



Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium



ARTICLES/ARTIGOS/ARTÍCULOS/ARTICLES

Distribuição geoespacial e horária da temperatura do ar na cidade de Belém, estado do Pará, Brasil

Doutor Antonio Carlos Lôla da Costa

Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal do Pará, Belém, PA. **E-mail:** lola@ufpa.br

Doutor João de Athaydes Silva Junior

Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Diretoria de Recursos Hídricos, Belém, PA. **E-mail:** athaydes@ymail.com

Doutor Alan Cavalcanti da Cunha

Curso de Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amapá, Macapá, AP. **E-mail:** alancunha@unifap.br

David Galbraith Doutor

School of Geography, University Leeds, Leeds, UK. **E-mail:** d.r.galbraith@leeds.ac.uk

Doutor João Roberto Pinto Feitosa

Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA. **E-mail:** jrpfetosa@ufpa.br

Doutor. Arthur Mattos

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. **E-mail:** armattos@ct.ufrn.br

RESUMO

ARTICLE HISTORY

Received: 14 May 2013

Accepted: 22 July 2013

PALAVRAS-CHAVE:

Temperatura do ar
Clima urbano
Amazônia

Substituições das características naturais dos solos por estruturas artificiais causam normalmente mudanças significativas do microclima local, com repercussão no aumento da sensibilidade humana ao excesso de calor. O objetivo da pesquisa foi estudar a variabilidade geoespacial da temperatura do ar na cidade de Belém-PA, com base em uma classificação temporal de intervalos a cada três horas. Na etapa metodológica foi utilizada a

média horária de temperatura, obtida de vinte termômetros, especialmente distribuídos na área urbana de Belém. O período de investigação ocorreu durante sete dias consecutivos, inseridos na estação menos chuvosa da região Amazônica, mais precisamente no mês de outubro de 1995, considerado um ano climatologicamente normal. Os resultados indicaram que as áreas pouco arborizadas apresentaram maiores valores de temperatura do ar, enquanto que as menores temperaturas do ar foram observadas nos locais com maior porcentagem de arborização urbana.

KEY-WORDS:

Air Temperature
Urban Climate
Amazonian

Abstract: GEOSPATIAL DISTRIBUTION AND HOURLY AIR TEMPERATURE IN THE CITY OF BELÉM, PARÁ, BRAZIL.

Changes in the natural characteristics of the land surface by man-made structures can significantly alter microclimate and lead to increased human sensitivity to excess heat. The aim of this study was to investigate the geospatial variability in air temperature in the city of Belem - PA based on a classification of 3-hourly temporal intervals. We used hourly average air temperature, obtained from twenty thermometers, spatially distributed within the urban area of Belem. The research was carried out during seven consecutive days in October 1995, considered climatologically normal for the least rainy season in the Amazon region. The results showed that areas with no or little vegetation had higher air temperatures, whereas areas with higher levels of urban trees often had milder temperatures.

RESUME:

Température de l'air
Le climat urbain
Amazon

RESUME. LA DISTRIBUTION GEOSPATIALES ET DE LA TEMPERATURE DE L'AIR PAR HEURE DANS LA VILLE DE BELEM, PARA, BRESIL.

Les remplacements des caractéristiques naturelles des sols par des structures artificielles peuvent provoquer des changements microclimatique local considérables. Ce qui provoque l'augmentation de la sensibilité humaine à la chaleur excessive. L'objectif de la recherche était d'étudier la température géospatiel de l'air et la variabilité dans la ville de Belém-PA fondée sur une classification des intervalles temporels toutes les trois heures. Dans la méthodologie de l'étape a été utilisé la température de l'air moyenne horaire, obtenu vingt sans thermomètre répartis spatialement dans la zone urbaine de Bethlehem. La période de cette recherche s'est produite pendant sept jours consécutifs en Octobre 1995 considéré climatologique normale pour la saison moins pluvieuse dans la région amazonienne. Les résultats ont montré que les zones dépourvues ou dépourvu de végétation ont montré une température de l'air plus élevée, alors que des niveaux plus élevés d'arbres urbains ont souvent des températures plus clémentes.

Introdução

O aumento da temperatura do ar nas áreas centrais das cidades, em relação a sua periferia, gerado por alterações das características térmicas das superfícies, decorrentes da substituição de áreas verdes por edificações e pavimentação, é conhecido na literatura como o efeito da “ilha de calor urbana” (OKE, 1987). Dentre as diversas causas ou atividades humanas potencialmente capazes de provocar alterações meteorológicas de pequena e de meso-escala, a urbanização apresenta-se como uma das que mais contribuem (MAITELLI, 1991; GOLDREICH, 1992; JÁUREGUI, 1992; LOWRY, 1967). Além do crescimento desordenado causado pela urbanização das cidades, outras atividades humanas, como aumento da frota automobilística, industrialização, impermeabilização do solo, além da rápida substituição das áreas verdes, são fatores que influenciam significativamente no clima urbano (GARTLAND, 2010).

A ilha de calor é o reflexo de mudanças relacionadas com as alterações do balanço de energia e de radiação que ocorrem na zona urbana como consequência da substituição de superfícies naturais por superfícies pavimentadas e construções, as quais armazenam parte da energia solar recebida durante o dia, liberando-a para o ambiente após o por do sol. Deste modo, a energia que seria utilizada para evaporar a umidade presente na superfície, é diretamente absorvida pela superfície urbana central, aquecendo-a mais que a sua periferia entorno rural. O calor de origem antrópico, assim como a poluição atmosférica, também são fatores fundamentais nessas alterações (LANDSBERG, 1981).

A ilha de calor urbana é um fenômeno característico de todas as cidades e metrópoles. Entretanto, sua distribuição e intensidade são proporcionais ao crescimento da cidade e de sua população. Vários estudos mostram que as temperaturas nas cidades tendem a serem maiores nos centros urbanizados, tendendo a diminuir em direção a periferia das cidades (CHANDLER, 1962; HUTCHEON et al. 1967; GOLDREICH, 1992; CAMARGO; TAVARES, 1985; YAMASHITA, 1990; VIDAL, 1992). A ilha de calor indica também a variação estacional, sendo mais acentuada na estação seca, diminuindo de intensidade na estação chuvosa, quando a umidade ambiente é aumentada e os contrastes térmicos entre a cidade e a área rural circundante são reduzidos (JÁUREGUI, 1973; JÁUREGUI, 1979; ADEBAYO, 1987).

Vários estudos indicam a forte influência positiva da vegetação, tanto sobre o clima como sobre a qualidade do ar. Desta forma, as áreas verdes tendem a reduzir a temperatura do ar, amenizando o aquecimento excessivo do solo e das estruturas nele instaladas, pois equilibram as taxas de evapotranspiração e os níveis de vapor d'água na atmosfera próxima (STULPNAGEL et al., 1990; JÁUREGUI, 1992; MAITELLI et al., 1991; HASENACK; BECKE, 1991; BRASIL, 1995).

Esta energia solar disponível é considerável na região tropical, como por exemplo no Estado do Amapá, da ordem de 4900 Wh.m-2.dia⁻¹ em Macapá (latitude 00°), e em outros municípios entre 2 e 4 graus de latitude Norte, como Serra do Navio, Pacuí e Oiapoque, da ordem de 4000, 4400 e 3800 Wh.m-2.dia⁻¹, respectivamente (MARQUES et al., 2012).

A ilha de calor urbana também tende a ser mais intensa sob condições de céu claro e com ventos calmos (CHAO, 1991; ZURITA et al., 1991; LOMBARDO, 1985; VIDAL, 1992).

