índice, como possível determinação de um zoneamento mais detalhado para a construção, utilização e ocupação dos lotes na cidade, de maneira que possam ser propostas mudanças específicas, como por exemplo, no próximo nível de decisão, que seria a Lei de Zoneamento da cidade, visto seu papel no ordenamento e uso do solo no município de São Paulo.

CONCLUSÃO

Este trabalho, cujo objetivo é a análise de áreas prioritárias para implementação de medidas de mitigação aos efeitos do fenômeno de ilhas de calor urbano, representa uma incipiente investigação das aplicações do mapeamento de vulnerabilidade no município de São



Paulo. Apesar de suas potencialidades, este é passível de melhorias e aprimoramentos, como utilização de outras técnicas para composição de indicadores, bem como utilização de outras fontes de dados. A integração de um índice único, a partir da análise de componentes principais e análise espacial de diferentes informações sobre sensibilidade, capacidade de adaptação e exposição ao fenômeno de ilhas de calor referentes ao município de São Paulo, possibilitou concluir que as regiões centrais da cidade são consideradas críticas à exposição. Já regiões periféricas apresentaram baixos valores referentes à capacidade de adaptação e altos em relação à sensibilidade. Portanto, essas são consideradas prioritárias para a implementação de medidas de mitigação específicas para cada componente da vulnerabilidade, além da porção centro-leste, considerada como crítica na composição do índice como um todo. O instrumento básico de planejamento urbano do município de São Paulo, o Plano Diretor Estratégico, propõe algumas estratégias para mitigação dos efeitos negativos das ilhas de calor urbanas como recuperação e implantação de áreas verdes, bem como de rios e córregos. Entretanto, outras iniciativas, já consolidadas pela literatura e casos internacionais, poderiam ser inseridas no escopo do planejamento urbano, bem como nos processos de licenciamento de atividades e empreendimentos urbanos, para mitigação dos efeitos associados às ilhas de calor no município de São Paulo.

AGRADECIMENTOS

A primeira e segunda autoras agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das pesquisas de mestrado e doutorado, respectivamente. As autoras agradecem ainda ao professor Luis Enrique Sánchez (Escola Politécnica/USP) pelas discussões no início deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281.
- Aflaki, A., Mirnezhad, M., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Omrany, H., Wang, Z.-H., & Akbari, H. (2016). Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, 62, 131-145.
- Akbari, H., & Kolokotsa, D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy & Buildings*, 133(1), 834-842.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association – LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115.
- Anselin, L., Syabri, I., & Kho, Y. (2006). GeoDa: An introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*, 38(1), 5–22.
- Barros, H. R., & Lombardo, M. A. (2016). A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. *Geosp - Espaço E Tempo*, 20(1), 160–177.
- Beccari, B. (2016). A Comparative Analysis of Disaster Risk, Vulnerability and Resilience Composite Indicators. *PLoS Currents Disasters*, 14(1).
- Brasil. Lei nº 8.069, de 13 de julho de 1990. *Dispõe sobre o Estatuto da Criança e do Adolescente e dá outras providências*.
- Carbone, A. S., Coutinho, S. M. V., Tomerus, S. & Philippi Junior, A. (2015). Gestão de áreas verdes no município de São Paulo: Ganhos e Limites. *Ambiente & Sociedade*, (4), 201-220.
- De Sherbinin, A., Chai-Onn, T., Jaiteh, M., Mara, V., Pistolesi, L., Schnarr, E., & Trzaska, S. (2015). Data Integration for Climate Vulnerability Mapping in West Africa. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2561-2582.
- Dhalluin, A., & Bozonnet, E. (2015). Urban heat islands and sensitive building design - A study in some French cities' context. *Sustainable Cities and Society*, 19, 292–299.
- Druck, S., Carvalho, M.S., Câmara, G., & Monteiro, A.V.M. (eds). (2004). *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Brasília: EMBRAPA.
- Eibe F., Hall, M. A., & Witten, I. H. (2016). The WEKA Workbench. In: *Online Appendix for "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques"*. 4 ed. Morgan Kaufmann.
- Fernández, F. J., Alvarez-Vázquez, L. J., García-Chan, N., Martínez, A., & Vázquez-Méndez, M. E. (2015). Optimal location of green zones in metropolitan areas to control the urban heat island. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 289, 412–425.
- Fernandez, M. A., Bucaram, S. J., & Renteria, W. (2015). Assessing local vulnerability to climate change in Ecuador. *SpringerPlus*, 4(1), 738.



