



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Influência do crescimento urbano sobre o microclima de Manaus e Belém: Um estudo observacional*

Diego Oliveira de Souza¹, Marília Guedes do Nascimento², Regina Célia dos Santos Alvalá³

¹ Dr. em Meteorologia, Tecnologista do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Estrada Doutor Altino Bondesan, 500 - Distrito de Eugênio de Melo, São José dos Campos, São Paulo, CEP 12.247-016. (12) 32050128. diego.souza@cemaden.gov.br (autor correspondente). ² Dra. em Meteorologia, Tecnologista do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, São Paulo, CEP 12.630-000. (12) 31868400. marilia.nascimento@cptec.inpe.br. ³ Dra. em Meteorologia, Pesquisadora do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Estrada Doutor Altino Bondesan, 500 - Distrito de Eugênio de Melo, São José dos Campos, São Paulo, CEP 12.247-016. (12) 32050128. regina.alvala@cemaden.gov.br.

Artigo recebido em 13/11/2015 e aceite em 28/12/2015.

RESUMO

O crescimento urbano, relacionado com acelerados processos de urbanização e consequentes mudanças dos usos e cobertura da terra podem modificar diretamente o balanço de energia em superfície, gerando modificações na atmosfera que podem variar em escalas local até regional. Procurando entender as dimensões dos efeitos da urbanização em cidades da região Norte do Brasil, o principal objetivo deste trabalho é estudar a influência do crescimento urbano sobre o microclima local das cidades de Manaus e Belém. Para o estudo foram utilizadas séries históricas de temperatura e precipitação coletados nos dois municípios, assim como imagens de satélite e dados de reanálises atmosféricas. Os resultados obtidos através das análises de tendências mostraram uma elevação na temperatura de até 1,5 °C nos últimos 50 anos, diretamente associada com o crescimento da área urbana. Análises de extremos de temperatura diária também apontaram que o microclima das cidades de Manaus e Belém está modificando, sendo influenciado não só pela variabilidade climática, mas também por mudanças nos usos da terra relacionados com processos de urbanização. A partir dos resultados foi possível observar que o crescimento da área urbana e aumento da população apresentam relação direta com modificações no microclima local das duas cidades.

Palavras-chave: Urbanização, Amazônia, Tendências de temperatura.

The influence of urban growth on the microclimate of Manaus and Belém: A observational study

ABSTRACT

The urban growth associated with the urbanization process can directly modify the surface energy balance, generating changes in the atmosphere that may vary from the local to regional scale. Thus, trying to understand the dimensions of the effects of urbanization, the objective of this work is to study the influence of urban growth on the local microclimate of the cities of Manaus and Belém. For the study we used historical temperature and rainfall data collected in both cities, as well as satellite imagery and atmospheric reanalysis data. The results obtained through trend analysis showed an increase of temperature of up to 1.5 °C in the last 50 years, showing a possible relationship with the urban growth. Analysis of extreme daily temperature also proved that the microclimate of Manaus and Belém is changing, being influenced not only by climate variability, but also by changes in land-related processes, such as urbanization. In the

* Trabalho extraído de tese de doutorado em Meteorologia no INPE. Financiada pela FAPESP.

results we observed that the growth of the urban area and the increase of population is directly related to changes in local microclimate of the cities.

Keywords: Urbanization, Amazon, Temperature trends.

Introdução

A América Latina está passando por um intenso processo de desenvolvimento nos últimos anos, o que está diretamente associado ao crescimento das áreas urbanas (UN, 2008). Particularmente no contexto da região amazônica, as cidades de Manaus e Belém apresentam papel importante na economia da região, assim como representam a maior população urbana da Amazônia, sendo Manaus a sétima cidade mais populosa do Brasil.

Segundo dados do IBGE (2010) as cidades de Manaus e Belém possuíam em 1991 aproximadamente 1 milhão de habitantes, passando para 2,02 milhões e 1,4 milhões respectivamente neste último censo, tornando a cidade de Manaus a 7ª maior cidade do país em população. Os dados do censo também mostram que houve uma intensa migração da área rural para área urbana na região amazônica, o que segundo Nogueira et al. (2007) contribuiu para uma redução de 65% da cobertura vegetal da região.

As pressões para as mudanças dos usos e cobertura da terra na Amazônia continuam fortes, com planos para a construção de um número significativo de novas estradas ou asfaltamento de estradas existentes nos próximos 15 anos, conforme previamente ressaltados por Nepstad et al. (2001) e Laurance et al. (2001). Além de desmatamentos e queimadas, a urbanização é também um fator extremo de mudança no uso da terra. Atividades humanas associadas ao fenômeno de urbanização também provocam impactos locais, tais como mudanças na composição da atmosfera, no balanço de umidade e modificações no ecossistema. Um claro indicador dos efeitos no clima local de uma área urbana é a formação das chamadas Ilhas de Calor Urbanas (ICU).

Enquanto as cidades ocupam apenas 0,05% da superfície da Terra, mais da metade dos habitantes do planeta moram em regiões urbanas, sendo estes diretamente afetados pelas condições ambientais destas regiões, principalmente devido à formação das ICUs (Masson, 2006). Assim sendo, a formação das chamadas ICUs influenciam de forma direta o Balanço de Energia em Superfície (BES), o qual está diretamente associado à estrutura urbana, mudanças nos usos e cobertura da terra e população, enquanto que a intensidade da ICU está positivamente

correlacionada com a população (Oke, 1973; Oke, 1982). Estudos sobre ICUs iniciaram na década de 50, com o trabalho de Manley (1958), e posteriormente estudos relacionaram a sua presença com mudanças na atmosfera, incluindo efeitos devido à rugosidade (Grimmond et al, 1998), como a formação de turbulência (Roth, 2000), efeitos na intensificação de tempestades (Bornstein e Lin, 2000), alterações na hidrologia (Grimmond et al, 1986; Grimmond e Oke, 1986) e ainda impactos na dispersão de poluentes (Freitas, 2003). Kalnay e Cai (2003), por exemplo, ressaltaram a existência de uma relação direta entre o processo de urbanização e tendências de aumento na temperatura mínima e diminuição da temperatura máxima, atribuindo tais tendências às mudanças nos usos da terra.

Particularmente para o Brasil, a ICU da cidade de Belém foi previamente avaliada por Costa et al (2001), que encontraram grandes evidências da sua presença, com diferenças diárias de temperatura entre a área urbana e rural de até 4,5 °C. Recentemente, Souza e Alvalá (2014) avaliaram as diferenças de temperatura e umidade relativa, entre áreas intensamente urbanizadas e floresta, na cidade de Manaus, encontrando diferença média de 3° C na temperatura e 3% na umidade relativa entre a área urbana e a área de floresta adjacente.

Considerando o grande número de trabalhos científicos para a região amazônica e o grande interesse da região para o clima local e regional, ainda não foram realizados estudos focando a evolução do microclima destas duas cidades, assim como o efeito do crescimento urbano. Assim sendo, com o intuito de entender as dimensões dos efeitos da urbanização nas duas maiores cidades da região amazônica, o presente estudo tem como principal objetivo avaliar o impacto do crescimento urbano sobre o microclima local das cidades de Manaus e Belém a partir de dados observacionais.

Material e métodos

Para desenvolvimento do presente trabalho considerou-se duas etapas principais. Em uma primeira etapa foi realizado o mapeamento da evolução de crescimento das áreas urbanas de Manaus e Belém a partir da interpretação de imagens do sensor TM do satélite Landsat 5, bandas 2, 3 e 5 com 30 m de resolução e escala de 1:250.000.

O processo de mapeamento das áreas urbanas foi realizado através de classificação visual, sendo mapeado primeiramente o ano de 1973 e, posteriormente, anos seguintes, sempre utilizando como base o mapeamento da data anterior para avaliação do crescimento.

Posteriormente, em uma segunda etapa foi realizado estudo observacional, considerando-se para tal dados de séries históricas de temperatura e precipitação coletadas em área urbana nas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes ao período de 1961 a 2010. Com o objetivo de analisar os possíveis impactos do crescimento urbano sobre o microclima local, foram analisadas as anomalias das variáveis temperaturas média, máxima e mínima, e precipitação, as quais foram calculadas com relação à média do período de 1961 a 2010.

A tendência linear e o desvio padrão dos conjuntos de dados de anomalias anuais foi calculada para avaliar a sua magnitude. Para o cálculo da inclinação da reta de regressão foi utilizado o método não-paramétrico da Curvatura Sen (Sen, 1968), e significância das tendências anuais foi estudada através do teste sequencial de Mann-Kendall (Goossens, 1983).

