

Meio Ambiente, Paisagem e Qualidade Ambiental

Estudo de tendência de mudanças climáticas, eventos extremos e análise comparativa entre dois municípios de regiões distintas do semiárido pernambucano

Study of climate change trends, extreme events, and comparative analysis between two municipalities in different regions of the Pernambuco semi-arid region

Estudio de las tendencias del cambio climático, eventos extremos y análisis comparativo entre dos municipios de diferentes regiones del semiárido pernambucano

Alexandre Carlos Araújo de Santana^I , Jocimar Coutinho Rodrigues Junior^I ,
Timóteo Herculino da Silva Barros^{II} , Níveo Rocha^{III} ,
Fabiani Denise Bender^{II} , José Almir Cirilo^I , Anderson Luiz Ribeiro de Paiva^I 

^I Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

^{II} Universidade de São Paulo, São Paulo, SP Brasil

^{III} Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, CE, Brasil

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em analisar o comportamento do clima a partir da aplicação de indicadores de extremos climáticos de temperatura e de chuva, do Índice de Aridez (IA) e do Índice de Precipitação Padronizado (SPI), nos municípios de Dormentes e Canhotinho, no Sertão e Agreste pernambucano, respectivamente. Para isso, utilizou-se uma série histórica de 1980-2016 para calcular o SPI e IA e, com o software ClimPACT2 foram estimados os índices extremos. Para a temperatura, os índices extremos relevam tendência de aumento no número de dias e noites quentes (TX90p e TN90p) nos dois municípios. Em relação aos índices de chuva, observa-se uma tendência de aumento de seca no Sertão (DCU, PRCPTOT, R95p, Rx5day, R10) e, de umidade no Agreste (PRCPTOT, R95p, Rx5day, R10, R20, R30). O SPI apontou a ocorrência de eventos secos intensos nas duas regiões e, o IA indicou uma aridez crescente para Dormentes.

Palavras-chave: Índices climáticos; Temperatura; Precipitação; Vulnerabilidade climática

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze the behavior of the climate based on the application of indicators of climatic extremes of temperature and rainfall, the Aridity Index (AI) and the Standardized Precipitation Index (SPI), in the municipalities of Dormentes and Canhotinho, in the Sertão and Agreste regions of Pernambuco, respectively. To do this, a historical series from 1980-2016 was used to calculate the SPI and AI, and the extreme indices were estimated using the ClimPACT2 software. For temperature, the extreme indices show a trend towards an increase in the number of hot days and nights (TX90p and TN90p) in both municipalities. As for the rainfall indices, there is a tendency for drought to increase in the Sertão (DCU, PRCPTOT, R95p, Rx5day, R10) and for humidity to increase in the Agreste (PRCPTOT, R95p, Rx5day, R10, R20, R30). The SPI indicated the occurrence of intense dry events in both regions, and the IA indicated increasing aridity for Dormentes.

Keywords: Climate Indices; Temperature; Precipitation; Climate vulnerability

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento del clima mediante indicadores de temperaturas y precipitaciones extremas, el Índice de Aridez (IA) y el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), en los municipios de Dormentes y Canhotinho, en las regiones de Sertão y Agreste de Pernambuco, respectivamente. Para ello, se utilizó una serie histórica de 1980-2016 para calcular el SPI y el IA, y se estimaron los índices extremos utilizando el software ClimPACT2. Para la temperatura, los índices extremos muestran una tendencia al aumento del número de días y noches calurosos (TX90p y TN90p) en ambos municipios. En cuanto a los índices de precipitación, se observa una tendencia al aumento de la sequía en el Sertão (DCU, PRCPTOT, R95p, Rx5day, R10) y de la humedad en el Agreste (PRCPTOT, R95p, Rx5day, R10, R20, R30). El SPI indicó la ocurrencia de eventos secos intensos en ambas regiones y el IA indicó un aumento de la aridez para Dormentes.

Palabras-clave: Índices climáticos; Temperatura; Precipitaciones; Vulnerabilidad climática

1 INTRODUÇÃO

Os fenômenos climáticos consistem em padrões que influenciam de forma pertinente as condições atmosféricas de um local, sendo uma temática importante para compreensão de eventos extremos (Domingos et al., 2020). O Grupo de Trabalho 1 em seu Sexto Relatório de Avaliação, do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, tem demonstrado que estes eventos extremos estão se tornando cada vez mais frequentes e intensos em diferentes regiões do planeta e inclusive no continente sul-americano (IPCC, 2021). Considerando que estes extremos contribuem para o aumento dos riscos de desastres naturais, como inundações ou secas (CEPED/UFSC, 2013), é necessário compreender as causas e características desses fenômenos, com

a finalidade de identificar a vulnerabilidade climática e, auxiliar a gestão pública sobre seus recursos naturais (Cunha et al., 2018; Vilanova et al., 2021).

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial, nos últimos 50 anos (1970 a 2019), as mudanças climáticas e os eventos extremos causaram um aumento nos desastres naturais, representando 50% de todos os desastres, 45% de todas as mortes no período e 74% de todas as perdas econômicas, afetando principalmente as nações mais pobres (WMO, 2021). Como um desastre natural, a seca é um dos desastres mais devastadores, comprometendo, a segurança hídrica, energética e alimentar em várias regiões (MMA, 2017). Como exemplo temos o semiárido brasileiro que é considerado uma das regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas do mundo (Torres et al., 2012; Chou et al., 2014; Vieira et al., 2015; Regoto et al., 2021).

