Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Índice de tendências climáticas de longo prazo em área urbana na Amazônia Oriental

Pedro Hugo Oliveira Moreira¹, Alan Cavalcanti da Cunha², Antônio Carlos Lola da Costa³

¹Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). Pedrohugo.moreira@gmail.com. ²Prof.º Dr. Associado III do Curso de Engenharia Civil – da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). Programa de Pós-graduação PPGCA/PPGBio/BIONORTE/UNIFAP. Rod. Juscelino Kubitschek, de Oliveira, km 02 – Campus Marco Zero do Equador – AP, CEP 68.903-419. alancunha@unifap.br. ³Prof. Dr. Titular aposentado da Faculdade de Meteorologia da Universidade Federal do Pará (UFPA). Rua Augusto Correa – Campus Universitário Guamá. CEP: 66075-110, Belém-PA. lola@ufpa.br.

Artigo recebido em 30/09/2020 e aceito em 14/09/2021

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a variabilidade e a tendência de variáveis meteorológicas no longo prazo para caracterizar o clima urbano da cidade de Macapá-AP. Compreender a variabilidade de índices climáticos em ambientes urbanos permite revelar possíveis interferências na qualidade de vida dos habitantes, principalmente em localidades urbanas. No entanto, tem sido relativamente difícil quantificar tendências de séries históricas que representem confiavelmente índices climáticos relevantes da realidade de cidades amazônicas, tanto em nível local quanto regional. No presente caso as variáveis-chave analisadas foram a temperatura do ar e a precipitação pluviométrica. A metodologia seguiu as seguintes etapas: a) coleta e consistência da série de dados por um período contínuo de 52 anos para o Estado do Amapá (1968–2020), b) utilização da série de dados pelo aplicativo RClimDex 1.1/IPCC para estimar as variações e as tendências climáticas locais utilizando-se 27 parâmetros climáticos extremos previstos pela equipe de peritos do CCI/CLIVAR e Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI). Os resultados acusaram treze indicadores estatísticos significativos ($p < 0,05$), sugerindo tendência generalizada da elevação da temperatura média do ar na zona urbana da cidade. Como consequência, estes indicadores mostraram não somente uma significativa elevação das temperaturas máximas, médias e mínimas, mas também os indicadores mais coerentemente associados com tendências de aquecimento temporal de cidades amazônicas. Tantos que estes efeitos parecem afetar tanto os períodos diurnos quanto os noturnos, confirmando a hipótese de predisposição à formação de ilha de calor urbana, com mudança significativa desta tendência a partir de 2010.

Palavras-Chave: RClimDex 1.1, índice de variação climática, Macapá, Amapá

Index of Long Term Climate Trends in Urban Area in the Eastern Amazon

ABSTRACT

This research aims to analyze the variability and trend of meteorological variables in the long term to characterize the urban climate of the city of Macapá-AP. Understanding the variability of climate indices in urban environments reveals possible interferences in the quality of life of the inhabitants, especially in urban locations. However, it has been relatively difficult to quantify trends in historical series that reliably represent climate indices relevant to the reality of Amazonian cities, both at a local and regional level. In the present case, the key variables analyzed were air temperature and rainfall. The methodology followed the following steps: a) collection and consistency of the data series over a continuous period of 52 years for the State of Amapá (1968–2020), b) using the data series by the RClimDex 1.1/IPCC application to estimate the local climate variations and trends using 27 extreme weather parameters predicted by the CCI/CLIVAR and Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI) team of experts. The results showed thirteen significant statistical indicators ($p < 0.05$), suggesting a general trend towards an increase in the average air temperature in the urban area of the city. As a consequence, these indicators showed not only a significant increase in maximum, average and minimum temperatures, but also the indicators most coherently associated with temporal warming trends in Amazonian cities. So many that these effects seem to affect both the day and night periods, confirming the hypothesis of a predisposition to the formation of an urban heat island, with a significant change in this trend from 2010 onwards. Keywords: RClimDex 1.1, climate change indice, Macapá, Amapá

Introdução

O Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC) tem sugerido que o atual conjunto de dados disponíveis de temperatura do ar e da precipitação, utilizados para averiguar índices extremos locais, tem sido insuficiente e inadequado para quantificar a variabilidade e a tendência de mudanças climáticas (Roth, 2007).

Essa base deveria atender aos grupos de detecção, atribuição e avaliação dos modelos, principalmente em áreas urbanas tropicais ao redor do mundo, como na África, América Latina (ou especificamente na Amazônia brasileira) e Oriente Médio (Lucas et al., 2021). As razões para a insuficiência de dados são os problemas da irregular e rarefeita distribuição geográfica das estações de monitoramento e a dificuldade de tratamento de dados brutos em um banco de dados global que limitam seu alcance e capacidade de atualizações (Rosas et al., 2016).

Portanto, quanto mais longa a série de dados maior será a confiabilidade da caracterização climática. E, segundo a Organização Meteorológica Mundial, são necessários séries históricas mínimas de 30 anos para caracterizar o clima de uma região (Alexsander, 2016). E, frequentemente, a melhor solução para a quantificação e caracterização das séries históricas disponíveis das principais variáveis meteorológicas (temperatura do ar e precipitação), é o uso de métodos estatísticos representadas por indicadores ou índices climáticos (Costa et al., 2020).

Halimatou et al. (2017) sugerem um novo método, recomendado pela World Climate Research Programme (WCRP), capaz de disponibilizar dados climáticos de uma região em um repositório central, cuja finalidade é a de gerar conhecimento sobre o clima local e ampliar a habilidade de monitoramento contínuo em diversas regiões do globo.

Dentre os esforços liderados pela Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDI) para esta finalidade, foi supervisionado e desenvolvido o software padrão RClimDex® que calcula índices extremos a partir de dados diários de temperatura do ar e de precipitação (Quagliolo et al., 2020).

A lógica dos processos de análises de séries climáticas ocorre a partir de um balanço de energia, obtido da observação de um sistema aberto e adaptativo de energia em trânsito (incidente e

emitida) entre a superfície terrestre e a atmosfera na forma de fluxo de calor sensível (aquecimento) e latente (evapotranspiração). Assim, é possível avaliar como o microclima urbano se comporta como receptor e emissor de calor. Contudo este balanço de energia em sistemas abertos de grande escala (cidade) não é totalmente homogêneo. A transformação da cobertura do solo pelas alterações antrópicas causa diferenciações microclimáticas, modificações no equilíbrio térmico capazes de gerar regiões termicamente desconfortáveis, especialmente na Camada Limite Urbana (até 1 Km de altitude), onde ocorrem os principais mecanismos de trocas térmicas de interação solo-atmosfera (Oke et al., 1991).

A análise espacial de tendências permite observar as mudanças na variabilidade e determinar em quais regiões determinada variável sofre alterações significativas ao longo do tempo, sendo o uso de índices desenvolvidos pelo ETCCDI um consenso para identificar mudanças na precipitação (Marrafon e Reboita, 2020) e na temperatura do ar (Avila-Diaz et al., 2020).

A manutenção da vegetação original tende a atenuar uma fração da absorção dos raios solares, pelo sombreamento e processos de evapotranspiração, que contribuem com a manutenção do equilíbrio térmico, favorecendo o resfriamento local em relação à dinâmica urbana do entorno (Moreira et al., 2020). Assim, a temperatura do ar pode ser ampliada ou reduzida, dependendo de fatores que interferem no balanço dos fluxos de energia, tais como a característica superficiais do terreno, presença de corpos de água, tipos de construção e condições meteorológicas locais (Sabino et al., 2020).

Na literatura da área há pelo menos cinco métodos básicos para medir os efeitos da urbanização sobre os climas urbanos: estações fixas (usado neste trabalho), transectos móveis, sensoriamento remoto, sensoriamento vertical e balanço de energia, representadas pelas temperaturas máximas e mínimas do ar ao longo de séries climatológicas (Gartland, 2010). Dentre os cinco métodos disponíveis na literatura, e que justificam um estudo desta natureza em Macapá-AP, o mais adequado é o uso de análise estatística de séries temporais.