Segundo Gossens e Berger (1986), o teste sequencial de Mann-Kendall permite uma melhor análise de mudanças climáticas abruptas, pois, assumindo a hipótese de um clima estável, a sucessão de valores climatológicos deve ser independente e a distribuição da probabilidade deve permanecer sempre a mesma. Esta metodologia foi utilizada com sucesso em vários estudos como, por exemplo, Montávez et al. (2000) e Obregon e Nobre (2003).

Além da análise das tendências, foram analisados alguns índices relacionados à extremos de temperatura, como proposto em Vincent et al. (2005). Destaca-se que para o conjunto de dados de extremos também foram calculadas as tendências e a significância estatística utilizando a mesma metodologia apresentada anteriormente. Os índices foram calculados para períodos anuais (1961-2010) e para as estações seca e chuvosa, tendo sido excluídos os meses que tiveram três ou mais dias sem dados.

Para uma estimativa da influência do crescimento urbano das cidades de Manaus e Belém sobre o clima local foi utilizada a metodologia proposta por Kalnay e Cai (2003), onde compara-se os dados observados de temperatura com o conjunto de dados de reanálises do NCEP/NCAR (NNR) (Kalnay et. al, 1996). Esta estimativa pode ser considerada eficaz

e vantajosa pois este conjunto de dados NNR não são sensíveis às observações de superfície, e, assim, os valores estimados de temperatura em superfície (2 m) nos dados NNR são derivados de valores obtidos através de sondagens atmosféricas. Como resultado, os dados do conjunto NNR deveriam não ser sensíveis à urbanização ou efeitos das mudanças nos usos da terra, e assim a subtração entre os dados observacionais e de reanálises indicará o possível grau de influência das modificações dos usos da terra. Considerando que o espaçamento horizontal dos dados NNR é de 2,5°, a estimativa da temperatura nos pontos centrais referentes às cidades de Manaus e Belém foi feita escolhendo-se 6 pontos de grade ao redor do ponto central e, assim, feita uma média ponderada pela sua distância.

Resultados

Avaliação do crescimento da área urbana

As análises do crescimento da área urbana da cidade de Manaus (Figura 1) mostram um crescimento predominantemente na direção norte e nordeste, permitindo inferir que entre os anos de 1973 e 2008 sua área urbana aumentou aproximadamente 153 km², o que mostra estar diretamente associado ao crescimento populacional de mais de 500% nos últimos 30 anos (1970-2000) (IBGE, 2010).

Em Belém (Figura 2) observa-se um aumento da sua área urbana de aproximadamente 190 km² entre 1973 e 2008, com crescimento predominantemente na direção leste.

Grande parte deste aumento na população urbana esteve relacionado com a migração da população residente em área rural para as áreas urbanas, além de incentivos fiscais que contribuíram para uma intensa migração da população do país para a região amazônica (IBGE, 2010).

As características do microclima de Manaus e Belém

A Tabela 1 mostra as principais características associadas à temperatura e precipitação para as duas cidades. Em Manaus, os valores de temperatura média mostram que o mês de outubro (março) é o mais quente (frio), enquanto durante os meses de fevereiro e março (outubro) foram registrados os menores (maiores) valores de temperatura máxima (mínima). Quanto à precipitação, o mês de abril (agosto) apresentou os maiores (menores) índices pluviométricos.

Em Belém, em média, o mês de novembro (fevereiro) é o mais quente (frio). As máximas (mínimas) temperaturas do ar são observadas durante o mês de novembro (outubro), enquanto os dados pluviométricos mostram que o mês de março (novembro) apresentou os maiores (menores) valores.

Conforme definição dos períodos seco (maio-outubro) e chuvoso (novembro-abril) (Silva Dias et. al., 2002) nota-se uma evidente relação entre a temperatura média mínima e o período chuvoso, que ocorre durante o mês de março, dentro do quadrimestre chuvoso (JFMA). Este comportamento mostra-se diretamente relacionado às mudanças no balanço de radiação em superfície (resfriamento radiativo) e conseqüentemente resfriamento da atmosfera, conforme também ressaltado, entre outros, por Betts (2009). Além disso, variações anuais na temperatura do ar em superfície são influenciadas pela variabilidade de mecanismos dinâmicos que geram convecção, formação de nuvens e chuva, como eventos de El Niño/Oscilação Sul (ENOS) que influenciam de forma direta a célula de Walker, suprimindo a atividade convectiva sobre a região amazônica e, assim, a formação de nuvens e convecção (Kayano e Moura, 1986; Molion, 1991; Rao e Hada, 1990). Destaca-se, segundo dados do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), que durante

o período de estudo (1961 – 2010) foram evidenciados 16 (5 de forte intensidade) episódios de El Niño e 9 episódios de La Niña (3 de forte intensidade).

Análise de tendências

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através das análises de tendências e sua respectiva significância estatística, apresentada entre parênteses nos resultados, quando observada. Os dados de anomalias anuais da temperatura média do ar observados em Manaus (Figura 3a) mostram uma tendência de aquecimento de $0,74 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,22 \text{ }^\circ\text{C}$ (99%) para o período de estudo. Nota-se que o comportamento das anomalias apresenta certa variabilidade interanual, possivelmente associada a padrões atmosféricos observados sobre os oceanos Atlântico e Pacífico Tropical, como mencionado por Marengo (2005). Os resultados do teste sequencial para a temperatura média (Figura 3c) não mostram mudanças significativas no comportamento, com destaque para os anos de 1968 e 1997 onde o padrão observado mostra-se associado com a ocorrência de eventos de El Niño de escala moderada (1968) e forte (1997). Analisando as tendências por décadas, nota-se que a década entre 2001 até 2010 é a que apresenta a maior tendência de aquecimento ($0,63 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,21 \text{ }^\circ\text{C}$).

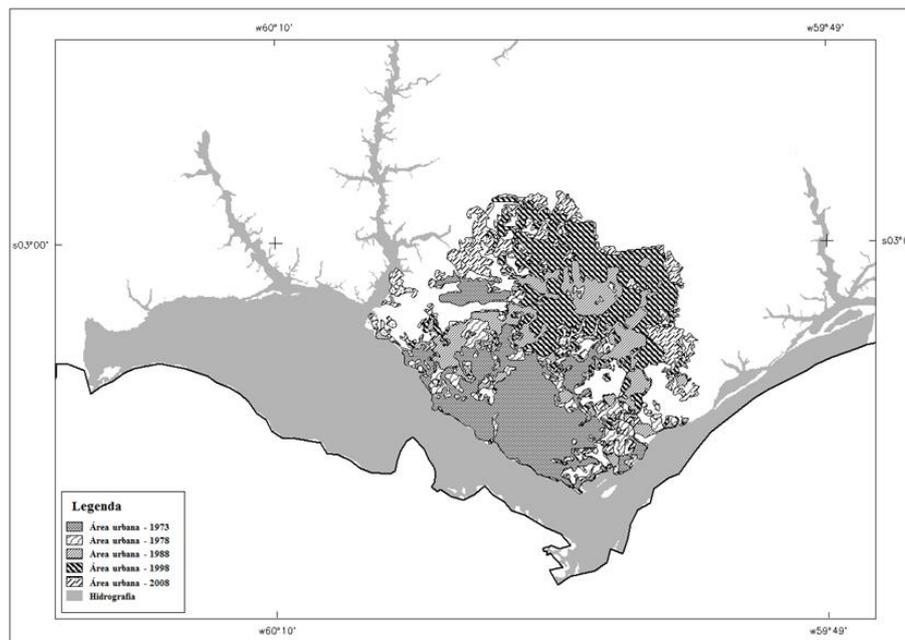


Figura 1. Mapeamento do crescimento da área urbana da cidade de Manaus, AM, entre os anos de 1973 e 2008.