Considerando a grande dimensão territorial do Brasil, a padronização de chuvas é diversificada entre as regiões (Cavalcanti et al., 2009; Alvares et al., 2013) e, os extremos hidrológicos, como estiagens, secas, enxurradas e inundações representam a maior parte dos desastres naturais ocorrentes no país (ANA, 2019). A seca e a estiagem estão entre os eventos hidrológicos extremos que mais afetam a população brasileira, por ser mais recorrente (CEPED/UFSC, 2013). Nesse contexto, em 2019, foram quantificados no total, 4,76 vezes mais eventos de seca (cerca de 2217) do que os de cheias (cerca de 466). Apesar de o fenômeno impactar todas as regiões brasileiras, 94% das pessoas afetadas por secas naquele ano, viviam na região Nordeste, contabilizando 80% dos registros do país (ANA, 2020).

Embora não tenha consenso em relação ao padrão de distribuição da chuva observado e projetado em condição de clima futuro, a maioria dos estudos tem indicado um aquecimento no país nos últimos anos (Salviano; Groppo; Pellegrino, 2016; Regoto et al., 2021), que deve persistir em condição de clima futuro (Torres; Marengo, 2013; Chou et al., 2014). Para constatação dessas mudanças, o uso de indicadores de extremos climáticos já é de consenso, na identificação da intensidade e frequência dos extremos sobre temperatura e chuva (Zhang et al., 2011).

No Brasil, se tem a extensa região do Semiárido que, majoritariamente ocupa o Nordeste do país, consistindo em uma localidade que historicamente possui baixos índices de chuva (Silva et al., 2023). Entretanto, em decorrência da vasta dimensão desta área, que engloba todos os estados da região Nordeste brasileira, também ocorre uma variabilidade climática bastante notável, em que períodos de estiagem possuem variabilidade espacial relevante (Carvalho, 2020). Em razão disso, é pertinente compreender essa a tendência e a diversidade climática em diferentes locais do Semiárido, para contribuir com medidas de mitigação em épocas de estiagem, bem como para o planejamento de recursos hídricos.

O estado de Pernambuco abriga uma grande região de Semiárido, marcada pela área de Sertão na parte Oeste e, pela área de Agreste na parte Leste. Com isso, ocorrem diferentes regimes climáticos nos municípios que fazem parte do Semiárido pernambucano, dependendo da localização em questão (Marengo et al., 2016). Um município que faz parte do Sertão consiste em Dormentes e, um outro que faz parte do Agreste, consiste em Canhotinho. Os dois municípios, mesmo situados no Semiárido, dispõem de regimes de chuva e de clima com algumas características divergentes. Em razão disso, levanta-se questionamentos acerca do comportamento de tendências climáticas na região do Semiárido, em vista da sua grande extensão e variação de precipitação, temperatura e outras variáveis hidrológicas e climáticas locais.

Diversos estudos já analisaram as tendências observadas de indicadores climáticos sobre diferentes regiões do Brasil, como o Semiárido (Frich et al., 2002; Nóbrega; Farias; Santos, 2015; Xavier; Kingscanlon, 2016; Marengo et al., 2020a; Marengo et al., 2021). Considerando que o estado de Pernambuco está inserido em uma das regiões de maior vulnerabilidade socio-climática do país (Torres et al., 2012) e, que vem sofrendo com secas prolongadas nos últimos tempos, é necessária essa avaliação, envolvendo a tendência de chuva e temperatura (Cunha et al., 2018; Marengo et al., 2018; Marengo et al., 2021). Ademais, surge a necessidade de analisar diferentes áreas do Semiárido, com a finalidade de verificar a variação espacial nas tendências climáticas, que são influenciadas pelas variáveis locais.

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo avaliar, por meio de índices climáticos, as tendências de eventos extremos de temperatura e precipitação, bem como os padrões de chuva e a susceptibilidade à desertificação nos municípios de Dormentes e Canhotinho. Ambos estão localizados no Semiárido Pernambucano, mas apresentam características climáticas distintas, associadas aos padrões típicos do sertão e do agreste, respectivamente.