Santos et al. (2020), identificaram, utilizando o método de séries temporais, que muitos estudos realizados em ambientes urbanos no Brasil seguem com a tendência de aumento de

dias e noites quentes e a diminuição de dias e noites frias, em sítios urbanos de diferentes tamanhos.

Outras investigações que analisaram a variabilidade espaço-temporal de elementos climáticos, também identificaram o aumento da temperatura do ar na região Amazônica (Lucas et al., 2021).

O presente artigo objetiva analisar tendências da variabilidade climática na zona urbana de Macapá, utilizando o software RclimDex (Zhang; Yang, 2004), utilizando uma série de dados de 52 anos para temperatura do ar e precipitação em um ambiente urbano amazônico, com suas eventuais consequências. Adicionalmente, comparando estudos similares da literatura (Silva, 2016; Santos et al., 2012), a hipótese principal de pesquisa é que, a partir desses referidos estudos realizados em Macapá, o prolongamento da série histórica até 2020 apresentaria mudanças significativas de pelo menos um indicador de temperatura do ar e um de precipitação ($p < 0,05$). Portanto, nesse ínterim houve mudanças de tendências temporais significativas dos indicadores climáticos em Macapá, sugerindo aumento da probabilidade de formação de ilha de calor urbana como reflexo deste desequilíbrio térmico.

Material e Métodos

Caracterização da Área de Estudo e Clima

A cidade de Macapá está localizada na região sudeste do Estado do Amapá ($0^{\circ}2'4''$ N e $51^{\circ}3'60''$ W), com área de 6.503,458 km² (Figura 1). A população apresentou significativo crescimento entre 1970 e 2019, de 116.480 para uma estimativa de 503.327 habitantes, resultante de transformações políticas e econômicas nas décadas de 1980 e 1990. Macapá está localizada na Bacia Hidrográfica do Igarapé da Fortaleza, contígua ao Rio Amazonas, o qual se interliga com afluentes menores, denominadas de áreas de ressaca, considerados reservatórios naturais de água, e influenciados pelo regime de marés (IBGE, 2010, Abreu et al., 2020).

No período de 1985 a 2006 a expansão da área urbana de Macapá foi da ordem de 187%. A área urbana se expandiu de 18,30 km² para 54,03 km², ocorrendo proporcionalmente uma redução de 23,23% na densidade de árvores, que variou de 80,30 Km² para 61,7 km² (Carvalho, 2013).

Em Macapá ocorre elevados totais de precipitação (> 2300 mm/anuais, em média) e média mensal superior a 60 mm. Apresenta mínimos anuais a partir do período de transição

entre junho, julho e agosto, com os mínimos absolutos ocorrendo principalmente na primavera austral, em setembro, outubro e ocasionalmente em novembro. Considerado o parâmetro climatológico mais relevante, a formação de nuvens influencia o regime de precipitação local. Segundo a classificação de Koppen, Macapá apresenta clima tropical chuvoso (*Ami*), predominantemente quente e úmido, com temperaturas médias anuais de 26,6 °C (Costa et al., 2013).

O regime pluvial, em termos meso e macroclimáticos, é resultante da combinação ou da atuação predominante da Zona de Convergência Intertropical, das brisas marítimas, e da fonte de vapor representada pela Floresta Amazônica e da Cordilheira dos Andes (Almeida et al., 2016).

Dados de Variação de Tendência Climática

Os dados e os indicadores utilizados na presente pesquisa compreendem uma série histórica de 52 anos (1968-2020) (Tabela 2 e Figura 1), cujos registros de temperatura máxima e mínima do ar, além da precipitação pluviométrica, foram obtidos da Estação Meteorológica da Fazendinha (Distrito da Fazendinha – Macapá). É considerada uma estação convencional e está localizada nas coordenadas geográficas $0^{\circ}02'42.36''$ S e $51^{\circ}06'35.64''$ W). Infelizmente, não estavam disponíveis os dados da estação do Aeroporto (SBMQ), cujas séries seriam úteis comparativamente com as do Distrito da Fazendinha. Por este motivo, para a presente avaliação, foi aplicada apenas a série da estação convencional da Fazendinha.

Figura 1: Mapa da área de estudo. Fonte: Produzido pelos autores em 03/11/2019.

A série de dados da estação INMET foi intermediada pelo Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (NHMET/IEPA). E, apesar do esforço na

implantação de Estações Meteorológicas automáticas com teletransmissão de dados (PCDs) no Estado do Amapá, estas detêm registros de dados em período inferior a 30 anos, inadequadas para este tipo de análise climatológica preconizada pela Organização Mundial Meteorológica (OMM) (Jesus et al., 2010), embora metodologias

alternativas tenham sido utilizadas para reduzir lacunas relacionadas a análises de dados inferiores ao tempo recomendado pela OMM (Quagliolo et al., 2020). A Tabela 1 mostra as PCDs instaladas na Zona Urbana de Macapá, com destaque a Estação da Fazendinha utilizada nesta pesquisa.

Tabela 1: Estações meteorológicas e climatológicas no Estado do Amapá (JESUS et al., 2010).

Localidade (Macapá urbana)	Tipo de Estação	Código	Órgão	Latitude	Longitude
34° BIS	Agrometeorológica	31944	CPTEC	0,03	-51,08
CBMAP	Meteorológica	-	NHMET	0,03	-51,05
Aeroporto	Meteorológica	82099	INFRAERO	0,03	-51,06
Fazendinha	Climatológica	82098	INMET	0,05	-51,12
CAESA	Hidrometeorológica	32234	ANA	0,05	-51,5

Os indicadores que obtiveram significância estatística nas mudanças das tendências dos índices estão apresentados na Tabela 2.

Parametrização e aplicação do modelo RClimDex/IPCC

Um total de vinte e sete índices de extremos climáticos são recomendados pelo CCI/CLIVAR e Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI) (Tabela 2). Os dados de entrada devem ser de alta qualidade e livre de heterogeneidades. A heterogeneidade, dentre outros fatores pode ser causada pela mudança na localização de estações, trocas de instrumentação e intensificação de processos de urbanização que causam inconsistência nas séries históricas (Hunziker et al., 2018).

O software RClimDex integra a linguagem de programação R com o software ClimDex AFL 1.0, e é parte de um conjunto de técnicas utilizadas para produzir dados climáticos de pequena escala e em séries históricas longas e de curta duração de temperatura do ar e precipitação.

E, mesmo quando há interrupções na série de dados de um período, é possível estimar os parâmetros, apresentando uma interface amigável com o usuário no cálculo de índices de extremos climáticos. (Rosas et al., 2016). Contudo, os extremos são sensíveis à escala, cuja representatividade espacial é baseada em valores em pontos e em grade (Alexsander, 2016).

A parametrização do RclimDex® seguiu os seguintes passos: a) tabulação organizada no software Excel® dos dados de temperatura mínima (TMin), temperatura máxima (TMax) e

precipitação (PRCP); b) importação no formato “.txt” para alimentar o software RClimDex® (Zhang; Yang, 2004).

Quanto à organização dos dados: a) a obtenção de dados no formato de arquivo de texto ASCII, composto de seis colunas: (ano, mês, dia, precipitação (PRCP), temperatura máxima (TMax), temperatura mínima (TMin), formato aceito pelo software RClimDex®; b) análise dos dados ausentes, codificados como -99.9 e dispostos em ordem cronológica conforme recomendado por Zhang e Yang (2004); c) cálculo dos índices climáticos após a imposição de parâmetros com intervalos pré-definidos pelo usuário. Este limita as informações sobre as séries consideradas pelo *software*, tais como a temperatura mínima e máxima do ar no período e seleção dos parâmetros estatísticos significativos ($p < 0,05$); d) elaboração das saídas gráficas com os respectivos índices de tendências de variabilidade climática; e) confirmação dos respectivos índices climáticos ($p < 0,05$).