A partir da Revolução Industrial, as cidades ao redor do mundo mudaram drasticamente sua dinâmica de desenvolvimento, tornando-se em pouco tempo grandes centros industriais polarizadores de atividades socioeconômicas. Nesse período, final do século XIX, o crescimento acelerado da população, impulsionado por um forte êxodo rural resultou, entre outros fatores, em mudança do equilíbrio térmico urbano, provocando perda da qualidade de vida da população (SANTOS et al., 2012).

No Brasil, entre as décadas de 1940 a 1990, o aumento da população das cidades provocou uma inversão nos percentuais entre a população residente no campo, em relação à residente na zona urbana. O fenômeno da urbanização brasileira começou a partir de 1940, estimulado pela modernização da economia e o incremento do setor industrial (NASCIMENTO, 1985).

O novo paradigma de desenvolvimento econômico adotado, caracterizado pela propriedade privada dos meios de produção, mercados livres e trabalho assalariado, proporcionou ao longo das últimas décadas, centralização de atividades industriais, comerciais e financeiras, prioritariamente nas áreas urbanas, atraindo cada vez mais expressivas massas populacionais à procura de trabalho, educação, saúde, entre outros benefícios, contribuindo, desta forma, para a intensificação da degradação do meio físico natural (SILVA JUNIOR et al, 2012).

A cidade de Belém (latitude $01^{\circ} 23'S$, longitude $48^{\circ} 29'W$), apesar de se localizar em uma Região Brasileira relativamente pouco desenvolvida, nas últimas décadas vem apresentando significativo crescimento urbano, até certo ponto carente de planejamento adequado. Um aspecto característico é o aumento da densidade de estruturas prediais verticais e a expansão horizontal indiscriminada com perda de vegetação. Nesta cidade as superfícies naturais têm sido bruscamente substituídas por estes tipos de construções, com a substituição da vegetação natural por outros tipos de superfícies artificiais (COSTA, 1998).

Tendo em vista que tal crescimento urbano é um dos principais fatores que contribuem com tais alterações do clima urbano das cidades, e considerando-se a reduzida disponibilidade de pesquisas desenvolvidas sobre esse tema na região tropical de baixas latitudes (SANTOS et al., 2012), torna-se relevante desenvolver pesquisas desta natureza em face aos efetivos problemas ambientais potencialmente causados por eventual variabilidade espacial da média horária da temperatura do ar. Com efeito, é importante relacionar as influências das principais variáveis características de cobertura e uso do solo no clima urbano da cidade de Belém, Estado do Pará. Por ser a maior capital da região Norte do Brasil, torna-se relevante o estudo da temática, porque é possível por analogia ou similaridade, melhor compreender os efeitos das variáveis climáticas em outras cidades da Região Norte, ainda muito carente deste tipo de informação para implementação de políticas públicas de planejamento urbano (SILVA JUNIOR, 2012).

Material e Métodos

Local de estudo

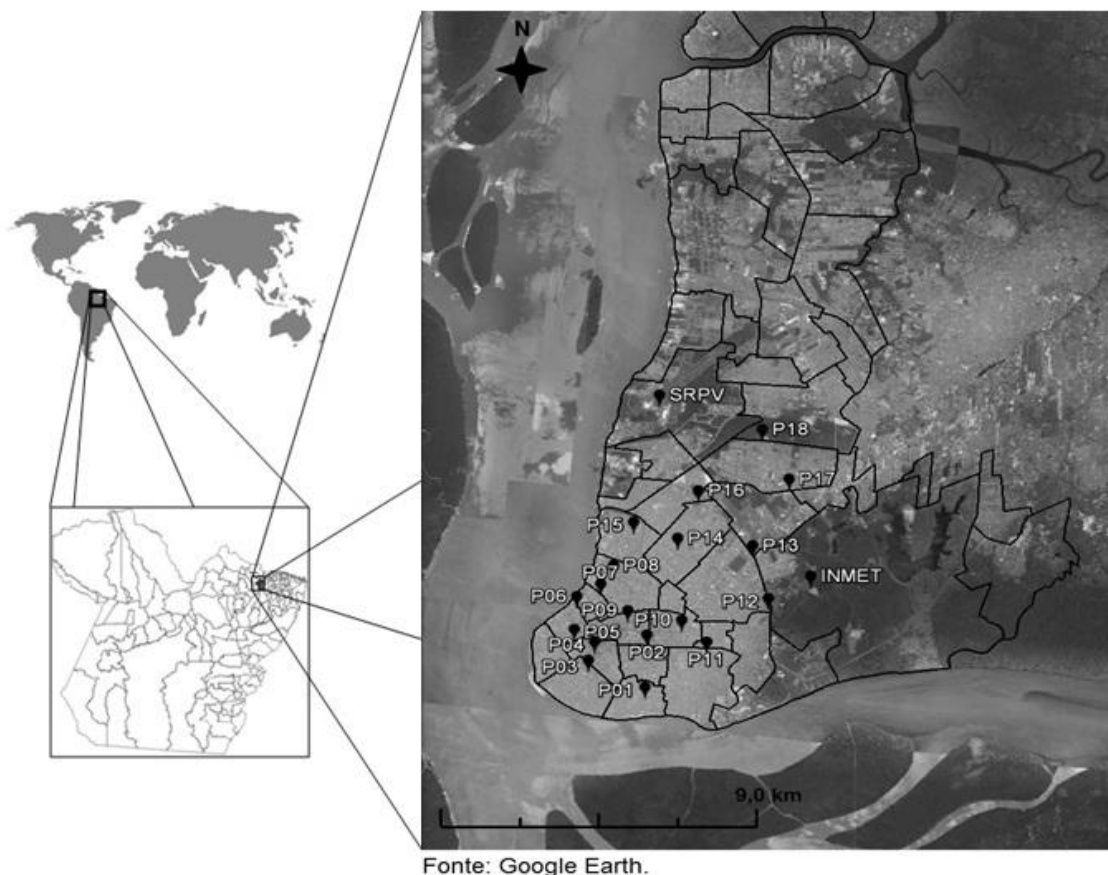
Este trabalho foi desenvolvido na área urbana da cidade de Belém, Estado do Pará (latitude 01°27'S e longitude 048°30'W). Foram utilizados vinte sítios amostrais para coleta de dados. Cada sítio amostral foi definido com base em suas características de uso e cobertura do solo. Observa-se, na imagem de satélite da Figura 01, que as cores em tom de cinza mais claro representa o uso e ocupação do solo, como a área da malha urbana da cidade de Belém. Por outro lado, as cores em tons de cinza mais escuro representam as áreas mais arborizadas ou periurbanas menos ocupadas (Figura 01).

O clima da cidade, segundo a classificação de Köppen é do tipo Am, ou seja, clima tropical chuvoso de monção, com um pequeno período apresentando precipitações inferiores a 60mm mensais. A temperatura média mensal do ar é de $26,0 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$, com máximas e mínimas variando entre $31,5 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ a $22,0 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Estas altas temperaturas são derivadas da grande quantidade de radiação solar disponível sobre esta região durante todos os meses do ano.

O total pluviométrico médio anual é de $2.858,7 \pm 76,6$ mm/ano, com maior volume no período chuvoso, entre dezembro e maio. Este intervalo corresponde a 71,2 % do total anual precipitado. Os 28,8% restantes da precipitação são distribuídos nos meses de junho a novembro (COSTA, 1998; SILVA JUNIOR et. al., 2012).

Na quantificação das principais características de cobertura do solo, foi considerada, principalmente, as porcentagens de cobertura vegetal, edificações e calçamento.