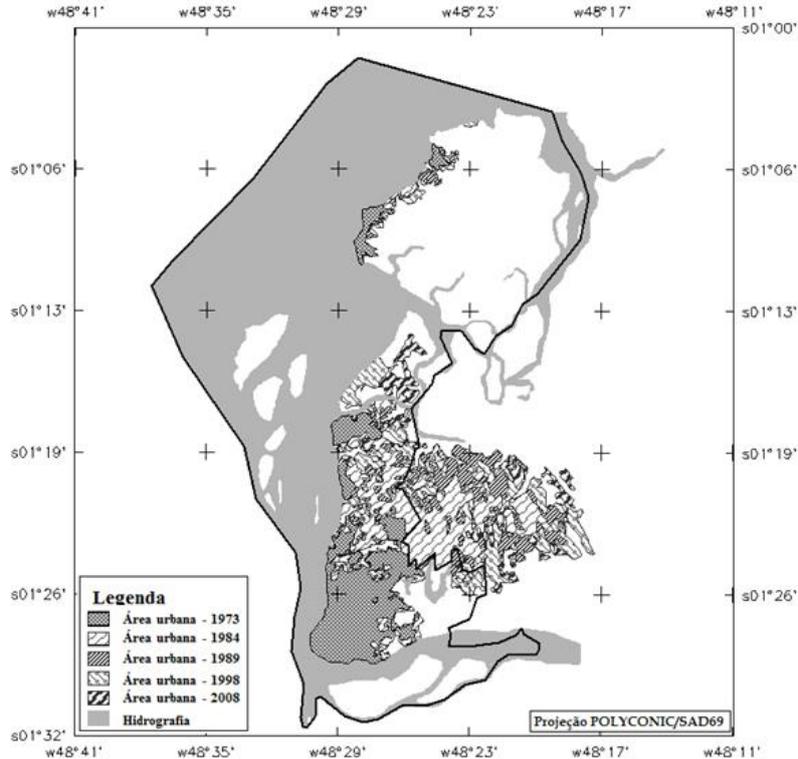


Figura 2. Mapeamento do crescimento da área urbana da cidade de Belém, PA, entre os anos de 1973 e 2008.

Em Belém (Figura 3b) observa-se uma tendência de aquecimento maior do que a observada em Manaus, com intensidade de $1,51 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,45 \text{ }^\circ\text{C}$ (99%), apresentando também certa variabilidade interanual. Analisando as tendências por décadas nota-se que 1991-2000 apresenta a maior tendência de aquecimento ($0,65 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,22 \text{ }^\circ\text{C}$) (95%), seguida por 2001-2010 ($0,46 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$) (95%). O teste sequencial (Figura 3d) não mostra mudanças significativas nos dados observados em Belém, onde a mudança no padrão em 1997 pode estar diretamente relacionada com eventos de El Niño.

A redução na atividade convectiva e conseqüentemente na precipitação sobre a Amazônica em anos de El Niño (Nobre et al., 2009) pode ser um dos fatores que contribuíram para o comportamento da temperatura em superfície observado e discutido anteriormente.

As análises de tendência para observações de temperatura máxima e mínima em Manaus mostram um aumento de $0,84 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ (99%) e de $0,61 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,18 \text{ }^\circ\text{C}$ (99%), respectivamente (Figuras 4a e 5a). Nota-se uma anomalia

extremamente negativa na temperatura mínima no período de 1999 e 2001, possivelmente relacionada com a ocorrência de La Niña moderado entre 1998 e 2001. Destaca-se que o comportamento das anomalias de temperatura mínima nas diferentes décadas apresentam um padrão distinto do observado para a temperatura máxima, com tendência positiva na década de 1961-1970, com valores de $0,92 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,31 \text{ }^\circ\text{C}$ (95%). Liebmann e Marengo (2001) salientaram que anomalias negativas de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico estão positivamente correlacionadas com tendência de aumento na precipitação sobre a região amazônica, o que de certa forma está diretamente associada o comportamento observado.

As mudanças no microclima de Manaus podem estar relacionadas com o crescimento urbano, uma vez que os resultados obtidos no teste sequencial de Mann-Kendall (Figuras 4c e 5c) não indicam nenhuma mudança abrupta de comportamento que justifique as tendências observadas.

Tabela 1. Valores climatológicos de temperatura média, máxima e mínima e de precipitação observados em Manaus e em Belém entre os anos de 1961 e 2010.

Manaus			Belém		
T. média (°C)			T. média (°C)		
<u>Anual</u>	26,82	± 0,92	<u>Anual</u>	26,23	± 0,76
<u>Seco</u>	27,33	± 0,55	<u>Seco</u>	26,47	± 0,70
<u>Chuvoso</u>	26,31	± 0,64	<u>Chuvoso</u>	25,96	± 0,74
T. máxima (°C)			T. máxima (°C)		
<u>Anual</u>	31,73	± 1,34	<u>Anual</u>	31,73	± 1,02
<u>Seco</u>	32,55	± 1,24	<u>Seco</u>	32,29	± 0,68
<u>Chuvoso</u>	30,9	± 0,83	<u>Chuvoso</u>	31,15	± 0,98
T. mínima (°C)			T. mínima (°C)		
<u>Anual</u>	23,27	± 0,74	<u>Anual</u>	22,47	± 0,76
<u>Seco</u>	23,35	± 0,80	<u>Seco</u>	22,24	± 0,76
<u>Chuvoso</u>	23,19	± 0,66	<u>Chuvoso</u>	22,66	± 0,70
Precipitação (mm)			Precipitação (mm)		
<u>Anual</u>	2256,29	± 126,25	<u>Anual</u>	2809,28	± 146,43
<u>Seco</u>			<u>Seco</u>		
média	99,26	± 71,56	média	139,08	± 60,40
acum.	593,59		acum.	789,97	
<u>Chuvoso</u>			<u>Chuvoso</u>		
média	278,48	± 103,57	média	360,59	± 121,71
acum.	1648,61		acum.	2019,31	

Os dados de temperaturas máxima e mínima em Belém mostram uma tendência de aquecimento de $0,93\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (99%) e de $1,57\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ (99%), respectivamente (Figuras 4b e 5b). Neste caso, assim como em Manaus, os efeitos da urbanização podem ser relevantes, uma vez que o teste sequencial (Figura 4d e 5d) não mostrou padrão que evidencie uma característica de mudança abrupta no comportamento das curvas que suporte as tendências observadas. Nota-se que em Belém, tanto para a temperatura máxima quanto para a mínima, existe uma forte tendência de aquecimento nas duas últimas décadas de $0,53\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (99%) na década de 1991-2000 e de $0,66\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (99%) na década de 2001-2010.

Oliveira et al. (2006) salientou que nos próximos 20 ou 30 anos existiria uma tendência negativa nas temperaturas, visto que desde 1999 estava-se em uma fase fria da Oscilação Decenal do Pacífico (ODP). Os resultados do presente estudo mostram que entre 2001 e 2010 houve uma tendência positiva para as temperaturas média e mínima em Manaus e Belém, indicando que, possivelmente, o processo de urbanização,

diretamente relacionado com o fenômeno ICU e seus efeitos, apresenta grande influência sobre o microclima local.

Uma intensa anomalia positiva ficou evidente no ano de 2005 em Manaus, ano em que foi observada uma das maiores secas da história na região amazônica (Marengo et. al, 2008). Ainda segundo Marengo et al. (2008) esta seca esteve diretamente relacionada com anomalias positivas de TSM na região norte equatorial, enfraquecimento dos ventos alísios de nordeste e enfraquecimento dos movimentos ascendentes sobre a porção sul da região amazônica, resultando em baixa atividade convectiva, alterando de forma significativa o balanço de energia em superfície.

Analisando as tendências de precipitação média anual em Manaus nota-se uma tendência de diminuição de $-42,86\text{ mm} \pm 12,75\text{ mm}$ (Figura 6a); entretanto, para as duas últimas décadas, 1991-2000 e 2001-2010, observou-se uma tendência de aumento na precipitação de $359,91\text{ mm} \pm 121,07\text{ mm}$ (90%) e de $671,45\text{ mm} \pm 225,88\text{ mm}$ (90%), respectivamente. Em

Belém, observou-se uma tendência de aumento na precipitação, com um valor positivo de 426,69 mm \pm 126,94 mm (95%) (Figura 6b). Diferente do observado para Manaus, quando analisada a variabilidade decenal, a precipitação na década de 1991-2000 apresentou tendência positiva, de 301,66 mm \pm 101,5 mm, enquanto na década de 2001-2010 houve tendência de queda, com valor de -58,77 mm \pm 19,80 mm. Quando analisados os

resultados do teste sequencial para a precipitação média anual em Manaus e Belém (Figuras 6c e 6d), nota-se que nenhum padrão relacionado com alguma mudança abrupta justifica as tendências observadas.