Hunziker et al. (2018), indicam que problemas sistemáticos na qualidade dos dados podem ocorrer em vários estágios do processo de geração de dados padrão, sendo importante aplicar o controle da qualidade para evitar resultados tendenciosos e exacerbadamente incertos. Neste sentido, para tornar este processo mais confiável, foram substituídas aproximadamente 300 lacunas com dados atualizados, após uma consulta no Banco de Dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em abril de 2020 e janeiro de 2021.

Tabela 2: Índices climáticos significativos utilizados e respectivas definições e unidades.

Sigla	Nome do Indicador	Descrição	Unidade
CSDI	Número máximo de dias consecutivos no ano com temperatura mínima diária menor que percentil 10 (dias) .	Este índice reflete a duração das ondas de frio.	°C
CWD	Número máximo de dias com precipitação ≥ 1 mm	Reflete o número máximo consecutivo de dias do ano em que houve precipitação igual ou acima de 1 mm	mm
DTR	Amplitude Diária de Temperatura	Diferença média mensal entre Temperatura Máxima e Mínima	°C
TMax	Temperatura máxima média	Temperatura máxima média da região	°C
TMin	Temperatura mínima média	Temperatura mínima média da região	°C
TNn	Mínimo da Temperatura Mínima	Valor mensal mínimo de temperatura mínima diária	°C
TNx	Máximo da Temperatura Mínima	Valor mensal máximo de temperatura mínima diária	°C
Tn10p	Noites frias	Número de dias com temperatura mínima abaixo do percentil 10	Dias
Tn90p	Noites quentes	Número de dias com temperatura mínima acima do percentil 90.	Dias
TR20	Noites Tropicais	Número de dias em um ano quando a temperatura mínima Diária é >20 °C	°C
TXx	Máximo da Temperatura Máxima	Valor mensal máximo da temperatura máxima diária	°C
Tx10p	Dias frios	Número de dias com temperatura máxima abaixo do percentil 10	Dias
Tx90p	Dias quentes	Número de dias com temperatura máxima acima do percentil 90	Dias
WSDI	Períodos quentes	Número de dias no ano, com pelo menos seis dias consecutivos, quando a temperatura máxima é maior que o percentil 90.	Dias

A interpretação gráfica e estatística dos índices seguiu os seguintes passos: a) linhas pretas contínuas indicam a tendência real da série histórica; b) linhas pretas tracejadas indicam a tendência estimada do comportamento temporal ou a potencial tendência de mudança da variabilidade climática da referida variável em alguma etapa do período; c) abaixo do eixo das abscissas estão indicados os parâmetros estatísticos como os coeficientes de determinação (R^2), representando o ajuste das regressões e que demonstra a explicabilidade da respectiva variação do índice em função do tempo; d) linha cinza com círculos vazios indica grupos consistidos de dados coletados a partir da estação meteorológica definida para a série temporal.

Toda a análise é baseada no método dos mínimos quadrados, com nível de significância estatística da tendência também classificado pelo p-valor ($p < 0,05$), coeficiente de determinação (R^2) e avaliação do erro padrão das estimativas. Após esta etapa são calculados os indicadores e disponibilizadas as saídas gráficas para posterior interpretação.

Resultados e discussão

Nesta seção são apresentados apenas os índices com significância estatística ($p < 0,05$). Nos gráficos das Figuras 2-5 são mostrados os indicadores significativos de tendência climática obtidos com o RCLimDex para Macapá durante o período entre 1968 e 2020, identificando

descritivamente as variações dos índices climáticos e sua análise.

O índice TMax (Figura 2a), relacionado à temperatura máxima média, apresentou aumento, sendo que no início da década de 1970 aproximadamente alcançou níveis entre 30,5 °C e 33,0 °C na década de 2010, com um $R^2=0,76$ ($p<0,05$). O índice TMin, temperatura mínima média (Figura 2b) apresenta um aumento significativo, iniciando em 22,5°C para aproximadamente 24,5 °C, com $R^2= 0,68$ ($p<0,05$).

Este resultado indica que as temperaturas mínimas continuam subindo de forma consistente no tempo, o que, segundo Moreira et al. (2020), é explicado pelo aumento percentual de áreas antropizadas na zona urbana de Macapá, especialmente entre os anos de 1990 e 2017, de 24,11% para 37,84%, e a redução da área de vegetação de 25,02% para 17,20%, o que provocou um potencial aquecimento da zona urbana.

Sabino et al. (2020), afirmam que a conversão de áreas naturais por áreas antropizadas, alteram o particionamento e a magnitude do balanço de radiação, albedo e fluxos de calor latente e sensível, pois o solo passa a emitir mais radiação de ondas longas e maior reflexão de ondas curtas, fazendo com que a energia disponível aqueça o solo e ao ar.

O índice TNx (Figura 2c) (máximo de temperatura mínima diária), apresentou um aumento estatístico significativo, variando de 26°C em 1968 para 27 °C em 2018, com pico de 27,5 °C na década de 2010, indicando a influência da urbanização neste processo. O índice TXx (Figura 2d), representa o valor mensal máximo da temperatura máxima diária. Este índice sugere aumento consistente e significativo, com picos de intensidade crescentes, especialmente nas décadas de 1980 (pico aproximado de 36 °C) e 2010 (pico aproximado de 36,5 °C em 2010 e 39 °C em 2020).

O índice Tx10p (Figura 3b), representando o número de dias com temperatura máxima abaixo do percentil 10, ou dias frios, mostra uma acentuada e significativa queda anual ($p\text{-value} = 0,000$). Isto porque, na década de 1970 seu valor era de aproximadamente 35 dias. Mas em 2010 configura abaixo de dez dias anuais e em 2020 abaixo de cinco dias anuais.

Estes resultados podem estar correlacionados com o aumento da taxa de crescimento populacional em Macapá, da ordem de 323,70% entre 1970 e 2018 (Silva, 2016). Ao mesmo tempo, a redução do índice Tx10p, segue uma tendência na região amazônica, identificada por Silva et al. (2019), de redução de 0,58% de dias frios e um aumento de aumento de 1,03% de dias

quentes (dentre as tendências mais expressivas do estudo para este índice) entre 1980 e 2013. Os autores destacam o aumento do desmatamento, o mau uso do solo, além de outros fatores naturais, que estão trazendo implicações sobre o clima local destas regiões em estudo.

Dantas et al. (2015), ao fazerem uma análise dos extremos de temperatura do ar em Campina Grande-PB, também entenderam que o aumento os índices Tx90p e Tn90p, bem como a redução dos índices Tx10p e Tn10p, estão associados ao crescimento urbano que traz como consequências o adensamento das edificações, modificações no uso do solo na região em que está localizada a na Estação Meteorológica. Moreira et al. (2020), detectaram um aumento expressivo da urbanização de Macapá, com uma terceiro eixo de expansão na região do Distrito da Fazendinha, onde se localiza a Estação Climatológica. Neste último caso ocorreu uma das maiores temperaturas registradas na capital amapaense, configurando-se como uma zona de características de Ilha de Calor Urbana.

Ainda no sentido da influência urbana nas alterações de índices climáticos, Sabino et al. (2020) detectaram que mudanças no uso e ocupação do solo, com o crescimento urbano, entre os anos de 2007 e 2017 ocasionaram tendências positivas para os índices Tx90p (3,15% de aumento) e Tn90p (4,84% de aumento), bem como foram responsáveis pelo aumento de 80% do albedo superficial e redução de 30,78% no saldo de radiação, para o perímetro urbano de Sinop-MT, localizado na região Amazônica.

Santos e Oliveira (2017) também detectaram um padrão de coerência espacial, com o aumento moderado nas temperaturas máximas diárias e significativo nas temperaturas mínimas, utilizando as taxas de mudanças da paisagem natural, entre os índices de temperatura do ar no Estado do Pará.

Colunga et al. (2015) indicaram resultados similares, após analisar o crescimento populacional e urbano na ordem de 33% na cidade de Querétaro (México), com um aumento de 0,75°C na TMin e 2°C na Tmax, no período de 1982-2011.