O período de estudo ocorreu de 23 a 29 de outubro de 1995. Este mês é climatologicamente considerado como o menos chuvoso da região, o qual se estende de agosto a novembro (COSTA. 1988).



Fonte: Google Earth.

Figura 01 – Localização da cidade de Belém e dos pontos de coleta de dados.

Dados utilizados

Foram utilizados dados médios horários de temperatura do ar com uso de termômetros analógicos, marca Incoterm, com precisão de 0,2C. Os dados horários foram obtidos simultaneamente em vinte sítios amostrais (denominados de unidades amostrais). A escolha dos sítios levou em conta tanto a dispersão geoespacial das estações quanto as diferentes características de uso e cobertura do solo. O período de coleta ocorreu durante 24 horas em período consecutivo de sete dias. Para a quantificação das principais características morfológicas da cobertura do solo, foi considerada uma área de raio igual a 500 metros, tendo como centro o local da coleta de dados. Definida esta área, um levantamento de campo detalhado foi realizado, onde todas as áreas correspondentes a vegetação, calçamento e edificações foram medidas, para posterior quantificação de suas respectivas porcentagens. Esta metodologia foi proposta e utilizada por Costa (1988).

Métodos Estatísticos

“O conjunto de dados obtidos das referidas coletas resultaram em uma planilha no formato Excel© Microsoft (2007), a qual foi importada pelo R-Project (software) em formato “.txt”, denominado de *data frame* (PETERNELLI; MELO, 2011; GOTELLI; ELLISON, 2011; R-TEAM, 2012).

O *data frame* com os dados da temperatura do ar apresentou a seguinte disposição: 1) Em linha foram dispostos as classes de horários, a que denominamos de tratamentos horários (“tr”), classificados de um (1) a oito (8), em intervalos de três horas cada um; 2) Em coluna, foram dispostos os sítios amostrais, dispostos num total de vinte (20) colunas (do Sítio 1 até o Sítio 18, além das estações meteorológicas do INMET e SRPV, que foram utilizadas como referência nas comparações.

As análises prévias, como descritivas, determinação de médias e variâncias foram aprofundadas com testes de hipóteses e suas premissas, tais como homogeneidade e constância das variâncias (Teste de Frigner), normalidade (Shapiro-Wilk), múltiplas comparações entre as médias para 95% de confiança, Tukey (ANOVA de Um-critério), similaridade (análise de conjunto ou *cluster - AC*) e análise de componentes principais (PCA). Esta última foi utilizada para avaliar a influência geoespacial e horária da temperatura urbana de Belém no período de estudo (PETERNELLI; MELO, 2011; R-TEAM, 2012).

Resultados e Discussões

Caracterização dos bairros estudados

As principais características de cobertura do solo na área urbana da cidade de Belém, nas proximidades dos locais de coleta de dados meteorológicos, são apresentadas na Tabela 01, na qual é apresentada a distribuição geoespacial das características de calçamento, edificações e vegetação nas proximidades dos locais de observações meteorológicas, conforme metodologia proposta por Costa (1988).

Observou-se que os bairros de Batista Campos (04), Umarizal (08) e Nazaré (09) foram os que apresentam a maior porcentagem de cobertura vegetal, contudo, sendo também bairros densamente verticalizados.

Esses bairros apresentaram trânsito intenso durante a maior parte do dia. Os bairros de Batista Campos e Nazaré apresentaram elevada porcentagem de arborização urbana, sendo esta representada, na maioria dos casos, por exuberantes e frondosas mangueiras. São bairros considerados centrais e nobres, onde a população, geralmente, possui alto poder aquisitivo.

TABELA 01 - Distribuição de calçamento, edificações e vegetação nas proximidades dos locais de observações meteorológicas.

Ponto	Bairro	Tipo	Calçamento	Outros	Edificações	Arborização
01	Condor	MRG	25,0	2,5	71,0	1,5
02	Cremação	CRU	22,5	0,0	77,0	0,5
03	Jurunas	MRG	22,0	0,5	73,0	3,5
04	B. Campos	CEA	9,50	0,0	70,0	20,5
05	Cid. Velha	CCU	24,0	10,	74,5	0,5
06	Campina	CCU	18,0	0,0	81,5	0,5
07	Reduto	CCU	23,0	40,0	70,0	3,0
08	Umarizal	CEA	11,0	1,0	73,5	14,5
09	Nazaré	CEA	15,0	0,0	70,0	15,0
10	São Brás	CRU	26,0	0,0	71,0	3,0
11	Guamá	MRG	10,0	9,5	78,0	2,5
12	Terra Firme	PEA	1,50	3,5	60,0	35,0
13	Marco	PEU	11,5	0,0	85,0	3,5
14	Pedreira	CRU	11,0	7,0	81,0	1,0
15	Telégrafo	MRG	4,0	5,0	87,5	3,5
16	Sacramenta	MRG	6,5	2,0	91,0	0,5
17	Souza	PEU	17,0	2,0	78,0	3,0
18	Marambaia	PEA	2,5	3,5	64,0	30,0
SRPV	Val-de-cães	RUR	40,0	0,0	20,0	40,0
INMET	Jabatiteua	RUR	0,5	0,0	0,5	99,0

Legenda: CEA (central arborizada); PEA (periférico arborizado); PEU(Periférico com pouca arborização); MRG (margem rio Guamá); CRU(central residencial com pouca arborização); CCU (central comercial com pouca arborização); RUR (rural)

Os bairros da Terra Firme (12) e Marambaia (18) foram bairros considerados periféricos, predominantemente residenciais e construções de materiais variados. Apresentaram mínima verticalização, sendo bairros muito populosos onde ainda verificou-se elevada porcentagem de arborização em suas proximidades.

Os bairros do Marco (13) e Souza (17) foram bairros considerados periféricos de utilização preferencialmente residencial, sendo também muito populosos, com mínima verticalização e pouca arborização urbana.

Os bairros da Condor (01), Jurunas (03), Guamá (11), Telégrafo (15) e Sacramenta (16), são bairros que margeiam ora o Rio Guamá, ora a Baía do Guajará. Uma de suas principais características foi a predominância, quase que absoluta, de edificações rasas e de materiais mistos, com utilização predominantemente residencial, além de uma grande ausência de arborização. Nestes bairros a população residente apresentou, na grande maioria, um poder aquisitivo relativamente baixo. Em muitos desses bairros, o problema habitacional é grave, sendo observadas inúmeras invasões de terras, onde as condições sanitárias são precárias, quando existem.

Os Bairros da Cremação (02), São Brás (10) e Pedreira (14) foram também considerados centrais, predominantemente residenciais, porém com pequena verticalização. Neles a porcentagem de vegetação também era pequena, embora em alguns casos surjam representativas áreas verdes isoladas, como o Bosque Rodrigues Alves, no bairro do Marco.

Os bairros da Cidade Velha (05), Campina (06) e Reduto (07) foram bairros tipicamente comerciais, muito urbanizados e com pouca arborização urbana.

Finalmente, o bairro da Jabatiteua, localizado em uma área que apresentou grande porcentagem de arborização, onde se localizava a estação meteorológica convencional de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Ministério da Agricultura. Este local foi considerado como rural, para efeito do presente estudo, por apresentar significativa porcentagem de arborização. Neste bairro foi onde se observou a mínima porcentagem de estrutura urbana, pelo fato de nele estar inserida uma unidade de conservação ambiental, a área de proteção ambiental de Belém – APA Belém, além de algumas instituições públicas. Esta disposição espacial provavelmente dificultou o avanço da ocupação urbana nesta área da cidade.