Assim sendo, pode-se concluir que possivelmente o comportamento das variáveis analisadas esteja mais

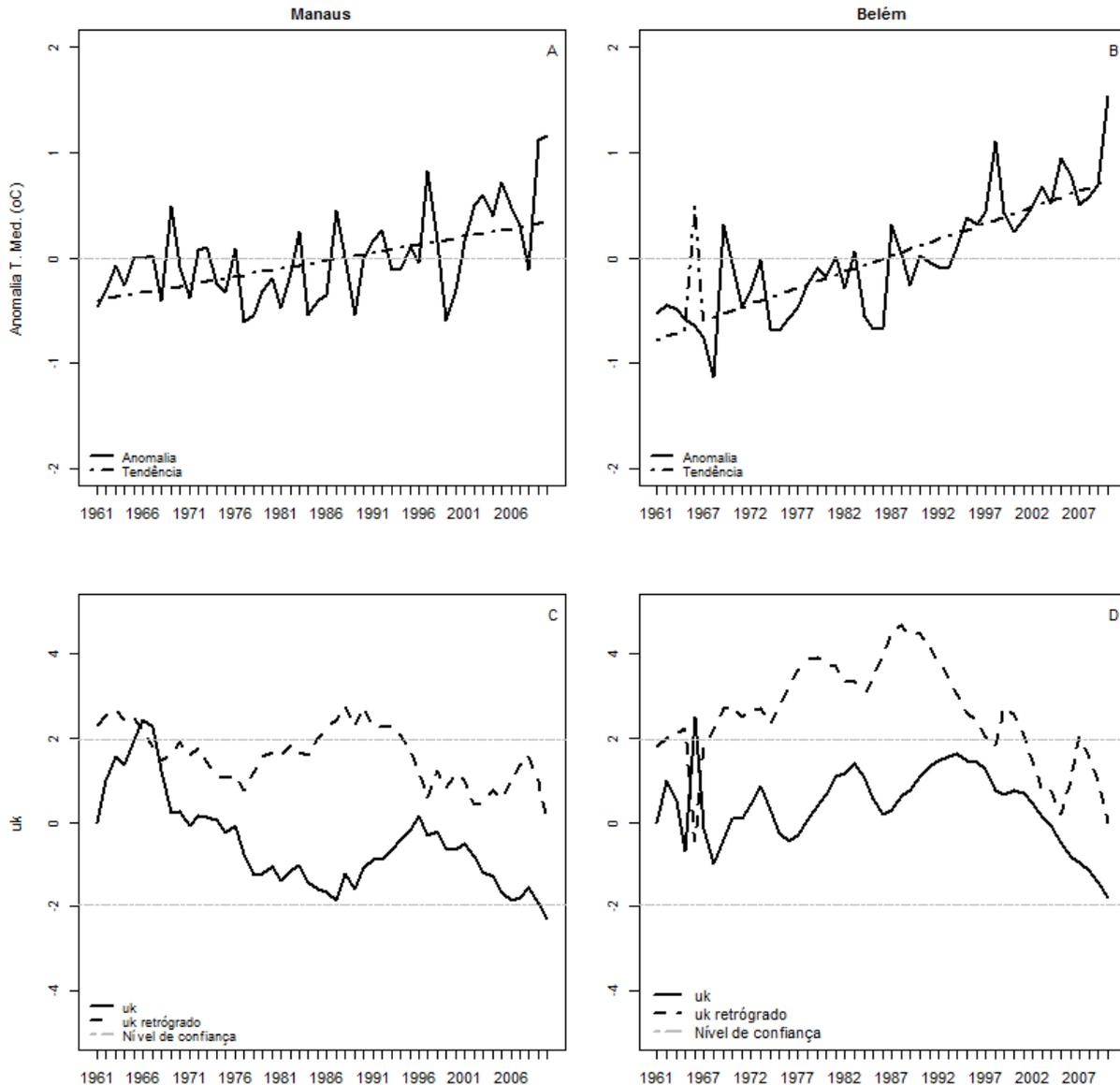


Figura 3. (a) e (b) Anomalias e tendências observadas, e (c) e (d) valores baseados no teste sequencial de Mann-Kendall para a variável temperatura média em Manaus e Belém entre os anos de 1961 e 2010.

associado com a variabilidade climática como, por exemplo, eventos de El Niño, do que com mudanças climáticas globais e regionais. Outrossim, as tendências de aquecimento e de mudanças nas taxas de precipitação observadas podem estar diretamente relacionadas com o

crescimento urbano, evidenciando assim o efeito das ICUs das cidades de Manaus e Belém sobre seus microclimas. Estudos indicam que a presença de áreas urbanas apresenta grande influência sobre o início e intensidade da atividade convectiva e consequente precipitação, suportando os

resultados encontrados (Rozoff et al., 2003; Shepherd, 2005; Guo et al., 2006; Han e Baik, 2008; Zhong and Yang, 2015).

Observando as anomalias de TSM e relacionando-as com os valores de tendências encontrados para as variáveis analisadas, nota-se, principalmente nas duas últimas décadas, que existe um padrão oposto no comportamento das anomalias de TSM e tendências (Figura 7). Para a década 1991-2000 nota-se um padrão anômalo negativo (95%), indicando assim que as águas do Pacífico tropical estão mais quentes que o normal. Desta forma, poderíamos esperar que a atividade convectiva (precipitação) sobre a região amazônica estivesse abaixo do normal, mas os dados observados para as cidades de Manaus e Belém mostram uma anomalia positiva. Para a década 2001-2010 observa-se um padrão de aquecimento do Atlântico Norte (95%), o que, de certa forma, como observado por Marengo et al. (2008), influencia significativamente a precipitação sobre a região amazônica, levando a uma diminuição nas taxas observadas, principalmente sobre as porções sul e central. Considerando que o aumento (diminuição) das taxas de precipitação está diretamente relacionado com a maior (menor) cobertura de nuvens e consequentes diminuição (aumento) da radiação solar incidente e mudanças no BES, espera-se que, além de outros fatores, com o aumento da precipitação tenha-se uma diminuição da temperatura observada em superfície. Os resultados apresentados mostram que as anomalias de temperatura e de precipitação observadas em Manaus e em Belém não são apenas influências das anomalias de TSM observadas tanto no Oceano Pacífico tropical quanto no Atlântico tropical, mas também podem estar associadas com processos de mudanças nos usos da terra, como desflorestamento e crescimento de áreas urbanas. Estes resultados são coerentes com os observados por Marengo e Camargo (2008), que analisando tendências de temperatura para a região Sul do Brasil, concluíram que não apenas influências remotas como anomalias de TSM influenciam as tendências observadas, mas também mudanças nos usos da terra como, por exemplo, urbanização.

Análise de extremos

As análises dos índices de extremos mostraram-se consistentes com a suposição de uma mudança no microclima das cidades de Manaus e Belém. Ressalta-se que os resultados discutidos a seguir apresentam significância estatística superior a 95%. A Tabela 2 mostra que Manaus apresenta um aumento na temperatura dos dias mais quentes do ano (+0,95 °C), concordando com os resultados das anomalias anuais apresentados anteriormente. Em contraste, Manaus apresenta uma diminuição na quantidade de dias quentes (-0,85%), dias frios (-0,32%) e de noites quentes (-0,67%). Durante o período chuvoso, há um aumento na temperatura dos dias mais quentes (+0,70 °C), assim como um aumento na diferença entre as temperaturas máxima e mínima observadas anualmente (+1,21 °C). Para a estação seca, ocorre diminuição tanto no número de dias quentes (-1,28%) como no número de noites quentes (-1%) e um aumento no número de noites frias (+0,87%).

Em Belém a Tabela 3 mostra um aumento na temperatura máxima diária (+1,23 °C), um aumento na quantidade de dias quentes (+1,39%), na temperatura das noites mais frias (+1,45 °C) e na quantidade de noites frias (+2,81%) e noites quentes (+1,68%). Quando analisados o padrão destes índices para as estações seca e chuvosa, nota-se o aumento nas mesmas variáveis discutidas anteriormente. Vale salientar também que a intensidade das tendências observadas para Belém são maiores e mais persistentes (persistência sazonal) quando comparados com o observado para Manaus.

A discordância entre os valores obtidos no presente trabalho com aqueles observados por Vincent et al (2005) pode estar relacionada com: (i) o fato de que aqueles autores encontraram que o aumento (diminuição) de noites quentes (frias) esteve mais presente nas estações localizadas junto a costa leste e oeste da América do Sul; (ii) o fato de que encontraram pouca tendência significativa para os índices baseados nas observações de temperatura máxima.

