

A EXPANSÃO URBANA E A EVOLUÇÃO DO MICROLIMA DE MANAUS

Diego Oliveira de Souza¹, Regina Célia dos Santos Alvalá¹

¹ Centro de Ciências do Sistema Terrestre. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP, Brasil. dsouza@cptec.inpe.br

RESUMO: O processo de urbanização possui influência direta e indireta sobre diversas variáveis meteorológicas, modificando de forma considerável o clima de determinada área urbana. Considerando o intenso crescimento da cidade de Manaus, AM, este trabalho evidencia o papel da expansão urbana observada na referida cidade sobre tendências de modificações no microclima local. Os resultados mostram que existem tendências positivas para variáveis como temperatura média, máxima e mínima do ar em Manaus, assim como tendência de aumento da temperatura do dia mais quente e diminuição do número de noites frias. Análises dos dados observacionais e de reanálises mostram que o processo de urbanização possui influência direta nas tendências positivas observadas. Sendo assim, os resultados apresentados mostraram que o crescimento da área urbana de Manaus apresentou influência direta sobre o microclima local.

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização é um fenômeno observado nos últimos anos em diversos locais do mundo. Tal processo possui influência direta sobre o microclima local e, conseqüentemente, sobre o conforto térmico para a população. A mudança nas características da superfície, com a troca de vegetação e áreas verdes por construções e pavimentação, mudam o albedo da superfície e também o balanço de energia, alterando assim o comportamento de diversas variáveis meteorológicas, tais como temperatura e umidade.

O fenômeno mais conhecido relacionado com a urbanização é a formação da chamada Ilha de Calor Urbana, a qual pode ser definida como o aquecimento diferencial entre a área urbana e regiões adjacentes a esta, onde a área mais urbanizada possui maior temperatura e algumas vezes é mais seca que a sua vizinhança. O conseqüente aquecimento diferencial descrito anteriormente pode apresentar influência nas circulações atmosféricas locais e também ser responsável por intensificação de tempestades .

Estudos relacionados com mudanças nos usos da terra mostram que o processo de urbanização não está apenas concentrado em regiões de grande densidade populacional, mas está acontecendo em praticamente todo o país. Nos últimos anos, a região amazônica passou por um processo de perda de sua área florestada, principalmente devido a queimadas e

também para a criação de áreas de pastagem e agricultura, não descartando o crescimento das áreas urbanas já existentes e a criação de novos municípios.

A cidade de Manaus, AM, é um exemplo de município que teve crescimento urbano intenso, caracterizando-se hoje como a 8ª maior cidade do Brasil, com uma população de 1.802.000 habitantes. A cidade está inserida na maior floresta tropical do mundo, apresentando características únicas com relação à sua localização. Procurando entender como o processo de urbanização observado em Manaus pode ter modificado o microclima local, neste trabalho serão analisados dados históricos para um período de 50 anos, identificando possíveis modificações e tendências em determinadas variáveis meteorológicas.

2. DADOS E METODOLOGIA

Para a análise do crescimento e mapeamento da área urbana da cidade de Manaus foram feitas interpretações de imagens do sensor TM do satélite Landsat 5, com resolução de 30 metros, a partir do ano de 1973. O processo de mapeamento das áreas urbanas foi realizado através de classificação visual, sendo mapeado primeiramente o ano de 1973 e, posteriormente, os anos seguintes, sempre utilizando como base o mapeamento da data anterior.

A influência do processo de urbanização sobre o microclima local foi analisada através de dados observacionais de temperatura média, máxima e mínima, e precipitação, para o período de 1961 a 2010 coletados na estação do INMET. Também foram utilizados para a análise dos efeitos da urbanização sobre o microclima local, seguindo metodologia proposta por Kalnay e Cai (2003), dados de reanálises do NCEP-NCAR (NNR) de 50 anos com resolução espacial de 2.5°. Considerando o espaçamento horizontal dos dados de reanálises e que o ponto correspondente à área urbana não será exatamente a localização da cidade de Manaus, foi realizada uma média de 9 pontos próximos à mancha urbana, ponderados pela distância de cada ponto em relação à cidade.

A tendência foi calculada através de regressão linear, sendo que o cálculo da inclinação foi feito através do método não paramétrico da Curvatura Sen (Sen, 1968). A significância das tendências foi calculada através do teste seqüencial de Mann-Kendall (Goossens, 1983). A metodologia descrita anteriormente tem sido utilizada em outros estudos, como por exemplo por Montávez et al. (2000) e Obregon e Nobre (2003).