Nas Figuras 02a e 02b podemos visualizar a distribuição espacial do percentual de cobertura do solo pelos dois grupos principais que mais influenciaram no microclima urbano (calçamento e edificações e vegetação). Nestas figuras ficou bem evidente a presença de uma região com maior porcentagem de edificações e calçamentos, justamente nos bairros mais centrais (Sul), apresentando uma redução nestes componentes na direção dos bairros periféricos (Norte), onde conseqüentemente, observou-se um crescimento gradativo da cobertura vegetal.

Os bairros localizados a Sudoeste da cidade foram os que apresentaram as maiores porcentagens de calçamento e edificações, coincidindo com aqueles bairros mais antigos da cidade, onde predominam construções onde é desenvolvida grande parte das atividades comerciais. Nestes bairros, com pouca exceção, a ausência de arborização é quase que generalizada. Para a direção Norte da cidade, a porcentagem de cobertura vegetal apresenta um considerável crescimento, certamente associado com a presença de grandes áreas vegetadas ainda preservadas. Nestes bairros a ocupação é quase que exclusivamente composta por conjuntos residenciais, sendo ainda relativamente pequena a porcentagem de calçamento urbano.

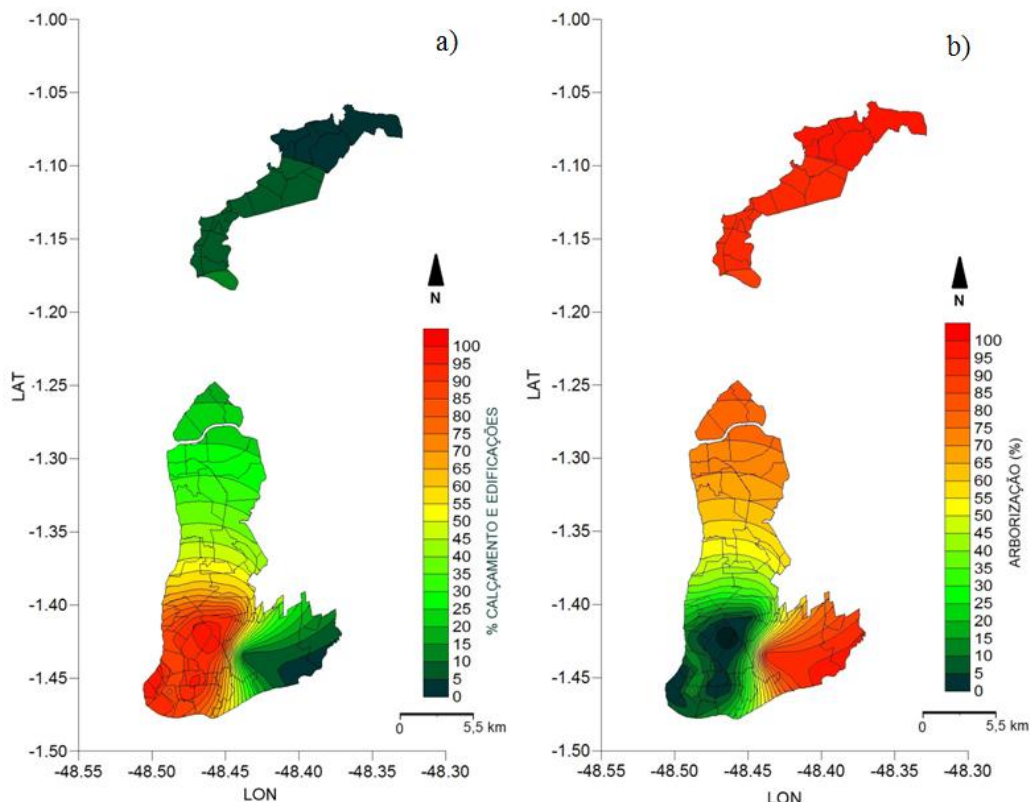


Figura 02 – Distribuição geoespacial do percentual de cobertura do solo pelos dois grupos principais que mais influenciaram no micro clima urbano. a) Calçamento e Edificações; b) Arborização.

Variabilidade da temperatura média do ar

No período de 01 a 03 horas (tratamento "tr" = 1), as temperaturas apresentaram-se relativamente baixas, variando entre 24,0°C e 26,0°C, com os menores valores sendo observados nos bairros mais periféricos da cidade (Norte), onde a pequena verticalização associada com a proximidade de grandes áreas verdes proporcionou um resfriamento noturno mais eficiente. Foi bem caracterizada nesse horário a presença de um grande núcleo de temperaturas mais elevadas na região central da cidade, onde se localizam os bairros comerciais mais urbanizados (FIGURA 03a). Este fato ocorreu em função da maior concentração de estruturas artificiais, que apresentam maior calor específico, o que proporciona uma maior absorção de energia durante os horários diurnos, liberando lentamente ao ambiente urbano esta energia, na forma de calor sensível, durante os horários noturnos, tornando-os mais aquecidos que a periferia urbana.

Entre 04 e 06 horas (tratamento "tr"=2) foram verificadas as menores temperaturas do dia, sendo as mínimas de 23,0°C encontradas nos bairros periféricos, independente da porcentagem de arborização, enquanto que as

máximas de $25,5^{\circ}\text{C}$ ocorreram nos bairros centrais, com grande deficiência de arborização. Apesar deste relativo resfriamento, os bairros mais verticalizados ainda apresentaram temperaturas mínimas superiores aos demais bairros. Entretanto, o padrão da distribuição das temperaturas ainda permaneceu relativamente semelhante à do horário anterior, embora cobrindo uma área menor e também com valores médios relativamente menores (FIGURA-03b).