2 METODOLOGIA

Área de estudo

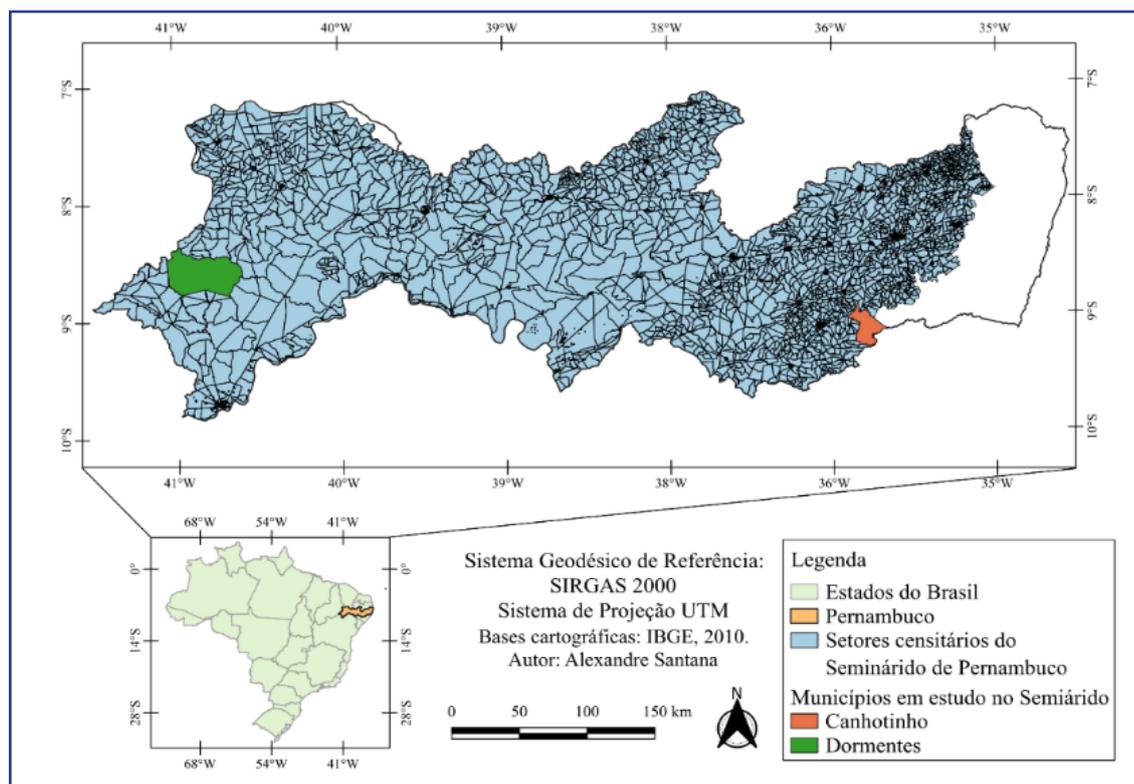
Para o cálculo dos índices foram consideradas duas estações pluviométricas: Dormentes e Canhotinho, localizadas na região do sertão e agreste do semiárido Pernambucano (PE), respectivamente (Figura 1). A nomenclatura destas estações correspondem aos nomes dos respectivos municípios.

Como o Estado de Pernambuco se localiza na região Nordeste do Brasil, este apresenta acentuada variabilidade interanual e intrassazonal, principalmente na distribuição da chuva, visto como exemplo nas Figuras 2 e 3 e Tabela 1, o que está relacionado diretamente aos sistemas meteorológicos atuantes na região (Kayano; Andreoli, 2009). Pela classificação de Köppen, PE é caracterizado pelo clima tropical úmido (predominante no litoral) e o semiárido (predominante no interior) (Alvares et al., 2013). Tanto as mesorregiões do sertão e do agreste aqui estudadas, são caracterizadas pelo clima semiárido.

O município de Dormentes, situado na região do Sertão pernambucano apresenta precipitação pluviométrica anual média de 493 mm de acordo com sua normal climatológica, e temperatura anual média de 26,7 °C (Tabela 1). Características semelhantes no perfil térmico anual são observadas em grande parte de sua área circunvizinha, representada pela coloração de vermelho mais intenso (Figura 2a), o qual compreende toda a porção oeste de Estado de PE e temperaturas anuais médias que variam de 25,1 a 27,1 °C. Já o perfil de distribuição pluviométrico, apresenta os

menores acumulados anuais encontrados na região semiárida do Estado de PE, as quais variam de 451 a 613 mm (Figura 2b).

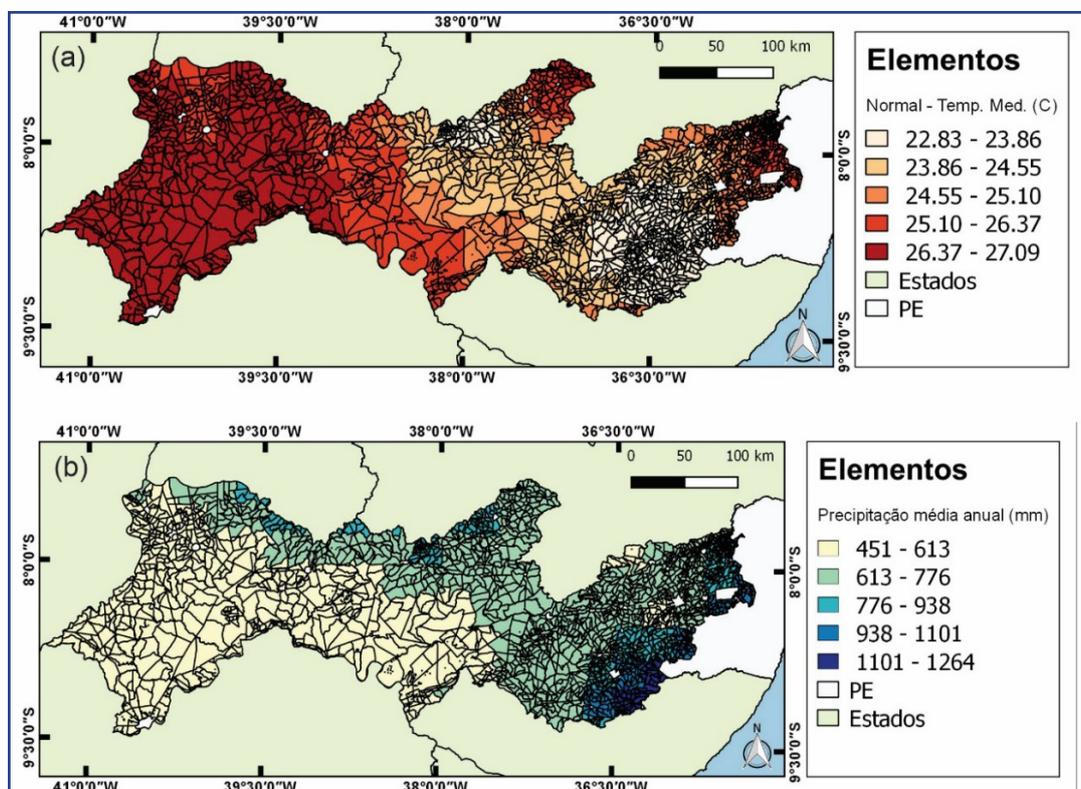
Figura 1 – Localização da área de estudo, municípios de Dormentes e Canhotinho, no Estado de Pernambuco, com as divisões censitárias