Esses resultados têm demonstrado algum efeito da urbanização na alteração do balanço de energia em Macapá (Figuras 2a e 2b). Alguns materiais artificiais, como os de construção civil, favorecem sistemas com maior capacidade armazenamento de calor. Um dos reflexos é o aumento da temperatura mínima noturna, devido a alteração de materiais urbanos que elevam a absorção, transmissão, reflexão do calor, e das características atmosféricas local (Landsberg, 1981).

Figura 2 – a) Evolução temporal dos índices climáticos TMax (temperatura máxima média), b) TMin (temperatura mínima média), c) TNx (máximo das temperaturas mínima) e d) TXx (máximo das temperaturas máximas).

O índice Tx90p (dias quentes) representa o número de dias com temperatura máxima acima do percentil 90. Tx90p apresentou aumento significativo no início da década de 70, pouco acima de 10 dias quentes por ano. Na década de 2010 este índice se aproximou de 50 dias quentes (400% de aumento), com um pico na década de 2010 acima de 50 dias quentes (Figura 3d).

O índice Tn10p (noites frias) ou o número de dias com temperatura mínima abaixo do percentil 10, apresenta uma queda expressiva, tendo aproximadamente picos de 50 noites frias durante a década de 1970, e, apresentando registros abaixo de 10 noites frias na década de 2010 (Figura 3a), muito evidenciado pelo crescimento urbano e a redução da vegetação. Santos et al. (2020), também detectaram este padrão de aquecimento térmico ao comparar dados de extremos climáticos na região de transição entre a Amazônia e o cerrado, no Estado do Maranhão, associando tal redução à umidade relativa do ar, além do alto índice de queimadas e de crescimento urbano.

Quanto ao Tn90p (noites quentes) apresenta um aumento progressivo e significativo. No início da década de 1970 havia aproximadamente 05 noites quentes. Mas no ano de 2010 este número passou a apresentar 40 noites quentes, mostrando variabilidade inversa e esperada em relação a Tn10p. A estimativa da curva Tn90p (Figura 3c) apresenta uma tendência de aumento, provavelmente associado ao fenômeno da urbanização e da redução dos índices de vegetação na cidade de Macapá. Halimatou et al. (2017) relataram efeito semelhante em Bamako e Ségou (Mali), país localizado na região equatorial africana. Os referidos autores compararam Tn90p entre os anos de 1961 e 2010 e observaram também um aumento significativo do número de noites quentes, pelos fatores citados acima. Lucas et al. (2021) associaram o aumento de noites quentes ao aumento da concentração de dióxido de carbono, mudanças na cobertura na terra e na variabilidade climática natural, o que pode estar ocorrendo em Macapá pelo efeito do crescimento urbano.

Figura 3 – a) Evolução temporal dos índices climáticos Tn10p (noites frias), b) Tx10p (dias frios), c) Tn90p (noites quentes), d) Tx90p (dias quentes).

Os dados apresentados na Figura 4a (WSDI – períodos quentes), 06b (DTR – amplitude diária de temperatura), 06c (CSDI – períodos frios) e 06d (TR20 – noites tropicais), apresentaram patamares estatísticos significativos, mas com R^2 baixos, provavelmente devido às fortes oscilações destes parâmetros no período analisado e/ou com anos sem resultados expressivos. Provavelmente fatores mesoclimáticos tendem a causar maior interferência nestes quatro índices em relação aos oito analisados anteriormente.

O índice WSDI (períodos quentes), também apresenta oscilações significativas. Inicialmente ocorreu um pico de 20 dias de períodos quentes, no início da década de 1970. Posteriormente, após este pico, os períodos quentes são reduzidos e se estabilizam até a década de 1990. Durante a década de 2000 em diante, apresenta oscilações com picos acima de 100 dias durante a década de 2010, indicando um aumento significativo nos períodos quentes na capital amapaense (variação de 400%) (Figura 4a).

Silva (2016), com dados entre 1968-2014, registraram acréscimo significativo para WSDI, tanto na estação da Fazendinha, quanto no Aeroporto Internacional de Macapá, em especial ao

final dos anos 2000. Este resultado é semelhante ao obtido na presente pesquisa, demonstrando estabilidade temporal deste índice, havendo baixas alterações na expansão da série história, o que revela que Macapá possui maior frequência de dias secos consecutivos. Interessante ressaltar na pesquisa da referida autora que, comparando os resultados da Estação do Aeroporto (zona central) com a Estação da Fazendinha (zona periférica), o WSDI possuiu índices três vezes maiores no Aeroporto, indicando que a zona central de Macapá tende a ser ainda mais quente em relação à zona periférica, indicativo da existência do fenômeno da Ilha de Calor Urbana.

Santos et al. (2012), analisando dados de 1968-2010, também registraram um aumento significativo de períodos quentes a partir de 1980, em que registrou mais de 130 dias com pelo menos seis dias consecutivos. Nesta pesquisa, a inflexão da curva para cima do WSDI foi significativa a partir da década citada.

O índice DTR (Figura 4b), da amplitude térmica diária, inicialmente indica uma redução quando são comparados o final da década de 1960 até a metade da década de 1980. A partir deste período, observa-se uma reversão nesta variação,

provavelmente relacionada ao processo de urbanização e à redução do índice de vegetação.

Além de fatores antrópicos, Santos et al. (2012) destacam fatores naturais como a alta cobertura de nuvens, em virtude da localização próxima da Zona de Convergência Intertropical, capazes de reduzir o aquecimento diurno pelo aumento da reflexão da luz solar e o aquecimento noturno devido ao aumento da radiação de onda longa incidente.

Estes resultados indicam que a capital amapaense tende a ser um espaço termicamente mais quente, suscetível a maiores ondas de calor, refletido provavelmente pelo aumento da amplitude entre a temperatura máxima diária e a temperatura mínima diária, mesmo com o aumento de T_{min} (Figura 2a e 2b).

O índice CSDI (Figura 4c), representando a duração das “ondas de frio”, oscilou entre 20 e 10 dias no final da década de 1960 e durante a década de 1970, ficando praticamente nula entre as décadas de 1980 e 2010, mostrando que a capital amapaense apresenta um alto índice de calor, o que corrobora com suas características climáticas locais e com o aumento de dias e noites quentes. Este índice obteve significância estatística, diferente do que foi apresentado por Santos et al. (2012). Talvez pelo efeito causado pelo ajuste da expansão da série de dados de mais dez anos. Silva (2016), com dados da Estação Meteorológica da Fazendinha, não obtiveram significância estatística para este índice, e, com os dados da Estação do Aeroporto, o CSDI obteve perda de explicabilidade, o que pode indicar interferência maior de fatores mesoclimáticos, como a influência das brisas fluviais do Rio Amazonas em relação às taxas de crescimento urbano da capital amapaense.

A redução do índice CSDI e o aumento do índice WSDI indicam que Macapá tem maior propensão a ocorrência de ondas de calor. Com variabilidade entre os índices semelhante a encontrada nesta pesquisa, no que tange ao sentido dos índices, Costa et al. (2020) identificaram também um aumento das ondas de calor na região nordeste do Brasil.

O índice TR20 (Figura 4d), relacionado a noites tropicais, ou número de dias em que a temperatura mínima esteve acima de 20°C, apresenta variabilidade regular ou constante. Tanto que em praticamente todos os anos bissextos (1980, 2004, 2008, por exemplo), todos os dias apresentaram a temperatura mínima acima de 20°C, exceto 2020. Durante a década de 2010 ocorreu uma pequena queda, de 365 para aproximadamente 356 dias (apenas 10 dias de diferença), o que indica

mesmo assim, que os dias e noites são evidentemente quentes na capital amapaense.

Diferentemente da temperatura, os índices de precipitação (R1mm, R10mm, R20mm, R95, R99, por exemplo) não apresentaram significância estatística ao nível de 95%. O mesmo ocorreu nos estudos de Silva et al. (2019) e Santos et al. (2012).