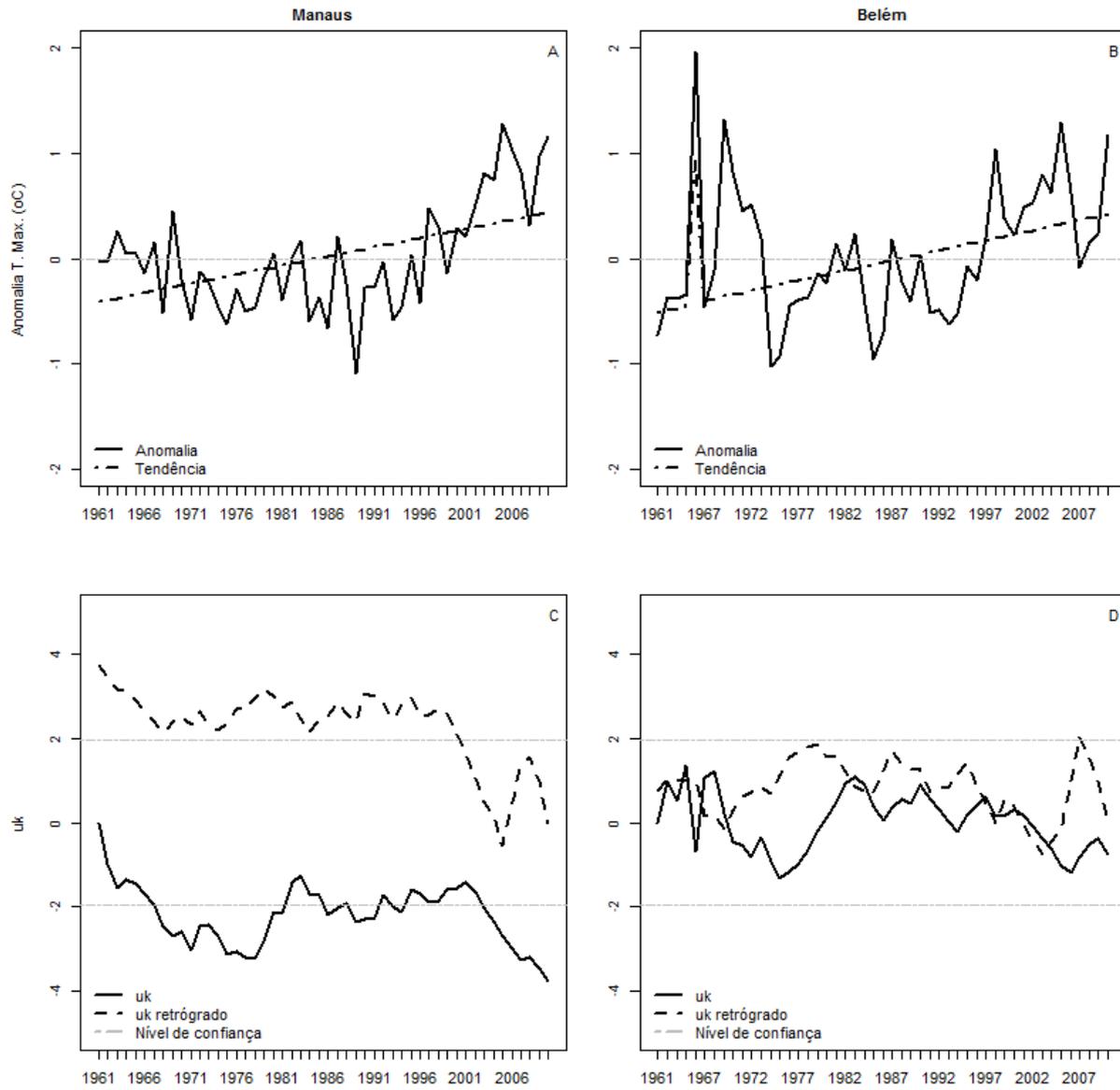


Figura 4. (a) e (b) Anomalias e tendências observadas, e (c) e (d) valores baseados no teste sequencial de Mann-Kendall para a variável temperatura máxima em Manaus e Belém entre os anos de 1961 e 2010.

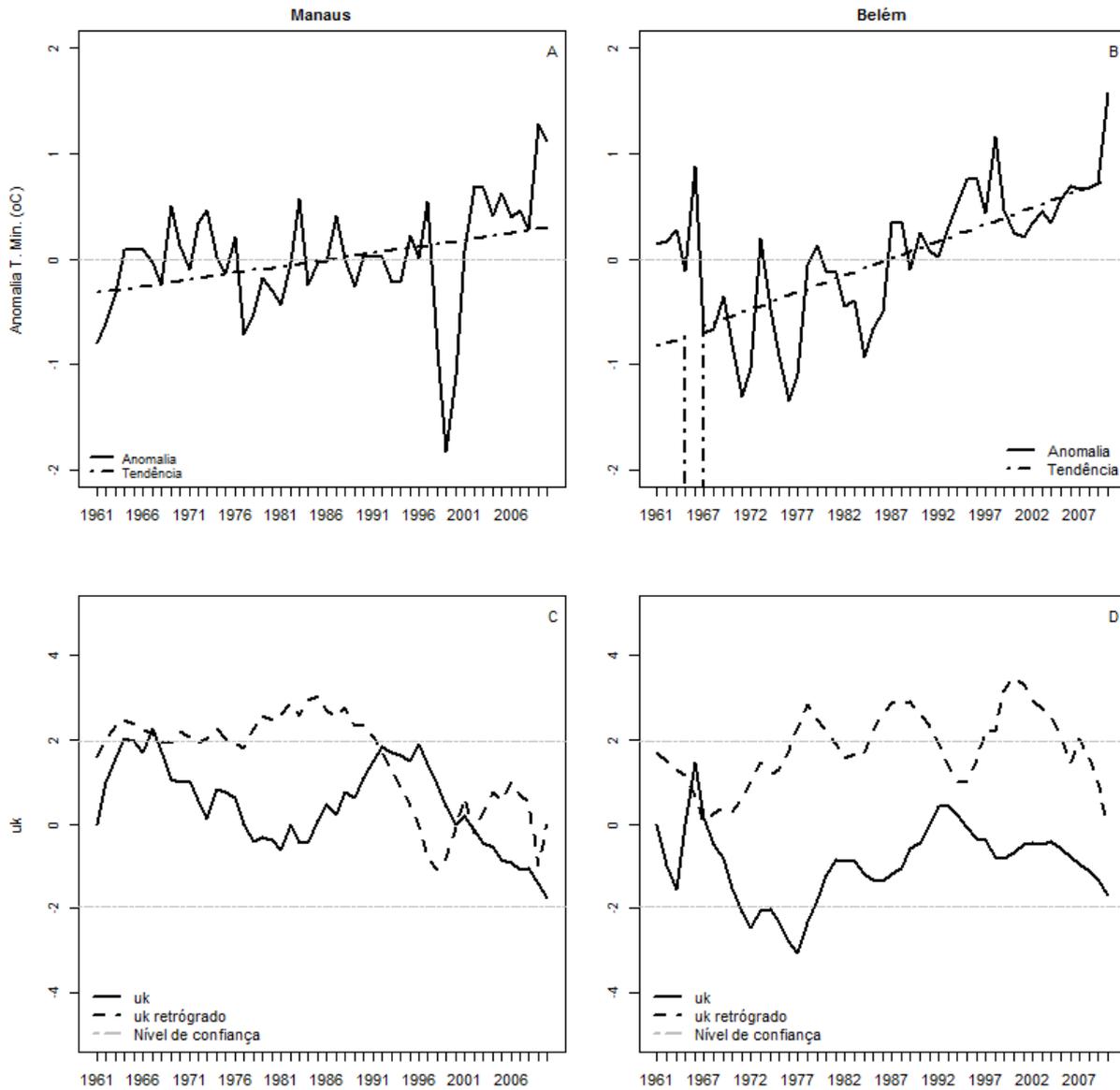


Figura 5. (a) e (b) Anomalias e tendências observadas, e (c) e (d) valores baseados no teste sequencial de Mann-Kendall para a variável temperatura mínima em Manaus e Belém entre os anos de 1961 e 2010.

Os resultados referentes ao aumento da temperatura dos dias mais quentes podem ter direta relação com o aumento da área urbana e mudanças no BES, influenciando de forma direta o microclima local. Outro índice que possivelmente é afetado pelo processo de urbanização é a diminuição do número de dias

frios, possivelmente associado ao aquecimento urbano diurno, associado à formação da ICU de Manaus, e a diminuição de noites frias, que pode estar relacionada com a liberação de calor por fontes antropogênicas e também à capacidade térmica da superfície urbana, ambos os fatores também influenciando o BES.