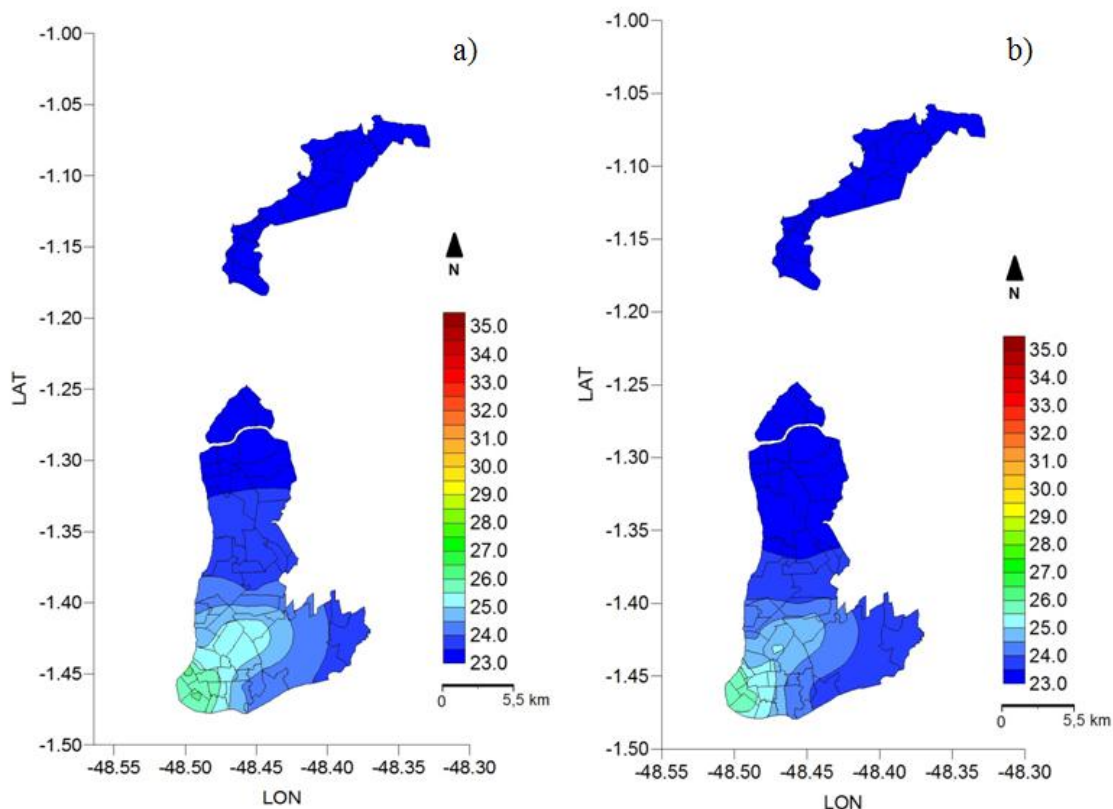


Figura 03 – Distribuição espacial da temperatura média do ar na cidade de Belém, para o período de: a) 01 a 03 horas; b) 04 a 06 horas.

No período entre 07 e 09 horas (tratamento "tr"=3), como era de se esperar, com o nascer do sol, ocorreu o aquecimento generalizado em todos os bairros, independente de suas características geoespaciais urbanas. Entretanto, nos bairros mais urbanizados, o aquecimento foi mais pronunciado, embora esta característica não seja claramente destacada nesta figura. Nesse horário as temperaturas absolutas oscilaram entre um mínimo de $25,0^{\circ}\text{C}$, verificadas nos bairros mais periféricos até um máximo de $28,0^{\circ}\text{C}$ nos bairros centrais mais urbanizados (FIGURA 04a).

No período entre 10 e 12 horas (tratamento "tr"=4), a distribuição espacial da temperatura do ar começou a se modificar significativamente. Verificou-se a marcante influência da vegetação que amenizou o aquecimento local. Com o aumento da temperatura do ar ao longo do dia, ficou evidente a formação de alguns núcleos de baixas temperaturas localizados nos bairros com maior porcentagem de arborização (Norte). Por outro lado, observou-se também um acentuado aquecimento em todos os bairros da cidade, embora as maiores amplitudes tenham sido observadas nos bairros centrais mais urbanizados e com pouca arborização (Sul), estando os valores médios oscilando entre 30,0 e 32,0°C (FIGURA 04b).

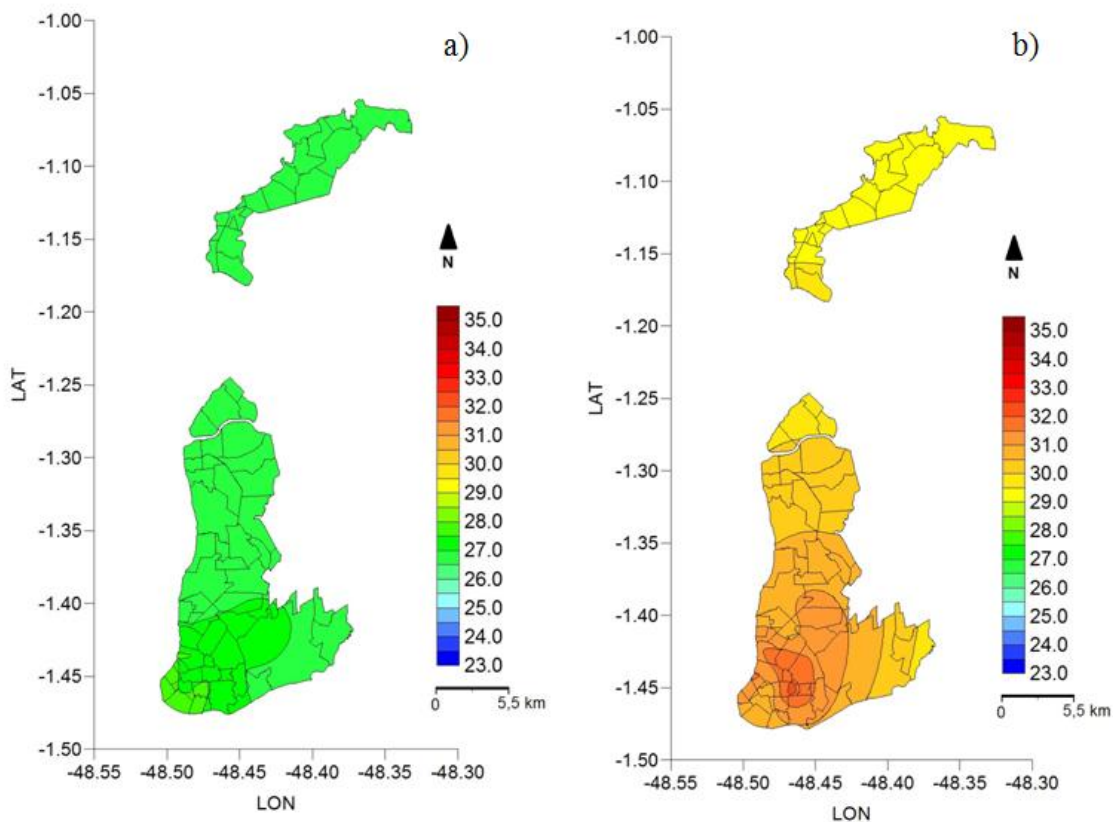


Figura 04 – Distribuição espacial da temperatura média do ar na cidade de Belém, para o período de: a) 07 a 09 horas; b) 10 a 12 horas.

No Período de 13 a 15 horas (tratamento "tr"=5) foram observadas as maiores temperaturas diárias em todos os bairros. Observou-se a tendência de aumento das temperaturas nos bairros centrais mais urbanizados (Sul), onde se destacaram a presença de dois grandes núcleos de temperaturas ("Ilhas de Calor") mais elevadas que os bairros vizinhos. As temperaturas mínimas foram de 31,0°C enquanto que as máximas alcançaram 34,0°C. Estas ocorreram em bairros com

pequena porcentagem de arborização e com edificações predominantemente baixas (Centro e Sul). A distribuição geoespacial da temperatura do ar foi claramente influenciada pela estrutura urbana da cidade (FIGURA 05a).

No período de 16 a 18 horas (tratamento "tr"=6), com o declínio solar e consequente redução da disponibilidade de radiação solar para o aquecimento do ar, teve início um resfriamento gradativo em todos os bairros, contudo, nos bairros centrais, com predominância de edificações e outros materiais absorventes de energia, este resfriamento ocorreu de forma consideravelmente mais lenta. Por outro lado, as temperaturas do ar mais elevadas também foram observadas nesses locais, onde se identificaram núcleos mais aquecidos, com valores de 32,0°C. Nos bairros periféricos, onde a estrutura urbana não proporcionou esta grande absorção energética diurna, os menores valores de temperatura do ar foram observados, com média em torno de 28,5°C (FIGURA 05b).