Complementando a análise das tendências de temperatura e precipitação observadas na cidade de Manaus, foi realizada uma análise dos extremos relacionados com os valores de temperatura diária observada para as duas cidades, seguindo a metodologia utilizada em Vicent et al. (2005). Para os resultados obtidos com relação aos extremos, também foram

calculadas as tendências através do método da curvatura Sen e sua significância através do teste de Mann-Kendall para todo o período de observação, assim como para os períodos seco e chuvoso.

3. RESULTADOS

As análises feitas a partir das imagens de satélite mostram que a cidade de Manaus cresceu predominantemente na direção norte e nordeste, cuja taxa média de expansão de sua área foi de aproximadamente $1,16 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$, sendo o ano de 1998 o que apresentou um grande crescimento da área urbana. Os resultados permitem observar que entre os anos de 1973 e 2008 a cidade de Manaus aumentou sua área em 153 km^2 .

O primeiro conjunto de dados observacionais permitiu que algumas características do clima da cidade de Manaus fossem investigadas. Os resultados apresentados concordam com valores anteriormente obtidos por Oliveira et al. (2006; 2008). Os valores de temperatura média também mostraram que o mês de outubro (março) é o mais quente (frio), sendo que as máximas (mínimas) temperaturas do ar são observadas durante o mês de setembro (julho). Outra característica associada com a temperatura do ar em Manaus indica que durante os meses de fevereiro e março (outubro) foram registrados os menores (maiores) valores de temperatura máxima (mínima). Rao e Hada (1987), entre outros, mostraram que as variações anuais na temperatura do ar em superfície são influenciadas pela variabilidade de mecanismos dinâmicos que geram convecção, formação de nuvens e chuva. Muitos destes mecanismos dinâmicos estão associados às fontes tropicais de calor latente. Fenômenos como El Niño/Oscilação Sul (ENOS) influenciam de forma direta a célula de Walker, suprimindo a atividade convectiva sobre a região amazônica e, assim, a formação de nuvens e convecção.

Os dados de anomalias anuais da temperatura média do ar observados em Manaus (Figura 1a) mostram uma tendência de aquecimento de $0,74^\circ\text{C} \pm 0,22^\circ\text{C}$ para o período de 1961 a 2010, com significância estatística de 99,9%. Kalnay e Cai (2003) ressaltaram que alterações no microclima de determinada região podem ser afetadas tanto por influências antropogênicas, como urbanização e outros tipos de mudanças no uso da terra, como também por efeito de gases estufa. Analisando os resultados obtidos pelo teste sequencial de Mann-Kendall para as tendências de temperatura média em Manaus, não se observa mudanças significativas no comportamento desta variável.

As análises de tendência em Manaus mostram que existe uma tendência de aquecimento de $0,84 \pm 0,25^\circ\text{C}$ e de $0,61 \pm 0,18^\circ\text{C}$ para a temperatura máxima e mínima respectivamente, com uma significância estatística estimada pelo teste de Mann-Kendall de 99% para as duas variáveis (Figura 1b e 1c). Estas análises de temperatura evidenciam que existe uma tendência

de mudança do microclima da cidade de Manaus nos últimos 50 anos. Esta mudança pode estar relacionada com o crescimento urbano, já que quando analisado o teste sequencial de Mann-Kendall para estas duas variáveis, como realizado para a temperatura média, este não apresenta nenhuma mudança abrupta de comportamento que justifique as tendências observadas.