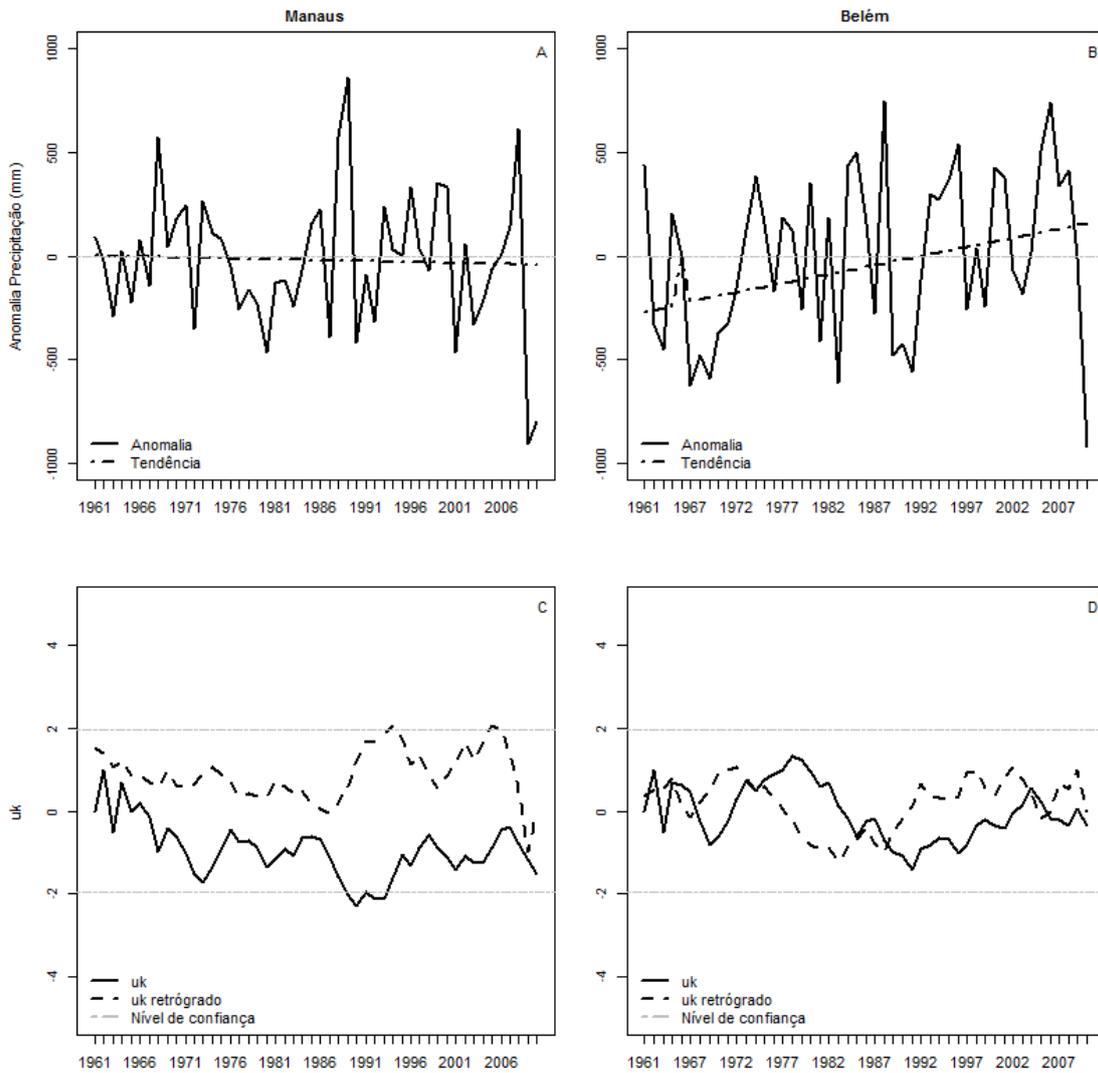


Figura 6. (a) e (b) Anomalias e tendências observadas, e (c) e (d) valores baseados no teste sequencial de Mann-Kendall para a variável precipitação em Manaus e Belém entre os anos de 1961 e 2010.

Efeitos da urbanização

Seguindo a metodologia proposta por Kalnay e Cai (2003) foram comparadas as anomalias dos conjuntos de dados NNR, e observados de Manaus e Belém, com o objetivo de estimar as possíveis influências da urbanização sobre o microclima local.

Em Manaus a correlação entre os dados de temperatura média diária observada e do conjunto NNR foi de 0,54 para todo o período (1961-2010) e de 0,62 para o período de 1981-2010. Vale salientar que a partir de 1979 dados obtidos de satélite foram incluídos nos conjuntos de

reanálises, o que sensivelmente melhorou a representação da atmosfera. Os dados de temperatura para Belém obtidos através do conjunto NNR mostram melhor correlação, com valores de 0,64 (0,79) para o período de 1961-2010 (1981-2010). Ressalta-se que os valores de correlação para os dados NNR de temperaturas máxima e mínima para as duas cidades foi inferior a 0,5 tanto para o período de 1961-2010 quanto para 1981-2010.

Tabela 2. Valores dos índices encontrados para a cidade de Manaus entre 1961 e 2010.

	ANUAL	1961-2010	CHUVOSO	1961-2010	SECO	1961-2010
Dia mais quente (°C)	38,30	+0,95	37,20	+0,70	38,30	+0,93
Dias quentes	8,55	-0,85	8,80	-0,17	8,30	-1,28
Dias frios	9,43	-0,32	9,46	0,00	9,40	0,00
Noite mais fria (°C)	12,10	0,00	14,30	0,00	12,10	+0,25
Noites frias	8,53	-0,84	8,44	-0,13	8,62	+0,87
Noites quentes	8,38	-0,67	8,31	0,00	8,45	-1,00
Variação diurna de temperatura (DTR) (°C)	8,46	+0,62	7,69	+0,41	9,22	+0,08
Variação extrema de DTR (°C)	21,20	+0,78	18,90	+1,21	21,20	+0,58