Fonte: Os Autores (2023)

Em relação ao município de Canhotinho, que está situado no extremo leste, na face sul da região semiárida do Estado, apresenta uma precipitação anual média de 964 mm, e temperatura anual média de 23,9 °C (Tabela 1). Portanto, na mesma região do semiárido do Estado de PE, Canhotinho em comparação a Dormentes, apresenta maiores acumulados anuais de chuva, com diferença de 471 mm, ou, incremento de 95,5%, e, menor temperatura média anual, a uma diferença de 2,8 °C. Nas áreas vizinhas a Canhotinho, a temperatura varia entre 22,8 e 23, 8 °C de acordo com a coloração de vermelho mais claro na Figura 2a, enquanto, o perfil climatológico para chuva anual média, é semelhante, variando de 938 a 1264 mm, de acordo com a coloração de azul mais escuro na Figura 2b.

Figura 2 – Temperatura média anual (°C) e chuva anual acumulada (mm) em Pernambuco no período de 1980-2016



Fonte: Os Autores (2023)

Tabela 1 - Média anual de temperatura máxima (TM_{máxima}), mínima (TM_{mínima}) e média (TM_{média}) e chuva para Dormentes e Canhotinho no Estado de Pernambuco, no período de 1980-2016

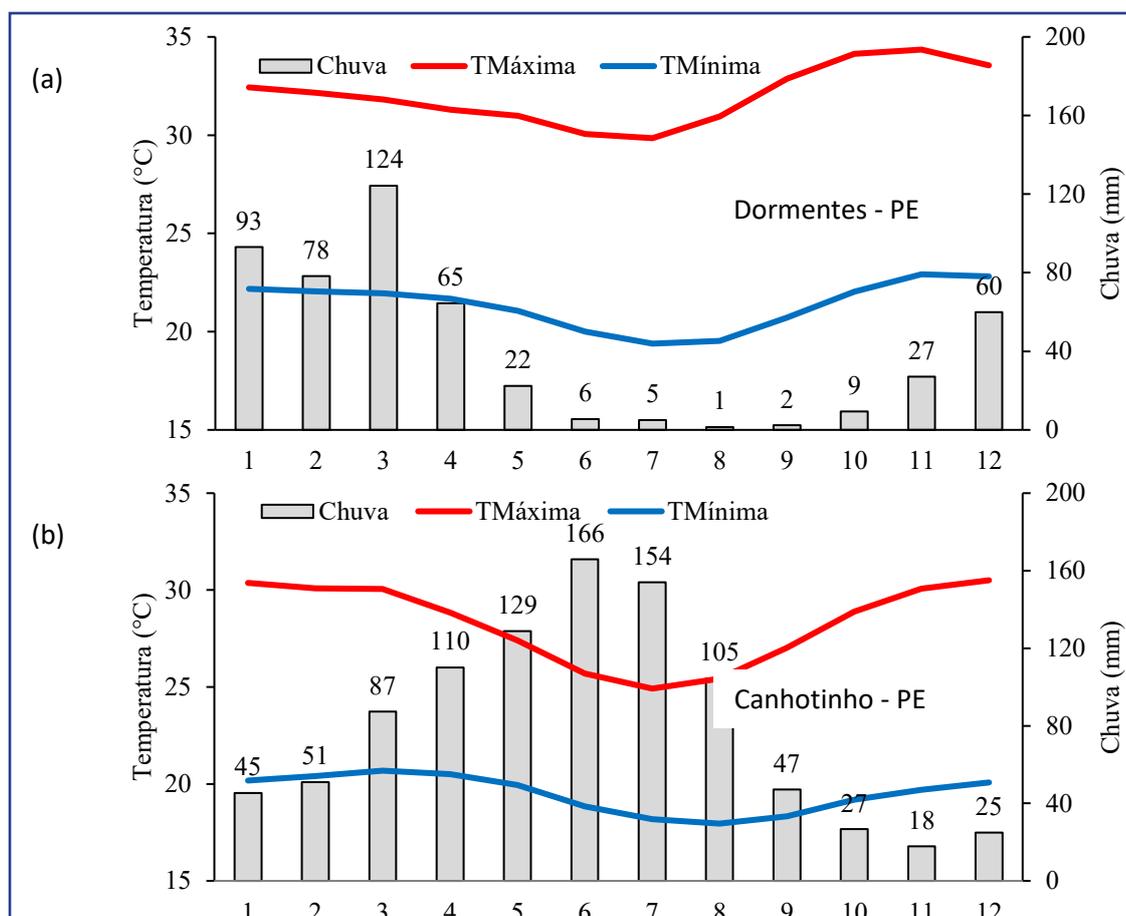
Local	TM _{máxima} (°C)	TM _{mínima} (°C)	Tm _{média} (°C)	Chuva (mm)
Dormentes	32,0	21,4	26,7	493
Canhotinho	28,3	19,5	23,9	964

Fonte: Os autores (2023)