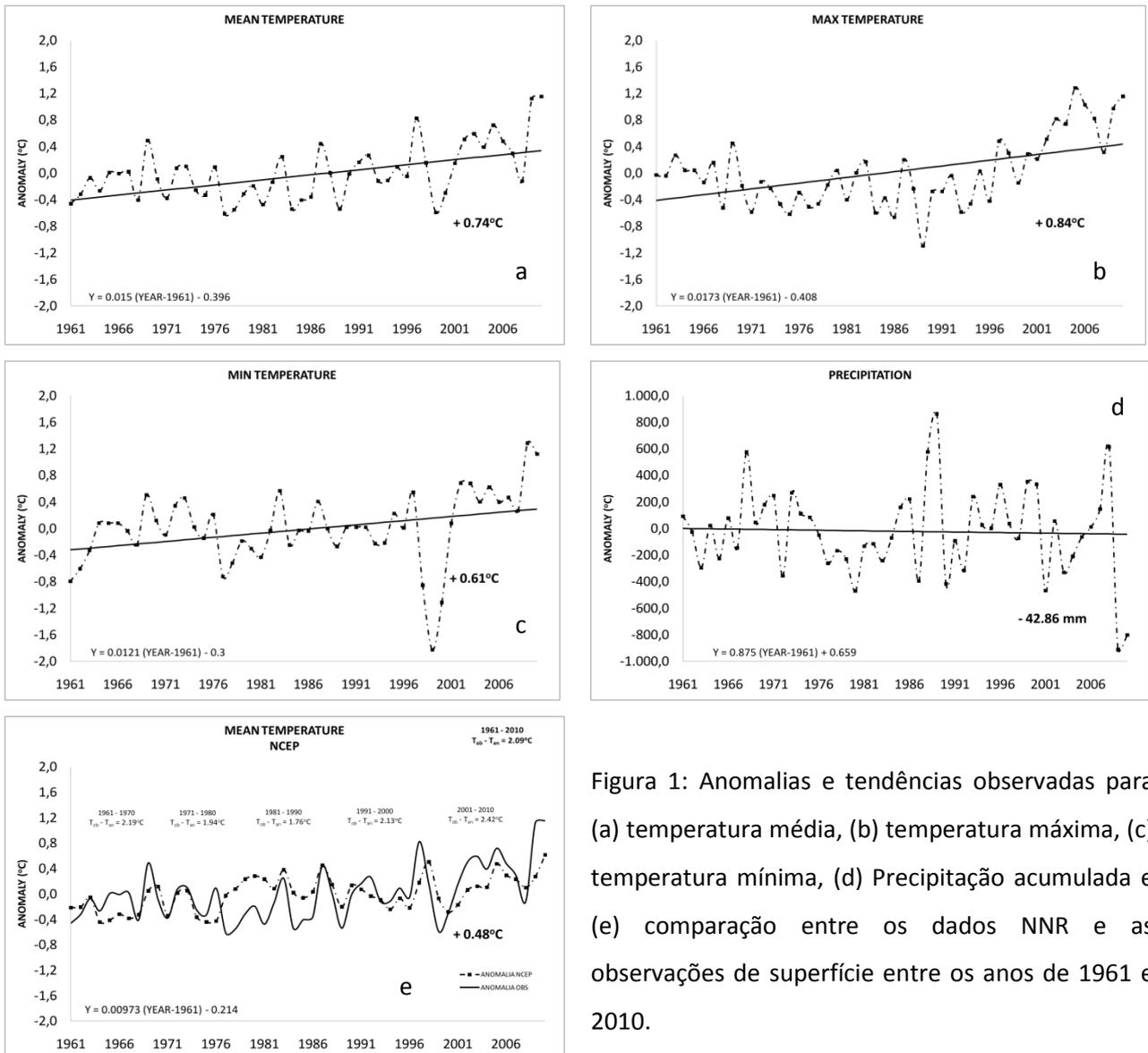


Figura 1: Anomalias e tendências observadas para (a) temperatura média, (b) temperatura máxima, (c) temperatura mínima, (d) Precipitação acumulada e (e) comparação entre os dados NNR e as observações de superfície entre os anos de 1961 e 2010.

Para os dados de precipitação observados em Manaus, diferente do encontrado para as demais variáveis, observa-se uma tendência de diminuição, sem significância estatística comprovada pelo teste de Mann-Kendall, de $-42,86 \pm 12,75$ mm para todo o período (Figura 1d); entretanto, para as duas últimas décadas, 1991-2000 e 2001-2010, observou-se uma tendência de aumento na precipitação de $359,91 \pm 121,07$ mm e de $671,45 \text{ mm} \pm 225,88$ mm,

respectivamente, salientando que a tendência observada para a década de 1991-2000 apresenta significância estatística de 90%. Quando analisados os resultados do teste sequencial de Mann-Kendall para a precipitação observada nas cidades de Manaus e Belém, nota-se que, como observado para a temperatura, nenhum comportamento relacionado com alguma mudança climática abrupta que justifica as tendências observadas.

Com relação à análise anual dos extremos (Tabela 1), 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%), concordando com os resultados obtidos por Vicent et al. (2005) apenas com o aumento no número de dias quentes. Vale salientar que o conjunto de dados utilizado pelos autores é referente ao período de 1960-2000, enquanto que o utilizado neste trabalho refere-se ao período de 1961-2010.

Tabela 1: Valores dos índices encontrados para a cidade de Manaus entre 1961 e 2010.