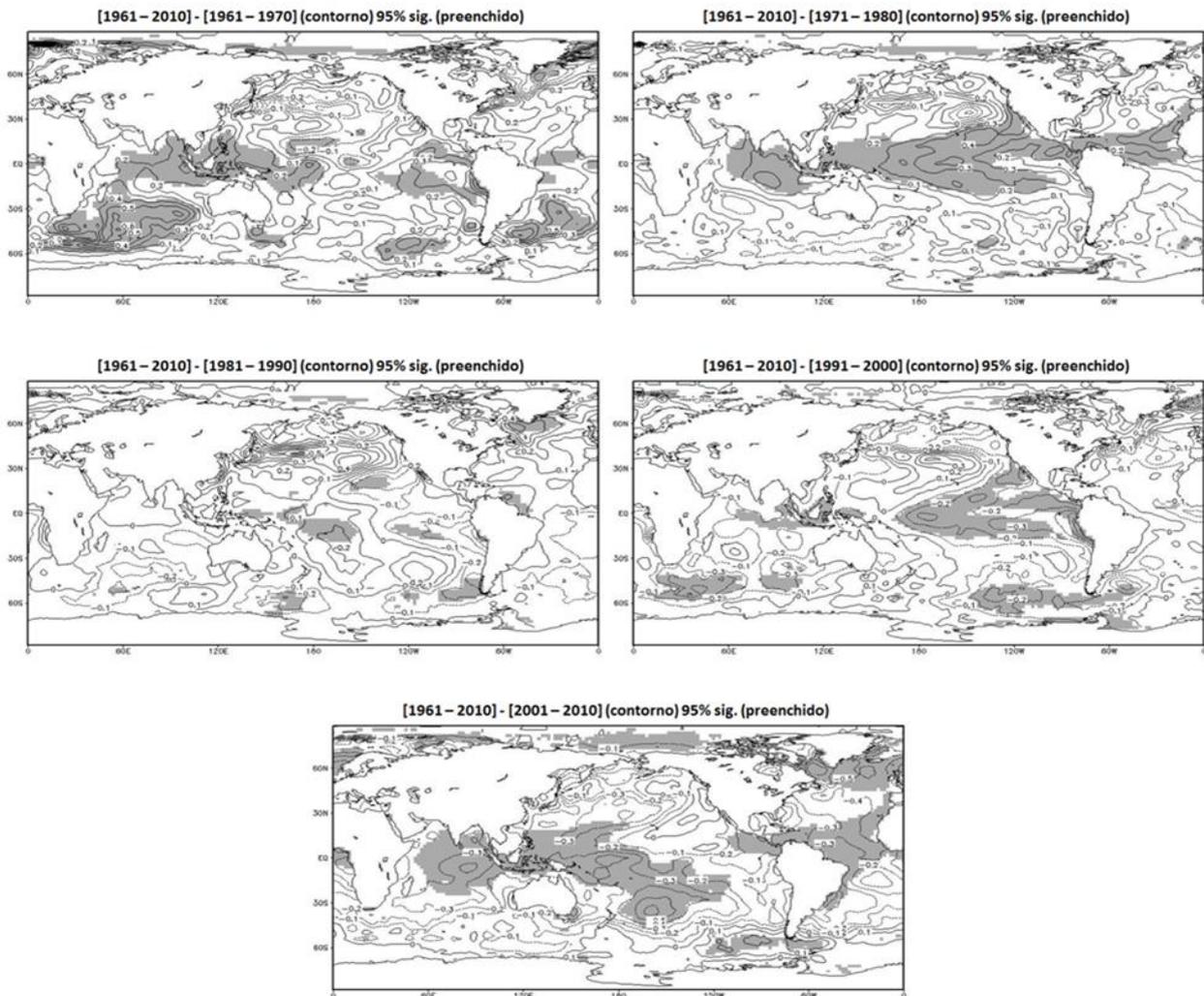


Figura 7. Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (contorno) e sua significância estatística (sombreado) para o período de (a) 1961-1970, (b) 1971-1980, (c) 1981-1990, (d) 1991-2000 e (e) 2001-2010.

Os resultados obtidos para os dados de temperatura máxima mostram uma diferença de +3,21 °C (99%) entre os dados observados e o conjunto de reanálises. Assim sendo, pode-se atribuir que esta diferença está relacionada, além de outros fatores, com a urbanização e outros processos de mudanças nos usos da terra sobre a região de Manaus.

Os processos de urbanização e mudanças nos usos da terra em Belém também se apresentam como um dos fatores responsáveis pela mudança de seu microclima, visto que a diferença calculada entre as reanálises e os dados observados para todo o período analisado foi de +1,15 °C (99%) (Figura 8b). Para a variável temperatura máxima (Figura 8d), a maior diferença é observada no período de 1991-2000

(99%), e para a temperatura mínima (Figura 8e), a maior diferença é observada na última década analisada (99%), mostrando que estas variáveis não são sensíveis às mudanças nos usos da terra. Nas Figuras 8a,c,e também se pode observar uma tendência de elevação das temperaturas média, máxima e mínima, estimadas pelo conjunto NNR em Manaus. Analisando a tendência da diferença média diária para o período de 1961-2010 entre os dados NNR e os observados obteve-se um valor de +2,09 °C (99%). As análises realizadas para o conjunto de dados de temperaturas mínima e máxima (Figuras 8c e 8e) mostram uma tendência de elevação nos valores, indicando que existe uma tendência de aquecimento em Manaus, também observada no conjunto de dados NNR.

Tabela 3. Valores dos índices encontrados para a cidade de Belém entre 1961 e 2010.

	ANUAL	1961- 2010	CHUVOSO	1961- 2010	SECO	1961-2010
Dia mais quente (°C)	37,30	+1,23	37,30	+0,63	36,70	+1,22
Dias quentes	7,80	+1,39	7,97	+1,31	7,63	+1,34
Dias frios	8,62	+1,23	9,16	+0,59	8,08	+1,71
Noite mais fria (°C)	18,50	+1,45	18,80	+1,83	18,50	+1,34
Noites frias	7,52	+2,81	7,54	+3,04	7,51	+3,43
Noites quentes	7,64	+1,68	7,50	+2,52	7,78	+1,00
Variação diurna de temperatura (DTR) (°C)	9,27	-0,39	8,50	-0,33	10,04	-0,63
Variação extrema de DTR (°C)	17,50	-0,47	17,50	-1,34	15,80	-0,32

Discussão

De modo geral, o crescimento populacional das cidades avaliadas apresentou relação direta com o processo de urbanização nos últimos 30 anos, embora o surgimento de novas cidades e o incremento de aumento de uma região metropolitana, como no caso de Belém, também foram fatores que influenciaram o intenso crescimento da área urbana. Vale salientar também que nem todo o processo de urbanização observado nestas duas cidades ocorreu de forma ordenada e respeitando áreas de risco. Portanto, principalmente áreas consideradas de risco e pouco desenvolvidas merecem melhor atenção, pois os efeitos das mudanças nos microclimas observados para as cidades em estudo podem elevar os riscos já existentes.

As análises realizadas mostram que os registros de temperatura entre 1961-2010 foram afetados por mudanças no microclima local, principalmente durante as duas últimas décadas, período este que foi caracterizado por intensa urbanização. O intenso crescimento urbano resultou em tendências positivas da temperatura do ar em superfície, como também influenciaram sistemas precipitantes sobre a área de estudo. De certa forma não se pode negar que existe certa variabilidade interanual e que esta tenha afetado os valores de temperatura, mas também se deve considerar que a intensa urbanização foi um dos fatores, ou talvez o principal fator, que contribuiu para elevar as temperaturas das cidades de Manaus e Belém nos últimos 50 anos, principalmente durante as últimas décadas do período analisado.

Algumas evidências das mudanças nos microclimas das cidades ficam claras quando se constata que há uma mudança significativa nos extremos, como, por exemplo, a temperatura do dia mais quente, número de noites frias e número de noites quentes. Mesmo que a influência direta do crescimento urbano observado não fique muito clara, não se pode descartar a influência das mudanças nos usos da terra e o processo de urbanização como fatores responsáveis pelas mudanças observadas, uma vez que a estimativa relacionada a outros fatores também não fica evidente.

A análise de registros históricos de dados observacionais evidencia o papel da urbanização sobre o aquecimento urbano. Foi possível observar que o crescimento da área urbana e aumento da população apresentam relação direta com modificações no microclima local das cidades de Manaus e Belém. Salienta-se, assim, que políticas públicas que tenham como objetivo nortear o crescimento organizado de áreas urbanas e o conforto da população são necessárias para que os efeitos das mudanças climáticas não sejam potencializados por efeitos já existentes no microclima local relacionados com o processo de urbanização.