Segundo Almeida et al. (2016), a complexa dinâmica de variabilidade da precipitação pode introduzir incerteza nas tendências de longo prazo, quando se usam diferentes períodos de tempo. Nesta pesquisa o comprimento da série de 52 anos praticamente excluiu mudanças estatisticamente significativas ligadas à precipitação.

Corroborando com os resultados de precipitação obtidos nesta investigação, Silva et al. (2019), também não obtiveram nenhum índice relevante para precipitação, nem ao nível de 1% ou 5%. Porém, os mesmos detectaram tendências positivas para alguns índices de temperatura em 48 mesorregiões do Nordeste Brasileiro e da região Amazônica. Dentre estas mesorregiões está o Sudeste do Amapá, que engloba a Estação Climatológica da Fazendinha, analisada nesta pesquisa, em que os seguintes índices aumentaram, ao nível de 1% de significância estatística: TX_x com 0,05 dias/ano, Tx90p (dias quentes) com 1,03 dias/ano e DTR (amplitude diária de temperatura) com 0,03 dias/ano e, ainda a redução dos dias frios para -0,58 dias/ano.

Dantas et al. (2015), que também obtiveram ausências de tendências de valor para os índices de precipitação, associam tais dados a questões mesoclimáticas, como a irregularidades das chuvas sobre a região nordeste, que provocam alta variabilidade espaço-temporal.

Apesar disso, Marrafron e Reboita (2020) identificaram algumas variabilidades mais precisas para a região próxima à cidade de Macapá, como o aumento dos dias consecutivos secos e eventos de precipitação mais raros e concentrados, o que parece ocorrer no norte do Estado do Pará. Mesmo assim, detectaram que a maior sequência de dias úmidos (mais de 28 dias) ocorre entre o litoral do Pará e do Amapá.

Santos e Oliveira (2017) também detectaram o padrão de aumento de dias secos consecutivos e a redução de dias úmidos consecutivos. Isto reforça a ideia do que pode ocorrer futuramente. Isto é, o aumento de chuvas mais concentradas na capital, associadas a existência de dias cada vez mais secos, como será visto a seguir, analisando outros índices.

Salviano et al. (2016), embora não tenham encontrado tendências significativas em 70% do território brasileiro para a precipitação, obtiveram

resultados que demonstram tendências negativas para a UR no leste da Amazônia, o que segundo os autores, é um dos reflexos de mudanças climáticas no Brasil, uma vez que todas variáveis estudadas pelos referidos autores apresentaram mudanças significativas em todos os meses analisados. Porém, para a temperatura média, os autores

detectaram tendência positiva significativa de 5% ao longo do ano inteiro em grande parte do Brasil, incluindo a região em que está localizada a cidade de Macapá. Na Amazônia brasileira, apenas a parte ocidental não apresentou tendências positivas significativas ao longo de todo o ano.

Figura 4 – a) Evolução temporal dos índices climáticos WSDI (períodos quentes), b) DTR (amplitude térmica diária) c) CSDI (Número máximo de dias consecutivos no ano com temperatura mínima diária menor que percentil 10 dias) e d) TR 20 (noites tropicais).

Para efeito de generalizações, Cavalcanti et al., (2009) comentam que as projeções dos modelos globais do IPCC-AR4, em relação às mudanças nos regimes e distribuição de chuva, derivadas de modelos globais do IPCC-AR4, mostram aquecimento em todo o Brasil e redução de chuvas na Amazônia Oriental, exatamente onde está localizado o estado do Amapá. Mas os cenários de chuva têm sido realmente não conclusivos, e confirmado na presente pesquisa pelos parâmetros de tendência de chuva. Isso ocorre porque as estimativas de chuva dependem dos modelos regionais, os quais ainda apresentam muitas incertezas.

Por exemplo, Brito et al. (2019) utilizando o modelo HadGEM2-ES, verificaram que este produz maiores valores de CWD sobre a região Amazônica, ou seja, o modelo produz mais dias de chuva do que realmente ocorre.

Por outro lado, as projeções para temperatura do ar são mais reveladoras e a consistência entre os modelos tende a ser maior. Por exemplo, no cenário otimista do IPCC (B2), o aquecimento anual pode chegar até 3°C no Brasil e, no cenário pessimista (A2), até 5 °C na parte sul da Amazônia (região de maior taxa de desmatamento). Entretanto, os valores de temperatura do ar indicados pelos parâmetros de tendência do clima local obtidos na presente

pesquisa estão dentro de um intervalo possível entre ambos os cenários.

Neste contexto, os resultados estão consistentes com a tendência prevista para quase todo o país, o qual também está sujeita à eventuais eventos extremos e influências exclusivamente locais do que efetivamente acontece. Na Amazônia, por exemplo, para um cenário A1B (1980-2099), além de ondas de calor, tem sido considerado uma efetiva tendência de aumento na frequência de dias secos consecutivos e de noites quentes (Cavalcanti et al., 2009).

Obviamente que as alterações nos extremos climáticos de uma região não ocorrem apenas por causas antrópicas, podendo haver interferências naturais no processo.

Silva (2010), em estudos de extremos climáticos no Estado do Pará, demonstrou um aumento de eventos de dias quentes e uma redução gradativa em relação às noites frias. Além disso, mostrou que os anos mais expressivos de dias secos consecutivos são coincidentes com os anos de configuração dos episódios do El Niño (1982-1983 e 1997-1998), bem como dos anos de ocorrência da fase quente do gradiente do Atlântico.

Jiménez Muñoz et al (2016), indicaram que o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é o principal fator de extremos climáticos interanuais na Amazônia, e, que em 1997/98 foi considerado o evento climático do século XX dada sua extraordinária magnitude em escala global.

Quagliolo et al. (2020), também consideram que o ENOS foi responsável pela onda de aquecimento registrada até o ano de 2004 na cidade de Guayaquil no Equador, e que tendem a ser mais frequentes, inclusive por este fenômeno modular o padrão climático da região.

Porém as incertezas sobre a complexidade e a modulação de inúmeros eventos dentro do El Niño não permitem formular com mais precisão suas influências sobre as mudanças climáticas na região de Macapá. Alves et al. (2021), mostram que trinta técnicas de modelagem diferentes, cujo objetivo é analisar eventos temporais históricos (1900-2005) e a projeção de eventos futuros (2050-2100) apresentam concordância nos aumentos de variabilidade em todas as regiões brasileiras, com exceção das escalas de tempo em que ocorrem o ENOS. Cai et al. (2020) indicam que o ENOS influencia em aumento de secas na Amazônia, podendo ser exacerbadas pelo aumento do efeito estufa.

Silva et al. (2018) demonstraram também que a sub-região leste da Amazônia, que engloba o Estado do Amapá, apresentou mudanças estatisticamente significativas de temperatura do ar

e poucos índices significativamente estatísticos de precipitação, se destacando o CDD (Duração de períodos de estiagem), e ainda, observaram um aumento na maioria dos índices extremos climáticos da temperatura do ar, como os dias e noites quentes (respectivamente T_{x90p} e T_{n90p}) e a tendência para redução dos índices extremos frios, como os dias e noites frias (respectivamente T_{x10p} e T_{n10p}) na região Amazônica.

Santos e Oliveira (2017), também encontraram alta variabilidade espaço-temporal da precipitação, com poucas das treze localidades estudadas no Estado do Pará que é contíguo ao Amapá. No período entre 1970 e 2006 apresentou variabilidade estatística significativa. Este estudo também detectou o aumento de dias e noites quentes e a redução de dias e noites frias.

A figura 5, demonstra índices que podem ter significância estatística mais expressiva ao longo dos anos, caso sejam mantidos os fatores meso e macroclimáticos, e talvez microclimáticos que influem na variação dos índices. Dentre estes estão o TN_n e o CWD.

O índice TN_n (Figura 5a) (mínimo de temperatura mínima), apresenta oscilações, tanto que a tendência estimada demonstra queda no índice, até porque desde 1968 observa-se períodos de aumento e períodos de redução dos mínimos de temperatura mínima. Porém, a tendência real da série histórica apresenta aumento, sendo possível deduzir que as menores temperaturas em Macapá tendem a se elevar, caso sejam mantidas as influências climáticas de micro e mesoescala.