Vulnerabilidade às Ilhas de Calor no Município de São Paulo: Uma Abordagem para a Implantação de Medidas Mitigadoras na Gestão Urbana

- Füssel, H. M., & Klein, R. J. T. (2006). Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75(3), 301–329.
- Gago, E. J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., & Ordóñez, J. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 749–758.
- Gan, G., Ma, C., & Wu, J. (2007). *Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications*. ASASIAM Series on Statistics and Applied Probability. ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability, SIAM, Philadelphia, ASA, Alexandria, VA.
- Gartland, L. (2008). *Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas*. Earthscan: Nova York.
- Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6 ed. São Paulo: Atlas.
- Harlan, S. L., Deplet-Barreto, J. H., Stefanov, W. L., & Petitti, D. B. (2013). Neighborhood effects on heat deaths: social and environmental predictors of vulnerability in Maricopa County, Arizona. *Environmental health perspectives*, 121(2), 197-204.
- Hattis, D., Ogneva-Himmelberger, Y., & Ratick, S. (2012). The spatial variability of heat-related mortality in Massachusetts. *Applied Geography*, 33, 45-52.
- Hung, L.-S., Wang, C., & Yarnal, B. (2016). Vulnerability of families and households to natural hazards: A case study of storm surge flooding in Sarasota County, Florida. *Applied Geography*, 76, 184–197.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). (2011). *Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário*. Rio de Janeiro: IBGE.
- Inostroza, L., Palme, M., & de la Barrera, F. (2016). A Heat Vulnerability Index: Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Santiago de Chile. *Plos One*, 11(9).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects (Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, & L.L. White (Ed.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kleerekoper, L., Van Esch, M., & Salcedo, T. B. (2012). How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30–38.
- Kumar, P., Geneletti, D., & Nagendra, H. (2016). Spatial assessment of climate change vulnerability at city scale: A study in Bangalore, India. *Land Use Policy*, 58, 514–532.
- Lombardo, M. A. (1985). *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo: Editora Hucitec.
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200–206.
- Nobre, C. A., Young, A. F., Saldiva, P. H. N., Osini, J. A. M., Nobre, A. D., Ogura, A. Rodrigues, G. de O. (2011). *Vulnerabilidades Das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo - Relatório Final*. Campinas: Unicamp.
- O'Malley, C., Piroozfarb, P. A. E., Farr, E. R. P., & Gates, J. (2014). An investigation into minimizing urban heat island (UHI) effects: A UK perspective. *Energy Procedia*, 62, 72–80.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. Methodology (Vol. 3). OECD.
- Prefeitura de São Paulo. (2016). *Geosampa*. Disponível em: <<http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/>>. Acesso em: 10 jun. 17.
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102.
- São Paulo. (2014). Lei no 16.050, de 31 de julho de 2014. *Plano diretor estratégico do município de São Paulo*.



Vulnerabilidade às Ilhas de Calor no Município de São Paulo: Uma Abordagem para a Implantação de Medidas Mitigadoras na Gestão Urbana

- São Paulo. (2005). Resolução nº 107/CADES/2005, de 27 de dezembro de 2005. *Dispõe sobre a aprovação da Minuta de Decreto que Regulamenta o Impacto de Vizinhança*.
- Siqueira-Gay, J., Giannotti, M. A., & Tomasiello, D. B. (2016). Accessibility and flood risk spatial indicators as measures of vulnerability. In: *Proceedings of the XVII Brazilian Symposium of Geoinformatics*. Campos do Jordão, São Paulo.
- SVMA (Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente). (2016). *SVMA debate formulação do Plano de Áreas Protegidas, Áreas Verdes e Espaços Livres*. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/noticias/?p=220041>. Acesso em: 27 jun. 2017.
- Tobler, W. R. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, 234–240.
- Wang, B., Pan, S. Y., Ke, R. Y., Wang, K., & Wei, Y. M. (2014). An overview of climate change vulnerability: A bibliometric analysis based on Web of Science database. *Natural Hazards*, 74(3), 1649–1666.
- Weis, S. W. M., Agostini, V. N., Roth, L. M., Gilmer, B., Schill, S. R., Knowles, J. E., & Blyther, R. (2016). Assessing vulnerability: an integrated approach for mapping adaptive capacity, sensitivity, and exposure. *Climatic Change*, 136(3–4), 615–629.
- Wolf, T., & McGregor, G. (2013). The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather and Climate Extremes*, 1, 59–68.
- Yan, Z.-W., Wang, J., Xia, J.-J., & Feng, J.M. (2016). Review of recent studies of the climatic effects of urbanization in China. *Advances in Climate Change Research*, 7(3), 154–168.
- Zaki, M. J., & Meira, M. J. (2013). *Data Mining and Analysis: Fundamental Concepts and Algorithms*. Cambridge University Press.