	ANUAL	1961 - 2010	CHUVOSO	1961 - 2010	SECO	1961 - 2010
warmest day (°C)	38,30	+ 0,95	37,20	+ 0,70	38,30	+ 0,93
warm days (%)	8,55	- 0,85	8,80	- 0,14	8,30	- 1,28
cold days (%)	9,43	- 0,32	9,46	0	9,40	0
coldest night	12,10	0	14,30	0	12,10	+ 0,25
cold nights (%)	8,53	- 0,84	8,44	-0,13	8,62	+ 0,87
warm nights (%)	8,38	- 0,67	8,31	0	8,45	- 1,00
DTR (°C)	8,46	+ 0,62	7,69	+ 0,41	9,22	+ 0,08
extreme DTR (°C)	21,20	+ 0,78	18,90	+ 1,21	21,20	+ 0,58

Os resultados referentes ao aumento da temperatura dos dias mais quentes podem ter relação direta com o aumento da área urbana, influenciando de forma direta o microclima local. Outro índice que possivelmente também é afetado pelo processo de urbanização é a diminuição de dias frios observados, possivelmente associado ao aquecimento urbano diurno; e um aumento de noites frias durante o período seco, que pode estar relacionado com a menor capacidade de armazenar calor da área urbana, que eleva assim a perda radiativa.

As análises realizadas com os dados NNR evidenciam que existe uma tendência de elevação das temperaturas média, máxima e mínima para Manaus, assim como observado para os conjuntos de dados observados de superfície. Possivelmente esta tendência de aumento está relacionada com o processo de mudança climática global, já que este conjunto de dados não é sensível às mudanças dos usos do solo. Considerando que a tendência da diferença média diária para o período de 1961-2010 entre os dados NNR e a observação foi de 2,09°C (99% de significância estatística) (Figura 1e), pode-se atribuir que esta diferença está relacionada com a

urbanização e outros processos de mudanças no uso do solo em Manaus. Logo, de modo geral foi possível quantificar e demonstrar que os processos de urbanização apresentam grande influência nas tendências de aumento da temperatura em Manaus e que contribuem para a mudança de seu microclima. Vale salientar que as diferenças observadas nas duas últimas décadas estiveram acima dos 2°C, evidenciando que a intensa urbanização e o crescimento da população neste período influenciaram de forma direta as tendências de aumento de temperatura em Manaus.

4. CONCLUSÃO

As características do microclima urbano da cidade de Manaus no período de 1961 a 2010 foram avaliadas a partir de dados diários de temperatura e de precipitação. As análises estatísticas feitas mostram que os registros de temperatura entre 1961 e 2010 foram afetados por mudanças no microclima local, principalmente durante as duas últimas décadas, período este que foi caracterizado por intensa urbanização. Este intenso crescimento resultou em tendências positivas da temperatura do ar em superfície, como também possivelmente influenciaram sistemas precipitantes sobre a área de estudo. Os resultados observados para Manaus concordam com aqueles observados por Oliveira et al. (2006 e 2008), embora estes autores atribuíssem estas tendências apenas à variabilidade climática.

De certa forma não se pode negar que a variabilidade tenha afetado os valores de temperatura do ar, mas também se deve considerar que a intensa urbanização contribuiu para elevar a temperatura da cidade de Manaus nos últimos 50 anos, principalmente entre o período de 1991 e 2010. Este efeito da urbanização fica mais claro quando se constata que as tendências positivas estão altamente correlacionadas com a tendência de crescimento da área urbana de Manaus, demonstrado pelas análises entre os dados de reanálises e os observados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. (Scientific Report 1983/1).

SEN, P. K. 1968: **Estimates of the regression coefficient based on Kendalls's tau**. Journal of the American Statistical Association, v. 63, p. 1379-1389.

OBREGON GO, NOBRE CA, 2003: **Rainfall trends in Brazil**. Bulletin of the American Meteorological Society 84(8):1008-1009.

MONTÁVEZ, J. P., RODRÍGUEZ, A., JIMÉNEZ, J. I., 2000: **A study of the Urban Heat Island of Granada**. International Journal of Climatology, vol. 20, Issue 8, pp.899-911

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, v. 24(2), 169-187.

OLIVEIRA, F.N.M., ARAÚJO, R.L.C., CARVALHO, J.S., COSTA, S.S. 2008: **Determinação da variação no microclima de Manaus-AM por atividades antropogênicas e modulações climáticas naturais**. Acta Amazônica, v. 38(4), 687-700.

Rao VB, Hada K (1987): **Characteristics of Rainfall over Brazil: Seasonal Variations and Connections with the Southern Oscillation**. INPE 4432-PRE/1234, São José dos Campos, São Paulo, Brazil.

Kalnay E, Cai M (2003) **Impact of Urbanization and Land-Use Change on Climate**. Nature 423:528–531.