Na Figura 3 são apresentados os perfis da normal climatológica mensal dos dados de temperatura máxima e mínima do ar e chuva para as cidades de Dormentes e Canhotinho no semiárido de PE. A região de Dormentes entre os meses de janeiro a abril registra os maiores índices de chuva na região (93, 78, 124 e 65 mm, janeiro a abril, respectivamente). Por outro lado, o inverno e primavera são o período mais seco

do ano (6, 5, 1, 2, 9 e 27 mm, junho a novembro, respectivamente). Já em Canhotinho, as chuvas ocorrem ao longo do ano, com um curto período de menores acumulados na primavera (47, 27, 18, 25 e 45 mm, setembro a janeiro, respectivamente). A partir de fevereiro tem-se maiores acumulados, atingindo picos no mês de junho (166 mm), quando a porção leste do Estado se encontra na estação chuvosa. As temperaturas máximas na região de Dormentes são registradas nos meses de outubro e novembro, com 34,1 e 34,4 °C e, as mínimas nos meses de julho e agosto, com valores de 19,4 e 19,5 °C, respectivamente. Para Canhotinho, as máximas mensais são registradas nos meses de dezembro e janeiro, com 30,4 e 30,5 °C e, as mínimas nos meses de julho e agosto, de 18,0 e 18,1 °C, respectivamente.

Figura 3 – Médias mensais das temperaturas máximas (°C; linha vermelha) e mínimas (°C; linha azul) e chuva mensal acumulada (mm; barras) em: a) Dormentes; e b) Canhotinho, no Estado de Pernambuco, no período de 1980-2016



Fonte: Os Autores (2023)

Dados utilizados

Os dados diários de chuva, temperatura máxima e temperatura mínima, para o período de 1980-2016, foram obtidos a partir da base de dados de Xavier, King e Scanlon (2015; 2016). O conjunto de dados usado no presente trabalho inclui dados diários observados coletados de medidores de chuva, bem como estações meteorológicas convencionais e automáticas do período de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2016. Os tipos de dados meteorológicos são temperatura máxima (T máx, °C), temperatura mínima T min, °C), precipitação (pr, mm) de estações automáticas. Também foi incluído dois indicadores da qualidade de cada célula da grade: o número de estações incluídas com dados e a distância geodésica da estação de relatório mais próxima com dados. As fontes dos dados são provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, a Agência Nacional de Águas - ANA; e o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo - DAEE. Tabela 1 mostra o número de estações meteorológicas por grande das bacias hidrográficas do Brasil (Xavier et al., 2016). Além de ser uma série histórica climatológica, com mais de 30 anos de dados, período mínimo recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para análises sobre clima, estudos posteriores tem mostrado que seus dados se aproximam dos dados observados em estações de superfície (Bender; Sentelhas, 2018; Battisti; Bender; Sentelhas, 2019).

Índices de extremos e tendências analisadas

Foram analisados indicadores anuais de extremos climáticos de temperatura e chuva que vem sendo amplamente utilizados, inclusive nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), definidos por um grupo de especialistas em detecção e índices de mudanças climáticas (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices - ETCCDI*). Estes índices são baseados nos valores diários de temperatura e chuva e, apontam as características dos extremos climáticos, tais como, frequência e intensidade, para constatar mudanças nos padrões de tempo e clima local, regional e mesmo global (Frich et al., 2002; Peterson; Manton, 2008; Zhang et al., 2011). Os índices considerados no presente estudo, foram escolhidos com base nos extremos

de temperatura e chuva que ocorrem na região de estudo, observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices de extremos climáticos de temperatura e chuva, com suas unidades e descrição

Índice climático (unidade)	Descrição
TN10p (%) - Noites frias	% de dias no ano com temperatura mínima abaixo do percentil 10
TN90p (%) - Noites quentes	% de dias no ano com temperatura mínima acima do percentil 90
TX10p (%) - Dias frios	% de dias no ano com temperatura máxima abaixo do percentil 10
TX90p (%) - Dias quentes	% de dias no ano com temperatura máxima acima do percentil 90
DCS (dias) - Dias consecutivos secos	Nº máximo de dias consecutivos no ano com chuva < 1 mm
DCU (dias) - Dias consecutivos úmidos	Nº máximo de dias consecutivos no ano com chuva ≥ 1 mm
PRCPTOT (mm) - Chuva total	Chuva acumulada no ano
R95p(mm)- Chuva em dias muito úmidos	Quantidade total anual de chuva acima do percentil 95
RX5day (mm)- Chuva máxima em 5 dias	Quantidade máxima anual de chuva acumulada em 5 dias consecutivos
R10(dias)- Nº de dias com chuva ≥ 10 mm	Nº de dias por ano com chuva ≥ 10 mm
R20(dias)- Nº de dias com chuva ≥ 20 mm	Nº de dias por ano com chuva ≥ 20 mm
R30(dias)- Nº de dias com chuva ≥ 30 mm	Nº de dias por ano com chuva ≥ 30 mm

Fonte: Os autores (2023). *Nº - Número; % - Porcentagem

Para o cálculo dos índices foi utilizado o *software ClimPACT2* (Alexander; Herold, 2016), que é baseado no *software RCLimDex* (Zhang; Yang, 2004), um código em linguagem R disponibilizado pelo ETCCDI. O *software* fornece, para todos os índices, tendência linear anual calculada pelo método dos mínimos quadrados, erro padrão de estimativa e nível de significância estatística da tendência (valor p). No estudo foram consideradas significativas as tendências, que apresentaram nível de significância de 95% ($p \leq 0,05$).