O Índice CWD (Figura 5b) (número máximo de dias com precipitação), embora não apresente significância estatística em nível de 5% ($p < 0,05$) verifica-se que este índice climático passou a apresentar significância estatística em nível de 10% ($p < 0,10$). É importante enfatizar este índice, pois, os trabalhos anteriores locais não haviam, utilizando o mesmo método, identificado nenhuma significância para CWD, mesmo que neste trabalho apresente um R^2 baixo (5,9%).

Isto pode significar que, futuramente, mantendo crescente o seu nível de confiança, tal índice possa vir a apresentar significância estatística. No gráfico (Figura 5b) percebe-se que o índice CWD demonstra uma tendência real e uma tendência estimada de queda.

Esta queda no índice associada a estabilidade dos outros índices, poderá indicar que Macapá futuramente poderá apresentar chuvas mais concentradas, o que pode favorecer a ocorrência de alagamentos e outros problemas relacionados a deficiência no sistema de saneamento ambiental da cidade, como a

drenagem, algo que recentemente tem se tornado cada vez mais frequente (Souza et al., 2021).

Marrafon e Reboita (2020), estudando os índices de precipitação na Amazônia, também verificaram que há uma evidente redução da distribuição temporal da chuva, sendo que na

Amazônia Oriental, os eventos de precipitação estão se tornando mais concentrados, o que corrobora com os dados obtidos neste trabalho, visto que, também, o número de dias secos consecutivos (CDD) está aumentando.

Figura 5 – a) Valor mensal mínimo de temperatura mínima diária TNN (Mínimo de temperatura mínima) b) Número máximo consecutivo de dias do ano em que houve precipitação maior ou igual a 1 mm CWD (número máximo de dias do ano em que houve precipitação igual ou acima de 1mm).

Além disso, em outras regiões do país, em cidades com crescimento urbano acentuado, como Belo Horizonte, Nunes et al. (2018), detectaram queda de CWD, aumento de CDD (dias mais secos) e SDII (intensidade de precipitação diária). Isso indica que a capital mineira apresenta atualmente mais risco de precipitações em um curto espaço de tempo, principalmente nos setores norte e centro, tornando bem mais sensível aquele ambiente às precipitações anuais.

A Tabela 3 apresenta um comparativo resumido entre os resultados de índices climáticos com significância estatística ($p < 0,05$) obtidos por esta pesquisa em comparação com estudo similar até a década de 2010 (Santos et al., 2012). Esta pesquisa obteve dados comparativos mais significativos que os de Santos et al. (2012), sendo estes o CSDI, o DTR, a Tn10p, Tx10p, as temperaturas máximas e mínimas (TMax e TMin), TNx e TXx. Ou seja, oito parâmetros (ou nove considerando CWD com 90% de significância) de tendência climática, considerados menos ou não significativos por Santos et al., (2012), tornaram-se mais ou significativos na presente análise, devido ao prolongamento da série temporal em uma década. No caso de TMax e Tmin, estes dois índices foram possíveis de ser calculados em virtude de atualizações no software *RClimDex*® 1.1, funcionalidade inexistente no período em que o trabalho comparado foi produzido.

De forma inversa, seis parâmetros de tendência climática passaram a ser não significativos. Por exemplo, reduziram sua significância estatística e/ou explicabilidade em relação ao trabalho de 2012 citado os seguintes parâmetros: WSDI, Tn90p, Tx90p, TR20, TXn, TNN e GSL (este último, significando a duração da estação de cultivo, medido em dias).

Neste trabalho, alguns índices apresentam significância estatística moderada (90% significância): CWD, relacionada aos dias consecutivos com precipitação acima de 1mm (valor p igual a 0,105).

Pesquisas preliminares dos autores deste trabalho indicam que os níveis de vegetação não estão significativamente correlacionados com o uso do solo. Porém, ao se correlacionar o percentual de área urbana com o de solo exposto, há correlação potencialmente significativa, indicando que o percentual de solo exposto é significativamente explicada pela expansão urbana (p -valor = 0,081, no limite de significância, coeficiente angular = -0,6030, e $R^2 = 37,29$). Mas, nem o solo exposto ou a urbanização explicam sozinhas as tendências dos parâmetros climáticos medidos pelo *RClimDex* para Macapá. Portanto, provavelmente outras variáveis como a influência das brisas diárias do Rio Amazonas, tendem a modificar a temperatura local, bem como alterar alguns mecanismos de circulação atmosférica pelos diferentes usos do solo na cidade (vegetadas,

urbanas, solos expostos, corpos d'água, etc)
(Moreira et al., 2020).

Tabela 3: Comparativo nos índices entre esta pesquisa e Santos et al. (2012). Valores NS indicam comparações não significativas e os símbolos (*) significativo ($p < 0,01$).

Índice	Presente pesquisa (série de 52 anos) R^2 e p-value (p):	Santos et al. (2012) (série de 42 anos) R^2 e p-value (p):	Comparativo Entre as estimativas do RClimDex entre as séries
TMÁX	$R^2 = 76,6$ (*)	NS	R^2 e p-valor melhoraram
TMÍN	$R^2 = 68,9$ (*)	NS	R^2 e p-valor melhoraram
TNx	$R^2 = 51,8$ (*)	$R^2 = 13,8$ $p = 0,033$	R^2 e p-valor melhoraram
TXx	$R^2 = 57$ (*)	$R^2 = 24,4$ (*)	R^2 e p-valor melhoraram
Tn10p	$R^2 = 49$ (*)	$R^2 = 43$ (*)	R^2 e p-valor melhoraram
Tx10p	$R^2 = 60,5$ (*)	$R^2 = 42$ (*)	R^2 e p-valor melhoraram
DTR	$R^2 = 33,1$ (*)	$R^2 = 17,4$ $p = 0,018$	R^2 e p-valor melhoraram
CSDI	$R^2 = 13,3$ $p = 0,018$	NS	R^2 e p-valor melhoraram
CWD	$R^2 = 5,9$ $p = 0,105$	$R^2 = 5,7$ $p = 0,163$	R^2 e p-valor melhoraram
WSDI	$R^2 = 11,2$ $p = 0,028$	$R^2 = 56,2$ (*)	R^2 e p-valor pioraram
Tn90p	$R^2 = 49,2$ (*)	$R^2 = 58,9$ (*)	R^2 e p-valor pioraram
Tx90p	$R^2 = 54,3$ (*)	$R^2 = 75,6$ (*)	R^2 e p-valor pioraram
TR20	$R^2 = 11,1$ $p = 0,031$	$R^2 = 17,9$ $p = 0,014$	R^2 e p-valor pioraram
TXn	NS	$R^2 = 16$ $p = 0,023$	R^2 e p-valor pioraram
TNn	$R^2 = 9,8$ $p = 0,043$	$R^2 = 30,6$ (*)	R^2 e p-valor pioraram
GSL	NS	$R^2 = 5,7$ $p = 0,188$	R^2 e p-valor pioraram

Avila-Díaz et al. (2020), por exemplo, embora reconheçam que o aumento dos índices de temperatura do ar na cidade de Viçosa-MG são influenciadas pelo crescimento urbano ocorrido naquela cidade de 1968 a 2008, entendem que interferem mais as interações do sistema de circulação atmosférica de longo alcance (Zona de Convergência do Atlântico Sul) e o relevo da região do que ao aumento da densidade populacional.

Mas o comportamento inverso (correlação) entre índices de vegetação e percentual de urbanização ou percentual de solo exposto se mantém, confirmando-se uma correlação entre a redução da vegetação remanescente com o crescimento urbano (próximo da significância). Todos estes parâmetros citados podem afetar diretamente os fluxos de calor latente, sensível e momentum, entre outros fatores do ambiente urbano, pois os mesmos são dependentes de parâmetros físicos que causam alterações não lineares em respeito à temperatura local (Silva, 2016).