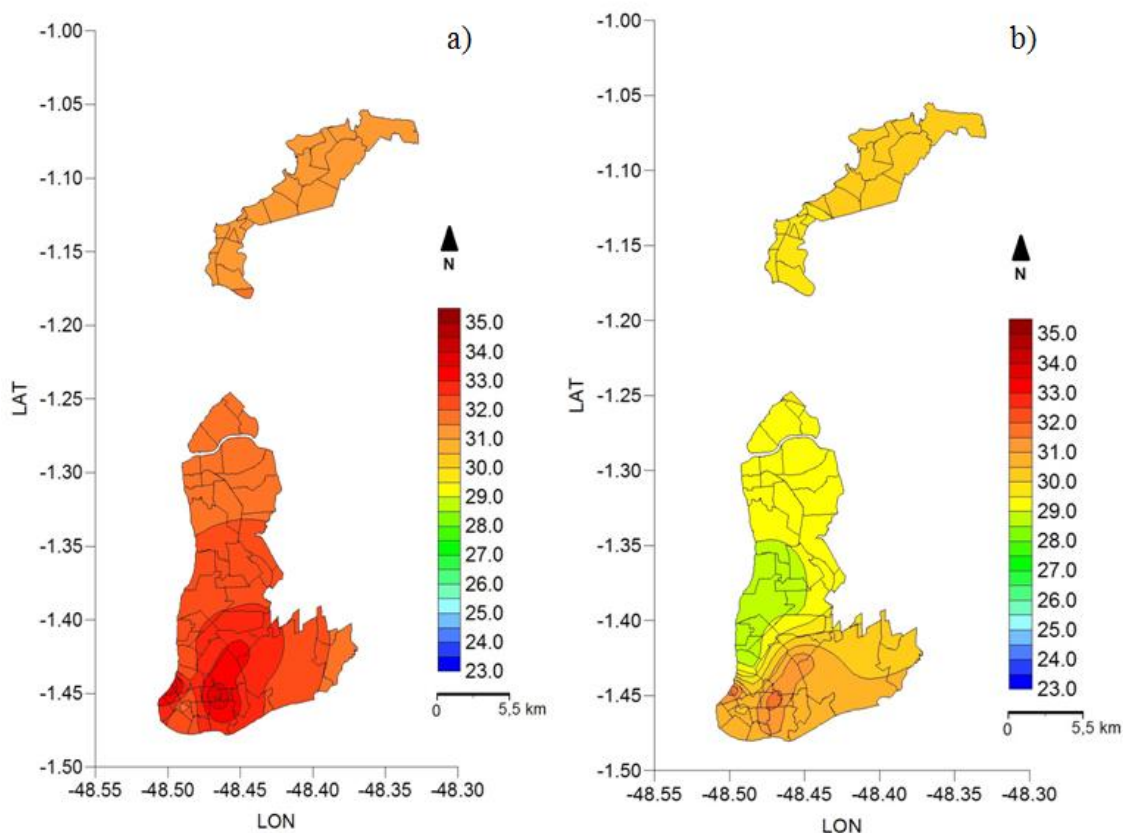


Figura 05 – Distribuição espacial da temperatura média do ar na cidade de Belém, para o período de: a) 13 a 15 horas; b) 16 a 18 horas.

Entre 19 e 21 horas (tratamento "tr"=7) ocorreu um resfriamento generalizado em todos os bairros, sendo caracterizada a máxima intensidade da "Ilha de Calor Urbana", onde os bairros centrais e mais urbanizados apresentaram-se, em média, até 4,0 °C mais elevados do que os bairros periféricos, onde os materiais urbanos absorventes de energia apresentam-se em pequenas proporções. Foi possível distinguir neste horário a configuração espacial de um "núcleo frio" localizado nos bairros periféricos arborizados, com temperatura de 25,5°C, e um grande núcleo de maiores temperaturas posicionado ao longo da região central da cidade, com máximos valores na área comercial, em torno de 29,5° (FIGURA 06a).

No período de 22 a 24 horas (tratamento "tr"=8), as diferenças térmicas encontradas entre os diferentes bairros já se tornaram relativamente reduzidas, com resfriamento acentuado, principalmente nos bairros mais periféricos e com grande porcentagem de arborização (Norte). Entretanto, ainda foi bem caracterizada a presença de um grande núcleo central de maiores temperaturas do ar cobrindo grande parte da região central da cidade, com valores médios em torno de 27,0°C. As temperaturas do ar observadas neste horário tenderam a diminuir na direção centro – periferia (Centro - Norte), com mínimos oscilando em torno de 24,5°C (FIGURA 06b).

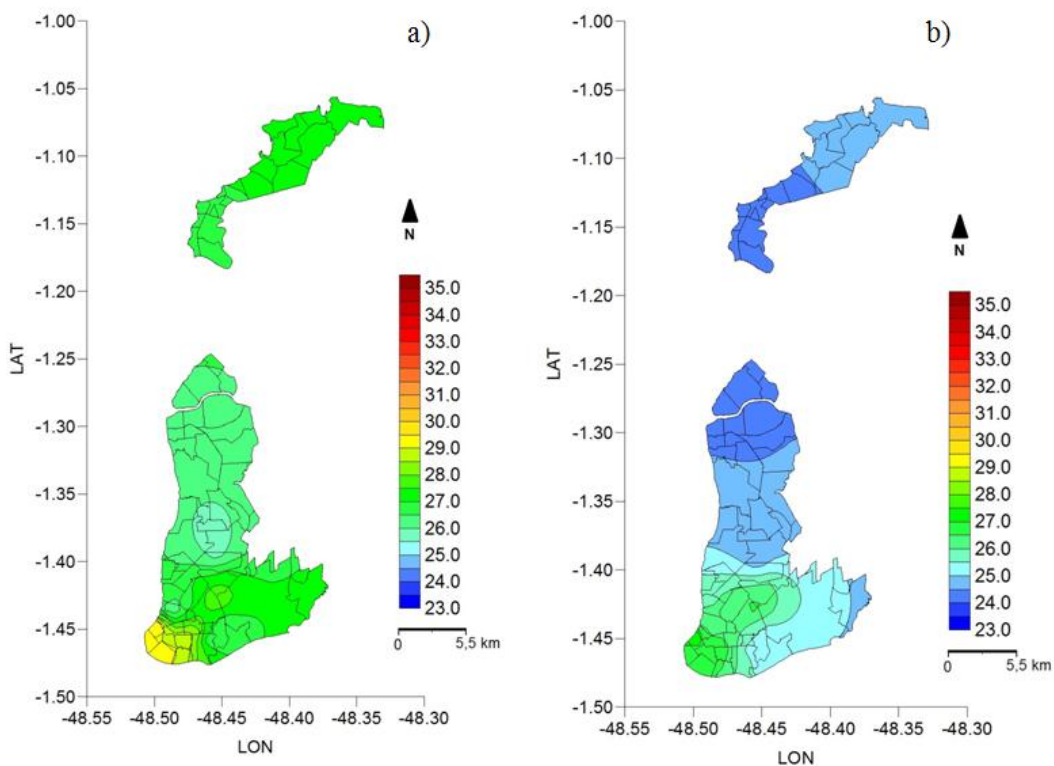


Figura 06 – Distribuição espacial da temperatura média do ar na cidade de Belém, para o período de: a) 19 a 21 horas; b) 22 a 24 horas.