Índice de Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI)

O Índice de Precipitação Padrão ou Standardized Precipitation Index (SPI), foi desenvolvido por com o propósito de analisar eventos de seca em relação às características temporais das precipitações (Mckee et al., 1993). O cálculo do SPI envolve a normalização dos dados de precipitação, utilizando uma distribuição gama como modelo inicial e transformando-os subsequentemente em uma distribuição normal com média zero e variância unitária. Isso é realizado mediante o processamento de

um conjunto de dados que representa a soma das precipitações ao longo de vários meses, sendo a distribuição gama a função de densidade de probabilidades mais comumente empregada, conforme definido nas Equações 1 a 8.

$$f_x(x) = \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\eta-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\theta\Gamma(\eta)} \text{ para } x, \theta \text{ e } \eta > 0 \quad (1)$$

$$F_x(x) = \int_0^x \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\eta-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\theta\Gamma(\eta)} dx \text{ para } x, \theta \text{ e } \eta > 0 \quad (2)$$

$$\Gamma(\eta) = \int_0^{\infty} y^{\eta-1} \exp(-y) dy \quad (3)$$

$$\eta = \frac{1}{4} (1 + \sqrt{1 + 4A/3}) \quad (4)$$

$$A = \ln(x) - \Sigma(\ln(P))/n \quad (5)$$

$$H(x) = q + (1-q) f(x) \quad (6)$$

$$q = m/n \quad (7)$$

$$SPI = \varphi^{-1}(F(x)) \quad (8)$$

Em que: Γ é a função gama; θ é o parâmetro de escala de tempo da distribuição gama; η é o parâmetro de forma da distribuição gama; x é a variável de precipitação anual; P é o total de precipitação no tempo de análise; n é o número de observações com chuva maior do que zero; q é a probabilidade de ocorrência de precipitação zero; m - número de observações com chuva igual a zero; φ é a função de distribuição normal reduzida

Tabela 3 – Classificação dos valores do SPI

Classe	SPI
Seca extrema	<-2.0
Seca severa	-2.0 a -1.5
Seca moderada	-1.5 a -1.0
Seca leve	-1.0 a 0.0

Fonte: Mckee *et al.* (1993)

A determinação do valor do SPI depende de uma escala de tempo (denotada por “ θ ”), que se refere ao período de acumulação das precipitações, e envolve a utilização de quantis derivados da distribuição normal acumulada. Essa abordagem

leva em consideração a chuva acumulada durante uma série histórica. Os resultados obtidos podem ser classificados de acordo com a Tabela 3, que define as categorias para eventos de seca ocorridos nos anos de estudo.

Índice de Aridez - IA

O Índice de Aridez consiste em medida que indica o grau de aridez de uma determinada região com base na disponibilidade de água e na demanda climática (Matallo Júnior; Schenkel, 2003). Neste contexto, é possível compreender o quanto uma região é árida, bem como a intensificação da aridez, a partir de uma série histórica climática. Assim, a estimativa do IA é realizada a partir da Equação 9, proposta pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 1992), para classificar locais susceptíveis aos processos de desertificação.

$$IA = \frac{PMA}{EMA} \quad (9)$$

Em que: PMA consiste na precipitação média anual para o período de análise; EMA consiste na evaporação média anual para o mesmo período de análise

Dessa forma, o Índice de Aridez (IA) foi calculado para os municípios de Dormentes e Canhotinho, a partir dos dados de precipitação anuais da série histórica em estudo. Foram estimados os valores do referido índice para todos os anos do período de estudo, possibilitando verificar a dinâmica temporal da intensidade de aridez. Com isso, os municípios em questão, diante dos valores anuais de IA, foram classificados quanto ao clima, conforme é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação dos valores de IA

Classes Climáticas	Índice de Aridez
Úmido	$IA \geq 1,00$
Subúmido Úmido	$0,65 < IA < 1,00$
Subúmido Seco	$0,50 < IA \leq 0,65$
Semiárido	$0,20 < IA \leq 0,50$
Árido	$0,05 < IA \leq 0,20$
Hiperárido	$IA \leq 0,05$

Fonte: UNEP (1992)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tendências dos índices de extremos de temperatura e chuva para as localidades analisadas no presente estudo, estão resumidos na Tabela 5, indicado também seu nível de significância. Na sequência, será apresentada a variabilidade temporal observada discutindo os dados obtidos, que possibilita identificar como os extremos de temperatura e de chuva tem variado em Dormentes e Canhotinho, no período de 1980 a 2016.

Tabela 5 – Tendências dos índices de extremos de temperatura e precipitação para as duas localidades analisadas no Estado de Pernambuco

Índice climático (unidade)	Dormentes - Sertão	Canhotinho - Agreste
TN10p (%) - Noites frias	-0,800*	-0,755*
TN90p (%) - Noites quentes	0,780*	-0,038
TX10p (%) - Dias frios	-0,411*	-0,322*
TX90p (%) - Dias quentes	0,507*	0,297
DCS (dias) - Dias consecutivos secos	-0,593	0,379
DCU (dias) - Dias consecutivos úmidos	-0,230*	-0,885*
PRCPTOT (mm) - Chuva total	-2,246	0,473
R95p (mm) - Chuva em dias muito úmidos	-0,700	4,705
RX5day (mm) - Chuva máxima em 5 dias	-0,138	0,585
R10 (dias) – N° de dias com chuva ≥ 10 mm	-0,055	0,238
R20 (dias) – N° de dias com chuva ≥ 20 mm	0,003	0,115
R30 (dias) – N° de dias com chuva ≥ 30 mm	0,001	0,057

* Indica que o valor da tendência é significativo ao nível de significância de 95% ($p \leq 0,05$); N° - número