Conclusões

Às séries de tendências climáticas anteriores até 2010 para Macapá, obtidas por Santos et al., (2012), foram incluídas novos dados até o ano de 2020. Mas, mesmo com apenas uma relativamente curta extensão desta nova série de

dados, foram percebidas alterações significativas de alguns índices de tendência climática. Por exemplo, em comparação com o trabalho citado, obtivemos aumento do coeficiente de explicabilidade (R^2 , com $p < 0,05$) para DTR, Tn10p, Tx10p e TNx e TXx (temperaturas máxima e mínima do ar).

Por outro lado, os demais índices perderam sua significância, com destaque para WSDI, Tn90p, Tx90p, TR20, TXn, TNn e GSL. Esta mudança de tendência confirma nossas hipóteses de variação dos indicadores da temperatura do ar, apresentada pelos índices DTR, Tn10p, Tx10p, TNx, TXx, WSDI, Tn90p, Tx90p, TR20, TXn, TNn e GSL. Porém, nenhum indicador de precipitação variou significativamente, exceto o índice CWD, no limite da significância estatística moderada de 90% e com baixa explicabilidade ($r^2 = 5,9\%$). Isto significa dizer que a precipitação não possui uma espacialidade local definida, sendo provavelmente controlada por variáveis de meso e macroescala, ambas associadas à influência das brisas fluviais do Rio Amazonas e pela Zona de Convergência Intertropical (ITCZ). Mas TNn (mínimo de temperatura mínima) foi outro índice que apresentou variação com significância estatística (p-value de 0,043), sugerindo aumento deste indicador no tempo.

Dentre os doze resultados obtidos que obtiveram significância estatística ($p < 0,05$), oito índices obtiveram explicabilidade próxima a 50%

ou acima desse valor, sendo estes TMax (76,6%), TMin (68,9%), Tx10p (60,5%), TXx (57%), Tx90p (54,3%), TNx (51,8%), Tn90p (49,2%), Tn10p (49%). Tais variações desses índices demonstram que a zona urbana da capital amapaense apresenta tendência de dias e noites mais quentes, temperaturas mínimas e máximas mais elevadas, bem como dias e noites frias anuais menos frequentes.

Nestes termos, os resultados confirmam de forma indireta a hipótese da pesquisa. Isto é, a de potencial existência do fenômeno da Ilha de calor urbana, suportada pela identificação do aumento consistente das temperaturas noturnas no tempo.

Algumas interferências negativas da urbanização, somadas ao aumento da frequência de chuvas intensas concentradas em pequenas bacias hidrográficas, têm provocado problemas no já problemático sistema de drenagem em Macapá com tendência de provocar alagamentos, favorecimento o surto de doenças hidrotransmissíveis.

E, embora alguns esforços neste sentido tenham sido empreendidos, novos estudos devem ser realizados visando entender a espacialização ou efeito negativo de formação de ilha de calor urbana. Mas, temporalmente, é importante manter o preenchimento de lacunas de dados meteorológicos no Estado do Amapá, visto que a única estação climatológica que dispõe de série contínua de todos os dias desde 1968 a 2020, tem sido capaz de gerar uma confiabilidade em resposta de modelos como o software RCLimDex® 1.1. Sendo assim, já é possível observar alguns reflexos das mudanças de tendências climáticas sobre a qualidade de vida de moradores, os quais relatam “calor excessivo” e “noites quentes”, ou ainda “chuvas rápidas e intensas mais frequentes”.

Portanto, atualizações das séries históricas são extremamente necessárias, para permitir possível identificar mudanças sensíveis resultantes mesmo de curto prazo, como por exemplo, de apenas uma década na série histórica. Tanto que a nossa pesquisa confirmou estas hipóteses, as quais mostram que a metodologia utilizada na presente pesquisa é robusta, e permitiu detectar sensivelmente o efeito de aquecimento sobre a capital amapaense, onde os dados acusaram uma tendência consistente e positiva de aumento térmico em 2020 em comparação com a tendência de 1968.

Estes resultados mostram-se necessários porque servem de subsídios em ações de planejamento urbano e, principalmente, para ajudar a melhor compreender suas implicações futuras sobre a qualidade de vida dos habitantes locais. Isto

é, também como um reflexo de efeitos de meso escala do clima, e não somente locais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao LQSMSA/UNIFAP, CNPq Processo No. 309684/2018-8 e ao NHMET/IEPA, pela disponibilidade da série histórica e aos idealizadores do software RCLimDex, Dr. Yang (Canadá), quem disponibilizou a versão corrigida do software e orientou a utilização do mesmo e mudanças dos scripts para a confecção dos gráficos de saída.

Referências

- Abreu, C.H.M.; Barros, M.L.C.; Brito, D.C., Teixeira, M.R.; Cunha, A.C., 2020. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the estuary of the lower amazon river. *Water* (Online) 12, 1-29. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/w12030660>. Acesso: 15 dez. 2020.
- Alexsander, L.V., 2016. Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: a review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather and climate extremes* (Online) 11, 4-16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.007>. Acesso: 02 out. 2019.
- Almeida, C.T., Delgado, R.C.; Oliveira-Júnior, F.J., Cubo, P., 2016. Spatiotemporal Rainfall And Temperature Trends Throughout The Brazilian Legal Amazon 1973-2013. *International Journal Of Climatology* (Online) 37 (4). Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/Joc.4831>. Acesso: 25 jan. 2021.
- Alves, L.M.; Chadwick, R.; Moise, A.; Brown, J.; Marengo, J.A., 2021. Assessment of rainfall variability and future change in Brazil across multiple timescales. *International Journal of climatology* (Online) 41, 1875-1888. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.6818>. Acesso: 29 jan. 2021.
- Avila-Díaz, A.; Justino, F.; Lindemann, D.S.; Rodrigues, J.M.; Ferreira, G.R., 2020. Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in Viçosa-Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 92 (2), 1-19. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765202020190388>.
- Brito, A.L.; Veiga, J.A.P., Correia, F.N.; Capistrano, V.B., 2019. Avaliação do