Abordagem Estatística dos Resultados

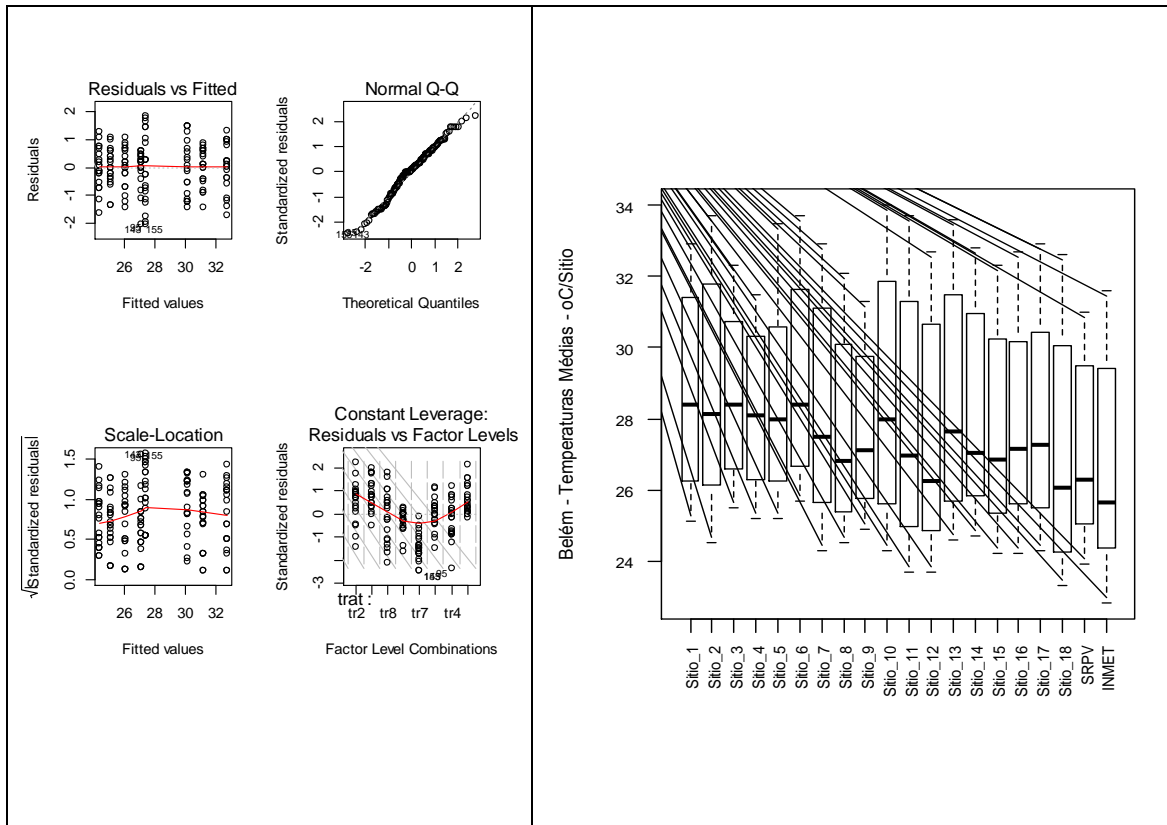
Na Figura 07 (a, b, c e d) é apresentado um resumo de todas as análises estatísticas relevantes realizadas no presente estudo em relação a temperatura média do ar. No primeiro quadrante foram resumidas as premissas das análises gerais, relacionadas com as premissas da Análise de Variância, como a constância dos resíduos, aceitação da normalidade das distribuições de temperatura, erros, desvios, etc.

No segundo quadrante da Figura 07 são apresentadas todas as médias de temperatura para cada sítio amostral, bem como seus intervalos interquartílicos de dispersão. Observou-se que o padrão de variação das médias refletem os resultados de variações geoespaciais da temperatura apresentadas em gráficos anteriores.

No terceiro quadrante da Figura 07 é apresentada a análise de regressão realizada entre a temperatura do ar e os diferentes elementos urbanos, onde se levou em consideração as porcentagens de calçamento, edificações, e vegetação, os melhores resultados encontrados ocorreram entre a vegetação e a temperatura máxima e média do ar, sendo seus coeficientes determinados pelos parâmetros $\mathbf{a} = 26,92 \pm 0,43$ ($p < 0,05$) e $\mathbf{b} = -1.60 \pm 0.41$ ($p < 0.05$) no modelo $y = a.e^{-bx}$, com $R^2 = 0,75$. Os resultados da equação ajustada a uma curva exponencial de decaimento mostrou que realmente ocorre decaimento da temperatura com o aumento da percentagem de vegetação ou arborização presente na área urbana. Tal característica pode estar diretamente associada com o balanço de energia no ambiente urbano, onde a contribuição da vegetação nos processos de evapotranspiração e sombreamento tendem a diminuir as temperaturas do ar, tornando o ambiente mais ameno nas áreas urbanas.

No quarto quadrante da Figura 07 foram realizadas análises adicionais, como a análise de agrupamentos (similaridades ou análise de conjuntos - AC). Neste caso, observou-se forte similaridade no padrão da variação microclimática horária, com 75% ou mais de semelhança, independentemente da variação geoespacial observada. Do mesmo modo, complementarmente, foi realizada uma análise de componentes principais (ACP) a qual indicou que 98% da variação da temperatura foi explicada pela primeira componente principal, sugerindo alinhamento forte e positivo com os horários ou tratamentos "tr" 4, 5 e 6 (período entre o fim da manhã e início da tarde) e negativo com os horários da madrugada e noturno. Entretanto, os testes não foram tão significativos, apresentando *scores* $< 0,70$, valor de corte sugerido na literatura (GOTELLI; ELISON, 2011).

De modo global, concluiu-se que a temperatura do ar efetivamente se elevou com o aumento da densidade urbana, ou com a diminuição do nível de arborização, mas as médias de temperatura foram fortemente influenciadas em relação às classes de horários estudadas.



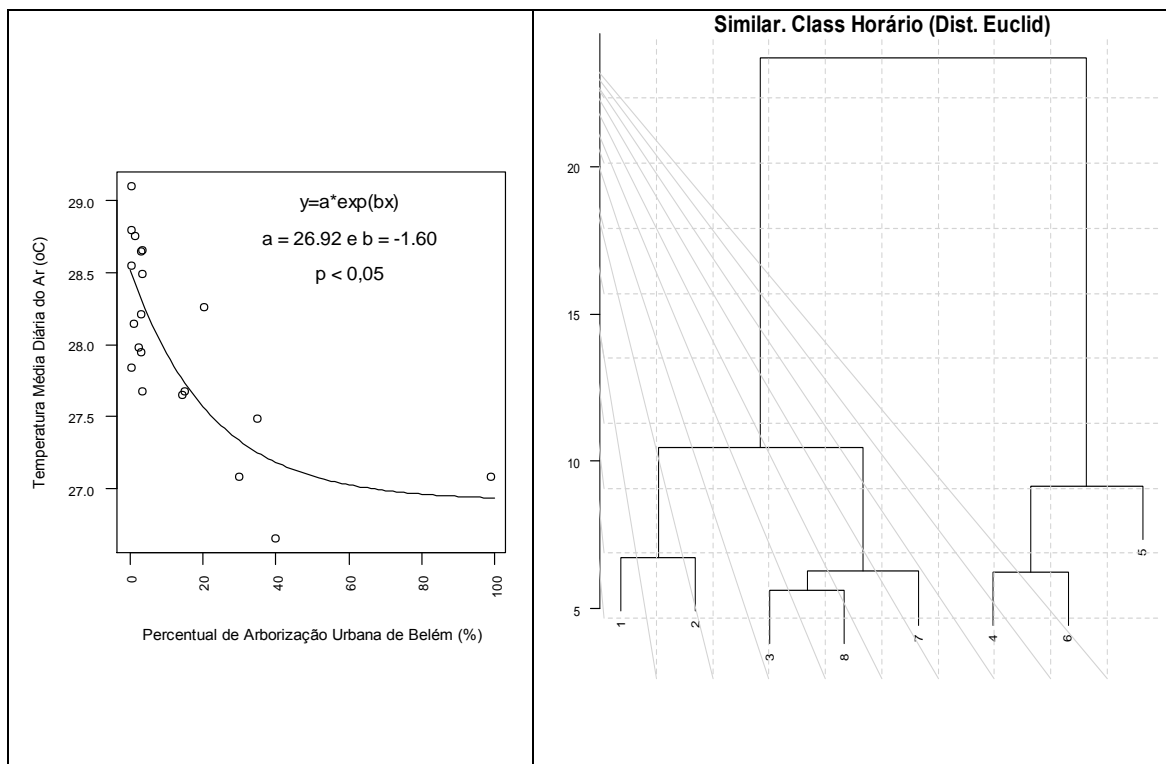


Figura 07 - Resumo das análises estatísticas. a) Padrão da constância das variâncias, normalidades, resíduos, níveis de fatores - ANOVA; b) Variação da temperatura média do ar para cada sítio amostral; c) Curva de decaimento da vegetação urbana com temperatura do ar diária (período de 23 a 29 de outubro de 1995; d) Similaridade horária de temperatura do ar.