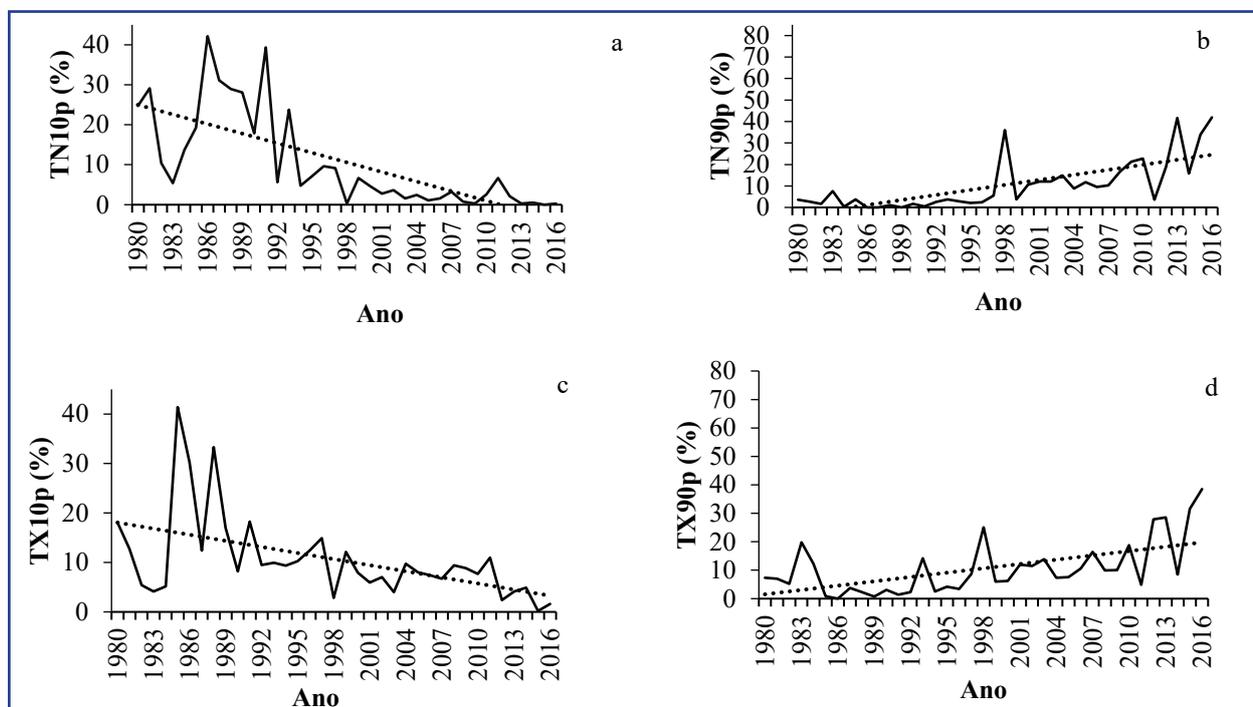
Índices de extremos de temperatura

As séries temporais dos índices extremos de temperatura, referentes as tendências de noites frias (TN10p), noites quentes (TN90p), dias frios (TX10p) e dias quentes (TX90p), para Dormentes e Canhotinho, são mostradas nas Figuras 4 e 5, respectivamente. O índice TN10p em Dormentes e Canhotinho apresentou tendência de redução de noites frias, a uma taxa de -0,800% e -0,755% ao ano, respectivamente,

ambos com nível de significância de 5% (Figuras 4a e 5a, Tabela 5). Em concordância com a diminuição de noites frias, o índice de noites quentes (TN90p), apresentou tendência de aumento apenas na região de Dormentes, (Figura 4b) a uma taxa de 0,780% ao ano, sendo essa tendência significativa ao nível de significância de 5%.

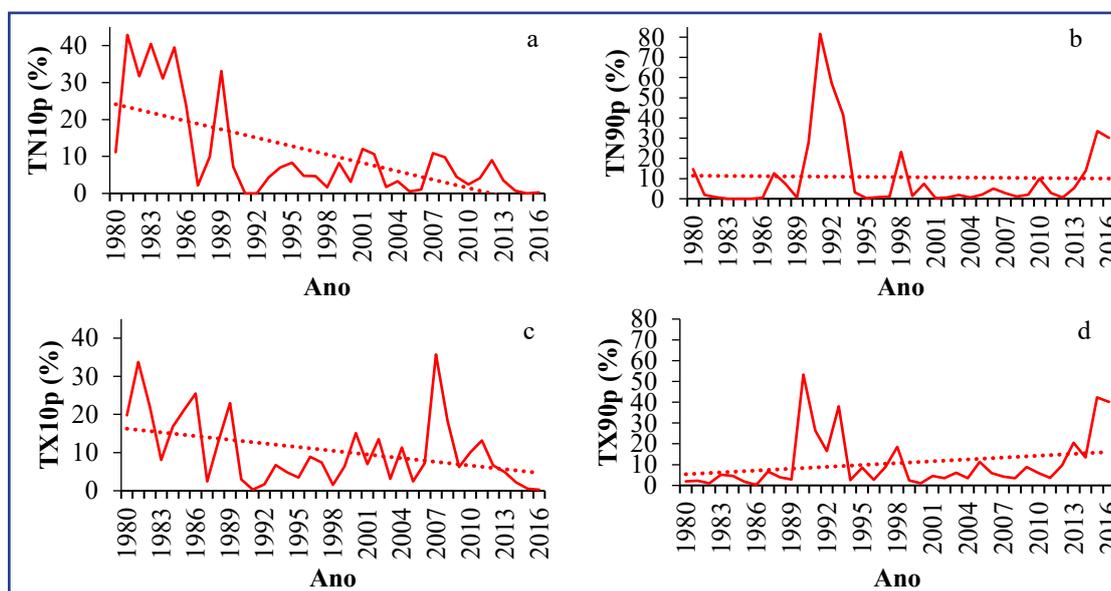
Ao passo que foi observada redução de dias frios (TX10p), a uma taxa de -0,411% e -0,322%, (Figuras 4c e 5c), e tendência de aumento dos dias quentes (TX90p) da ordem de 0,507% e 0,297% ao ano (Figuras 4d e 5d) ao ano, em Dormentes e Canhotinho, respectivamente. Apenas o valor de TX90p em Canhotinho não foi significativo ao nível de significância de 5%, conforme detalhado na Tabela 5. Deste modo, há uma consistência quanto ao aspecto de aquecimento aqui observado, indicando maior frequência de noites e dias quentes e menor número de noites e dias frios, com a temperatura mínima apresentando maiores taxas de aumento.