- desempenho dos modelos HadGEM2-ES e ETA a partir de indicadores de extremos climáticos de precipitação para a Bacia Amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 34, 165-177. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/102-77863340003>.
- Cai, W.; McPhaden, M.J.; Grimm, A.M.; Rodrigues, R.R.; Taschetto, A.S.; Dewitte, B.; Poveda, G.; Ham, Y.G.; Santosa, A.; Ng, B.; Anderson, W.; Wang, G.; Geng, T.; Jo, H.; Marengo, J.A.; Alves, L.M.; Osman, M.; Wu, S.L.; Karamperidou, C.; Takahashi, E.; Vera, C., 2020. Climate impacts of the El Niño-Southern oscillation on South America. *Nature earth & environment* (Online) 1(4), 215-231. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>. Acesso: 29 jan. 2021.
- Carvalho, G.M., 2013. Crescimento urbano e perda de áreas verdes em Macapá: riscos e possibilidades de proteção. Monografia (Graduação em Ciências Ambientais). Macapá, UNIFAP.
- Cavalcanti, I.F.A.; Ferreira, N. J.; Silva, M.G.A.J.; Dias, M.A.F.S., 2009. Mudanças climáticas: Detecção e cenários futuros para o Brasil até o final do Século XXI, in: Cavalcanti, I.F.A.; Ferreira, N.J.; Silva, M.G.A.J.; Dias, M.A.F.S., (orgs.), *Tempo e clima no Brasil*, Oficina de Textos, São Paulo, 407-425.
- Colunga, M.L, Cambrón-Sandoval, V.H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A., Luna-Soria, H., 2015. The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico, *Atmósfera* 28, 205–218. Disponível: <http://dx.doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.0>
- Costa, A.C.L., Silva Junior, J.A., Cunha, A.C., Feitosa, J.R.P., Portela, B.T.T., Silva, G.G.C., Costa, R.F., 2013. Índices de conforto térmico e suas variações sazonais em cidades de diferentes dimensões na Região Amazônica. Recife: *Revista Brasileira de Geografia Física* (Online) 06, 478-487. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v6.3.p478-487>. Acesso: 02 abr. 2018.
- Costa, R.L.; Baptista, G.M.M.; Gomes, H.B.; Silva, F.D.S.; Rocha Júnior, R.L.; Salvador, M.A.; Herdies, D. L., 2020. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes* (Online) 28, 1-21. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>. Acesso: 05 ago. 2021.
- Dantas, L.G.; Santos, C.A.C.; Olinda, R.A., 2015. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperaturado ar e precipitação em Campina Grande – PB. *Revista Brasileira de Meteorologia* 30, 423-434. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130088>
- Gartland, L., 2010. Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. 1ª ed. Oficina de Textos. São Paulo.
- Halimatou, A.T.; Kalifa T.; Kyei-Baffour N., 2017. Assessment of changing trends of daily precipitation and temperature extremes in Bamako and Ségou in Mali from 1961-2014. *Weather and climate extremes* (Online) 18, 8-16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2017.09.002>. Acesso: 02 out. 2019.
- Hunziker, S.; Brönnimann, S.; Calle, J.; Moreno, I.; Andrade, M.; Ticona, L.; Huerta, A.; Lavado-Casimiro, W., 2018. Effects of undetected data quality issues on climatological analyses. *Climate of the past*, 14, 1-20. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5194/cp-14-1-2018>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Censo demográfico. Rio de Janeiro.
- Jesus, E.S.; Cunha, A.C.; Brito, A.U.; Marques, D.D., Barreto, N.J.C., Costa, A.C.L., 2010. Manutenção e expansão da rede de estações hidrometeorológicas automáticas (PCDs) no Amapá. In: Cunha, A.C.; Souza; E.B., Cunha, H.F.A. (Coords.). *Tempo, Clima e Recursos hídricos: Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá*. IEPA, Macapá, 29-42.
- Jiménez-Muñoz, J.C.; Mattar, C.; Barichivich, J.; Santamaría-Artigas; Takahashi, K.; Malai, Y.; Sobrino, J.A.; Schier, G.V.D., 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest. *Scientific reports* (Online), 6:33130, 1-7. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1038/srep33130>. Acesso: 03 nov. 2019.
- Landsberg, H.E., 1981. *The urban climate*. 1ª Ed. Academic Press, New York.
- Lucas, E.W.M.; Sousa, F.A.S.; Silva, F.D.S.; Rocha Junior, R.L.; Pinto, D.D.C.; Silva, V.P.R., 2021. Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin- Brazilian Amazon. *Weather and Climate Extremes* (Online) 31, 1-10. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>. Acesso em: 05 ago. 2021.
- Marengo, J.A., 2009. Detecção e cenários futuros para o Brasil até o final do século XXI. In: Cavalcanti, I.F.A.; Ferreira, N.J.; Silva, M.G.A.J.; Silva Dias, M.A.F. (Ed.). *Tempo e clima no Brasil*. Oficina de Textos, São Paulo, 407-425.

- Marrafon, V.H.; Reboita, M.S., 2020. Características da precipitação na América do Sul reveladas através de índices climáticos. *Revista Brasileira de Climatologia* (Online) 26, 663-676. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.72181> Acesso: 25 jan. 2021.
- Moreira, P.H.O.; Cunha, A.C.; Silva Junior, J.A.; Costa, A.C.L., 2020. Variação Microclimática em Sítios Urbanos com Diferentes Níveis de Cobertura Vegetal Como Subsídio à Formação de Ilha de Calor. *Revista Brasileira de Geografia Física* (Online) 13, 3254-3274. Disponível: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3254-3274>. Acesso em 16 dez. 2020.
- Nunes, A.A.; Pinto, E.J.A.; Baptista, M.B., 2018. Detection of trends for extreme events of precipitation in the Metropolitan Region of Belo Horizonte through statistical methods. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 23, 1-13. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0318170134>.
- Oke, T.R.; Tasler, R.; Olsson, L.E., 1991. The tropical urban climate experiment (TRUCE). *Energy and Buildings* (Online) 15, 67-73. Disponível: [https://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90117-2](https://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(90)90117-2). Acesso: 27 jan. 2019.
- Quagliolo, C.; Pezzoli, A.; Ignaccolo, R.; Davila, J.L.S.; 2020. Time-lagged inverse-distance weighting for air temperature analysis in an equatorial urban area (Guayaquil, Ecuador). *Meteorological applications* (Online) 27e.1938, 1-16. Disponível: <https://doi.org/10.1002/met.1938>. Acesso em 18 ago. 2021.
- Rosas, G., Gubler, S., Oria, C., Acuña, D., Avalos, G., Begert, M., Castillo, E., Croci-Maspoli, M., Cubas, F., Dapozzo, M., Díaz, A., Geijtenbeek, D.V., Jacques, M., Konzelmann, T., Lavado, W., Matos, A., Mauchle, Rohrer, M., Rossa, A., Scherrer, S.C., Valdez, M., Valverde, M., Villar, G., Villegas, E., 2016. Towards implementing climate services in Peru – The project CLIMANDES. *Climate Services* (Online) 4, 30-41. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cliser.2016.10.001>. Acesso: 02 out. 2019.
- Roth, M., 2007. Review of urban climate research in (sub) tropical regions. *International Journal of Climatology* (Online) 27, 1859-1873. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1591>. Acesso: 10 jan. 2019.
- Sabino, M., Silva, J.B.; Costa, R.O.; Duarte, L.G.; Souza, A.P., 2020. Parâmetros biofísicos e índices de extremos de temperatura do ar na transição Cerrado-Amazônia. *Sociedade e natureza* (Online) 32, 513-524. Disponível: <http://dx.doi.org/10.14393/SN-v32-2020-49257>. Acesso: 27 jan. 2021.
- Salviano, M.F.; Groppo, J.D.; Pellegrino, G.Q., 2016. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 31, 64-73. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620150003>.
- Santos, J.R.N.; Araújo, M.L.S.; Silva Junior, C.H. L.; Santos, J.S.; Almeida, J.L., Lima, T.V.; Sousa, L.V.P.; Aguiar, P.H.M.; Silva, F.B., 2020. Tendências de extremos climáticos na região de transição Amazônia-Cerrado no Estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Climatologia* (Online) 26, 130-154. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.62883>. Acesso: 25 jan. 2021.
- Santos, K.P.C., Cunha, A.C., Costa, A.C.L., Souza, E.B., 2012. Índices de Tendências Climáticas Associadas à “ilha de calor” em Macapá-AP. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais* (Online) 23, 1-16. Disponível: http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/327. Acesso: 23 mai. 2018.
- Santos, C.A.C.; Oliveira, V.G., 2017. Trends in extreme climate indices for Pará State, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32, 13-24. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778632120150053>.
- Silva, A.N.B.; 2010. Índices de extremos climáticos e tendências de precipitação anual e sazonal na Amazônia Oriental. *Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais)*. Belém, UFPA.
- Silva, A.P.N., 2016. Ilha de calor urbana: diagnóstico e impactos no microclima da região metropolitana de Macapá- AP. *Tese (Doutorado em Meteorologia)*, Campina Grande, UFCG
- Silva, P.E.; Silva, C. M. S.; Spyrides, M. H. C.; Andrade, L.M.B., 2019. Análise de Índices de Extremos Climáticos no Nordeste e Amazônia Brasileira para o Período entre 1980 a 2013. *Anuário do Instituto de Geociências –UFRJ* 42-2, 137-148. Disponível: <http://dx.doi.org/10.11137/2019-2-137-148>.
- Sousa, T.S.; Cunha, H.F.A.; Cunha, A.C., 2021. Risco de alagamento influenciado por fatores ambientais em zonas urbanas de Macapá e Santana – AP. *Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais* 12, [No prelo].
- Zhang, X.; Yang, F., 2004. *RClimDex (1.0) User Guide*. Climate Research Branch Environment Canada. Downsview, Ontario.