Em relação à análise de classes horárias, ou tratamentos entre classes de horários, o método de Tukey (ANOVA) foi utilizado com o objetivo de realizar múltiplas comparações para diversos tratamentos (classes ou horários - "tr"), nas quais em apenas dois casos as médias horárias (tr1-tr2 e tr7-tr3) não foram significativamente distintas entre si para as vinte estações estudadas. Nos demais horários, houve significativas diferenças quando se comparam as temperaturas médias horárias.

Conclusões

Concluímos que a distribuição geoespacial de estruturas artificiais, como a diferente cobertura do solo que ocorre em áreas urbanas, apresentou significativa influência sobre a variabilidade da temperatura do ar. Esta variação térmica apresentou uma tendência de decrescimento da temperatura do ar no sentido dos bairros mais urbanizados (centrais) para os menos urbanizados (periféricos), que normalmente apresentam maior percentual de cobertura vegetal. Com efeito, verificou-se que esta tendência se ajustou de modo significativo a uma curva de decrescimento exponencial. A principal contribuição desta investigação foi o

entendimento das respostas térmicas em face das variações geoespaciais e horárias decorrentes das alterações das estruturas urbanas em uma cidade de grande porte na Amazônia brasileira.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Ao INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Ao LAMSA-PPGBIO/BIONORTE-CCAMB – UNIFAP - Laboratório de Modelagem de Sistemas Ambientais.

Referências

- ADEBAYO, Y. R. Short communication: A note on the effect of urbanization on temperature in IBADAN. *Journal of Climatology*, v.7,1987,p. 185-192.
- BRASIL, H. M. S. Caracterização da arborização urbana: o caso de Belém. Belém, Editora da Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Serviço de Documentação e informação, p.195, 1995.
- CAMARGO, J. C. G.; TAVARES, A. C. A influência da cidade de rio claro na temperatura e na umidade do ar. *Geografia*, 10 (20), out/1985, p. 149-168.
- CHANDLER, T. J. Temperature and humidity traverses across London. *Weather*, n. 17, 1962, p. 235-242.
- CHAO, Z. Urban climate and air pollution in Shanghai. *Energy and Building*, v.15/16, 1991, p. 647-656.
- COSTA, A. C. L. Estudo de Variações Termo-Higrométricas de Cidade Equatorial devido ao Processo de Urbanização. O caso de Belém – PA, 1998, 232f., Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1998.
- GARTLAND, L. Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo-SP, Ed. Oficina de Textos, p.248, 2010.
- GOLDREICH, Y. Urban climate studies in Johannesburg, A sub-Tropical city located on a ridge - A review. *Atmospheric Environment*, v. 26B, n. 3, 1992, p. 407-420.
- GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. Princípios de estatística em ecologia. Editora Artmed. Tradução de Francisco Beggiano Baccaro et al., Porto Alegre - RS. 2011. 527 p.
- HASENACK, H.; BECKER, V. L. Distribuição noturna da temperatura em Porto Alegre, RS utilizando o método de medidas móveis. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 1., Porto Alegre, 1991. Anais, Porto Alegre, 1991, p. 139 - 145.
- HUTCHEON, R. J.; JOHNSON, R. H.; LOWRY, W. P.; BLACK, C. H.; HADLEY, D. Observations of the urban heat island in a small city. *Bulletin American meteorological society*, v.48, n.1, 1967. p. 7-9.
- JÁUREGUI, E. The urban climate of Mexico city. *ERKUNDE*, n.27, 1973, p. 298-307
- JAUREGUÍ, O. E. Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmospheric Environment*, v.26B, n.3, 1992, p. 391-396.
- JAUREGUÍ, O. E. La isla de calor en Toluca, Mex. *Boletín del Instituto de Geografía*, n.9, Mexico, 1979.
- LANDSBERG, H. E. The urban climate. New York. Academic Press, 1981.
- LOMBARDO, M. A. A ilha de calor nas metrópoles - O exemplo de São Paulo. Ed. Huciteck, 1985.
- LOWRY, W.P. The climate of cities. *Scientific American*, v.217, n.2, 1967, p.15-23.
- MAITELLI, G. T.; ZAMPARONI, C. A. P. G. ; LOMBARDO, M. A. Ilha de calor em Cuiabá - MT: Uma abordagem de clima urbano. in: Encontro Nacional e Estudos sobre Meio Ambiente, 3, Londrina - PR, comunicações, Londrina - PR, 1991, p.561-571.
- MARQUES, D. D; BRITO, A. U; CUNHA ,A.C. e SOUZA, L. R. Variação da radiação solar no Estado do Amapá: Estudo de caso em Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque no período de 2006 a 2008. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.27, n.2, 127 - 138, 2012.
- NASCIMENTO, C. C. Clima e morfologia urbana em Belém. Belém: UFPA. NUMA, 1995. 157p.
- OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*.2.ed., 1987.
- PETERNELLI, L. A.; MELO, M. P.. Conhecendo o R: uma visão estatística. Série Didática. Editora UFV. 2011.

- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.
- SANTOS, K. P. C.; CUNHA, A.C.; COSTA, A.C. L. e DE SOUZA, E.B. Índices de tendências climáticas associados à “ilha de calor” em Macapá-AP (1968-2010). Revista Brasileira de Ciências Ambientais – Número 23 – Março de 2012. p-1-16.
- SILVA JÚNIOR, J. A. Avaliação de parâmetros micrometeorológicos, do conforto e da percepção térmica na área urbana da cidade de Belém- PA. 2012, 157f., Tese de Doutorado em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém.
- SILVA JÚNIOR, J. A.; COSTA, A. C. L.; PEZZUTI, J. C. B.; COSTA, R. F.; GALBRAITH, D. Análise da Distribuição Espacial do Conforto Térmico na Cidade de Belém, PA no Período Menos Chuvoso. Revista Brasileira de Geografia Física, v.2, 2012, p.218-232.
- STULPNAGEL, A. V.; HORBERT, M.; SUKOPP, H. The importance of vegetation for the urban climate. Urbanecology, 1990, p. 175-193.
- VIDAL, R. D. B. Influência da morfologia urbana nas alterações da temperatura do ar na cidade de Natal (RN). In: Encontro de Professores de Conforto Ambiental - NE. , 1, João Pessoa - PB, 1992, p.33-37, Anais.
- YAMASHITA, S. The urban climate of Tokyo. Geographical Review of Japan. v. 63, n.1, 1990, p. 98-107.
- ZURITA, E.; YAGUE, C.; MARTINEZ, A. Statistical analysis of the Madrid urban heat island. Atmospheric Environment, v.25b, n.3, 1991, p.327-332.