Conclusões

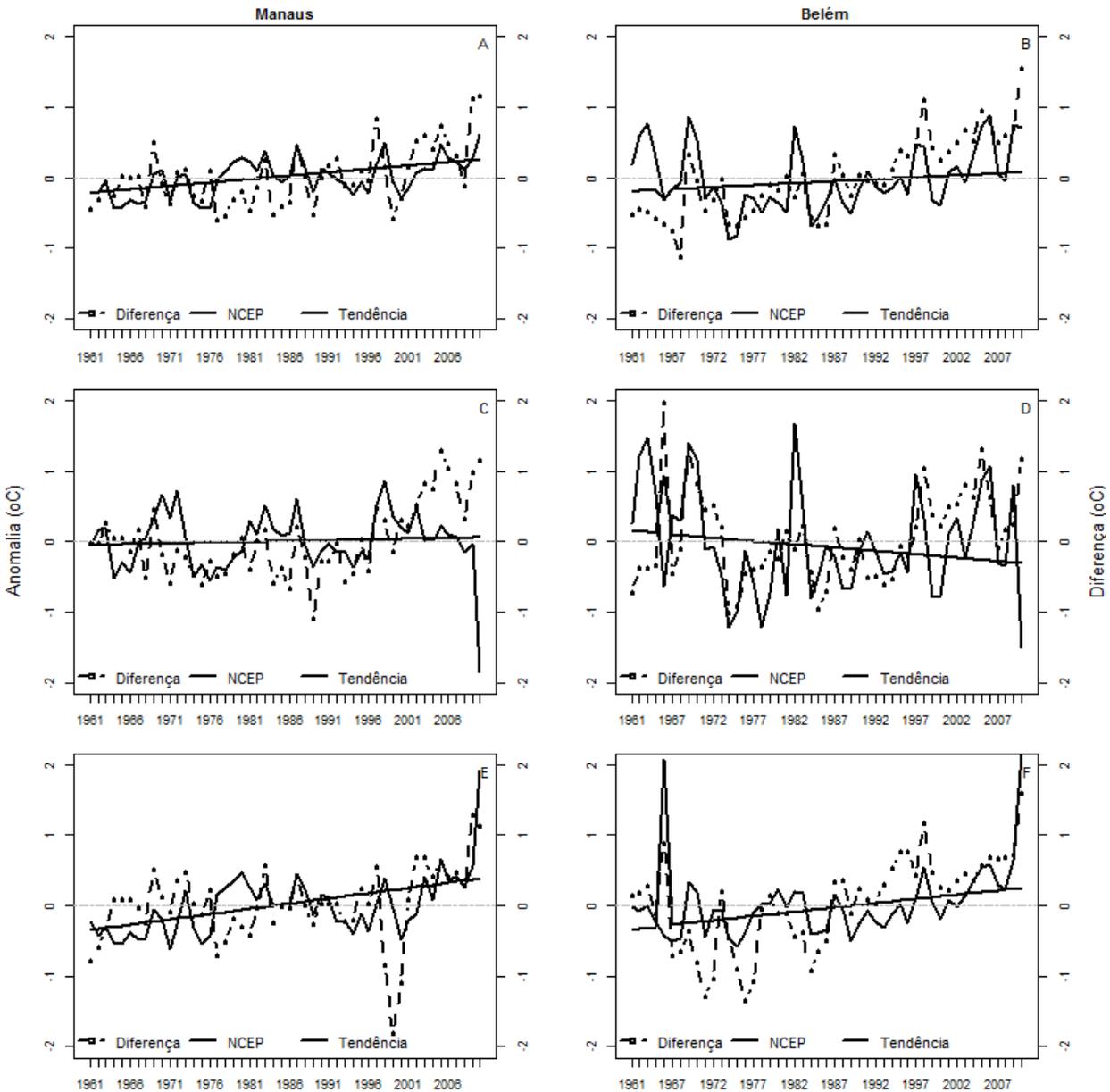


Figura 8. Comparação entre os dados NNR e as observações de superfície para o período de 1961 a 2010 para temperatura (a) média, (c) máxima e (e) mínima em Manaus, e (b) média, (d) máxima e (f) mínima em Belém.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP-Ref. N° 2007/07260-7) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelos dados disponibilizados.

Referências

- Betts, A. K., 2009. Understanding land-surface-atmosphere coupling in observations and models. In: MERRA Workshop, AMS Conference, 2009. Proceedings of MERRA Workshop. Phoenix: AMS.
- Bornstein, R., Lin, Q., 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. *Atmosphere Environment* 34: 507-516.
- Costa, A. C. L., 2001. Variações sazonais a ilha de calor urbana na cidade de Belém-PA. In: IX Congresso Latina Americano e Ibérico de Meteorologia. Anais do IX Congresso Latina Americano e Ibérico de Meteorologia.
- Freitas, E.D., 2003. Circulações Locais em São Paulo e sua Influência na Dispersão de Poluentes. Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 176p.
- Goossens, C., 1983. Etude de l'homogeneité et de la stabilité des séries climatiques. Louvain-la-Neuve. Institut d'Astronomie et Géophysique, G. Lemaitre, Université Catholique de Louvain, 40 p.
- Goossens, C, Berger, A., 1986. Annual and seasonal climatic variations over the Northern Hemisphere and Europe during the last century. *Annales Geophysicae* 4: 385-399.
- Grimmond, C. S. B., Oke, T. R., Steyn, D. G., 1986. Urban water balance. 1. A model for daily totals. *Water Resource Research* 22: 1397-1403.
- Grimmond, C. S. B, Oke, T. R., 1986. Urban water balance. 2.results from a suburb of Vancouver, British Columbia. *Water Resource Research* 22: 1404-1412.
- Grimmond, C. S. B., King, T. S., Roth, M., Oke, T. R., 1998. Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. *Boundary-Layer Meteorology* 89: 1-24.
- Han, J., Baik, J., 2008. A Theoretical and Numerical Study of Urban Heat Island-Induced Circulation and Convection. *Journal of Atmospheric Sciences* 65: 1859-1877.
- Kalnay, E., And Coauthors, 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77: 437-471.
- Kalnay, E., Cai, M., 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* 423: 528-531.
- Kayano, M. T., 1979. Um estudo climatológico e sinótico utilizando dados de radiossondagem (1968-1976) de Manaus e Belém. Dissertação de mestrado em meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas espaciais. 112 pp.
- Laurance, W. F., Cochrane, M. A., Bergen, S., Fearnside, P. M. P., Delamônica, C. Barber, S. D., Fernandes, T., 2001. The Future of the Brazilian Amazon. *Science* 291, 438-439.
- Liebmann, B., Marengo, J.A., 2001. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *J. Climate* 14, 4308-4318.
- Manley, G., 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 84, 70-72.
- Marengo, J. A., 2005. The characteristics and variability of rainfall across the Amazon basin: Spatial and temporal variability. *Climate Dynamics* 24, 11-22.
- Marengo, J. A., Nobre, C. A., Tomasella, J., Oyama, M. D., Sampaio De Oliveira, G., De Oliveira, R., Brown, I. F., 2008. The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate* 21, 495-516.
- Marengo, J. A., Camargo, C. C., 2008. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. *International Journal of climatology* 28, 893-904.
- Masson, V., 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 35-45.
- Molion, L.C.B., 1991. Climate Variability and its Effects on Amazonian Hydrology. In: BRAGA Jr. BPF & FERNANDEZ-JAUREGUI CA (Ed.). *Water Management of the Amazon basin, UNESCO/ABRH*, 261-274.
- Montávez, J. P., Rodríguez, A., Jiménez, J. I., 2000. A study of the Urban Heat Island of Granada. *International Journal of Climatology* 20, 899-911.
- Nepstad, D. C., Carvalho, G., Barros, A.C., Alencar, A., Capobianco, J. P., Bishop, J., Moutinho, P., Lefebvre, P., Silva, U. L., Prins, Jr. E., 2001. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests.

- Forest Ecology and Management 154, 395-407.
- Nobre, P., Malagutti, M., Urbano, D. F., De Almeida, R. A. F., Giarolla, E., 2009. Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. *J. Climate* 22: 5686–5697.
- Nogueira, A.C.F., Sanson, F., Pessoa, K., 2007. A expansão urbana e demográfica da cidade de Manaus e seus impactos ambientais. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais dos XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, 5427-5434.
- Obregon, G.O., Nobre, C.A., 2003. Rainfall trends in Brazil. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84,1008-1009.
- Oke, T.R., 1982. The Energetic Basis of The Urban Heat-Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, 1–24.
- Oke, T. R., 1973. City size and the urban heat island. *Atmos Environ* 7, 769–779
- Oliveira, F.N.M., Araújo, R.L.C., Carvalho, J.S., Silva, C.L., 2006. Inferência de Mudanças Microclimáticas na Região de Manaus (AM) Usando dados Geotérmicos e Meteorológicos. *Revista Brasileira de Geofísica* 24, 169-187.
- Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., Foley, J.A., 2005. Impact of Regional Climate Change on Human Health, *Nature* 438, 310-317.
- Rao, V. B., Hada, K., 1990. Características of Rainfall over Brazil: Annual variation and Connections with the Southern Oscillation, *Theoretical Applied Climatology* 42, 81-91.
- Roth, M., 2000. Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 126, 941-990.
- Rozoff, C.M., Cotton, W.R., Adegoke, J.O., 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, Land Use Impacts on Thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology* 42, 716-738.
- Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379-1389.
- Silva Dias, M. A. F., Rutledge, S., Kabat, P., Silva Dias, P. L., Nobre, C., Fisch, G., Dolman, A. J., Zipser, E., Garstang, M., Manzi, A., Fuentes, J. D., Rocha, H., Marengo, J., Planat-Fattori, A., Sá, L., Alvalá, R. C. S., Andreae, M. O., Artaxo, P., Gielow, R., Gatti, L. V., 2002. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. *Journal of Geophysical Research* 107, 8072-8092.
- Souza, D. O., Alvalá, R. C.S., 2014. Observational evidence of the urban heat island of Manaus City, Brazil. *Meteorological Applications* 21, 186–193.
- Vincent, L. A., And Coauthors., 2005. Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960–2000. *J. Climate* 18, 5011–5023.
- Zhong, S., Yang, X.Q., 2015. Ensemble simulations of the urban effect on a summer rainfall event in the Great Beijing Metropolitan Area. *Atmospheric Research* 153, 318-334.