Figura 4 – Tendência nas frequências (em %) de: (a) noites frias (TN10p), (b) noites quentes (TN90p), (c) dias frios (TX10p), e (d) dias quentes (TX90p) em Dormentes, Pernambuco



Fonte: Os Autores (2023)

Figura 5 – Tendência nas frequências (em %) de: (a) noites frias, (TN10p), (b) noites quentes (TN90p), (c) dias frios (TX10p) e (d) dias quentes (TX90p) em Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Os Autores (2023)

Esse padrão de tendências de aumento nos extremos quentes e redução nos extremos frios, corroboram com o aquecimento global (IPCC, 2021). Ademais, como já identificado em estudos anteriores, realizados em diversas regiões, o aumento da temperatura mínima é maior do que a temperatura máxima, reduzindo a amplitude térmica diária, condicionando ambiente mais quente (Easterling et al., 1997; Vose; Easterling; Gleason, 2005; Gil-Alana, 2018).

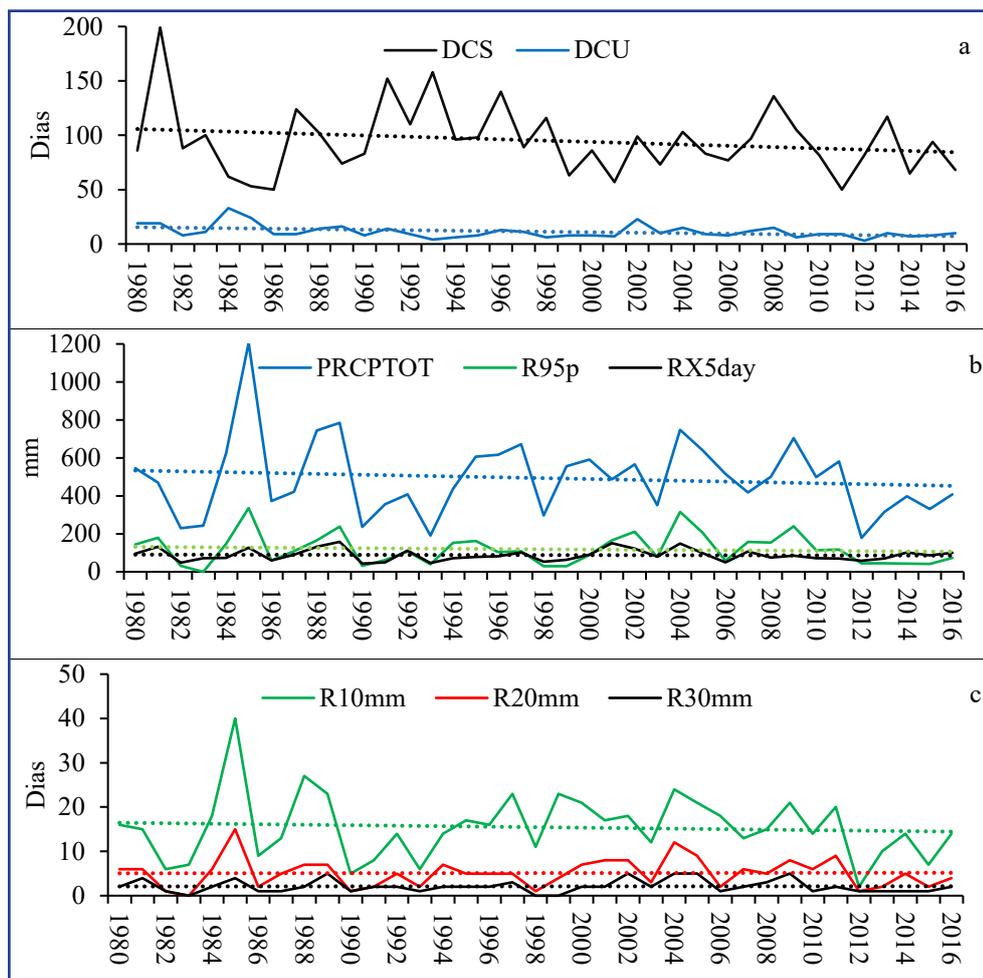
Índices de extremos de chuva

As Figuras 6 e 7 mostram as séries temporais observadas dos índices extremos de chuva, referente aos dias consecutivos secos (DCS), dias consecutivos úmidos (DCU), chuva total (PRCPTOT), chuva em dias muito úmidos (R95p), chuva máxima em 5 dias (RX5day), e número de dias com chuva acima de 10, 20 e 30 mm (R10, R20 e R30), para Dormentes e Canhotinho, respectivamente. Conforme a Tabela 5, apenas o índice DCU apresentou tendência significativa a nível de significância de 5%.

Na análise de tendência de dias consecutivos secos (DCS), observa-se que,

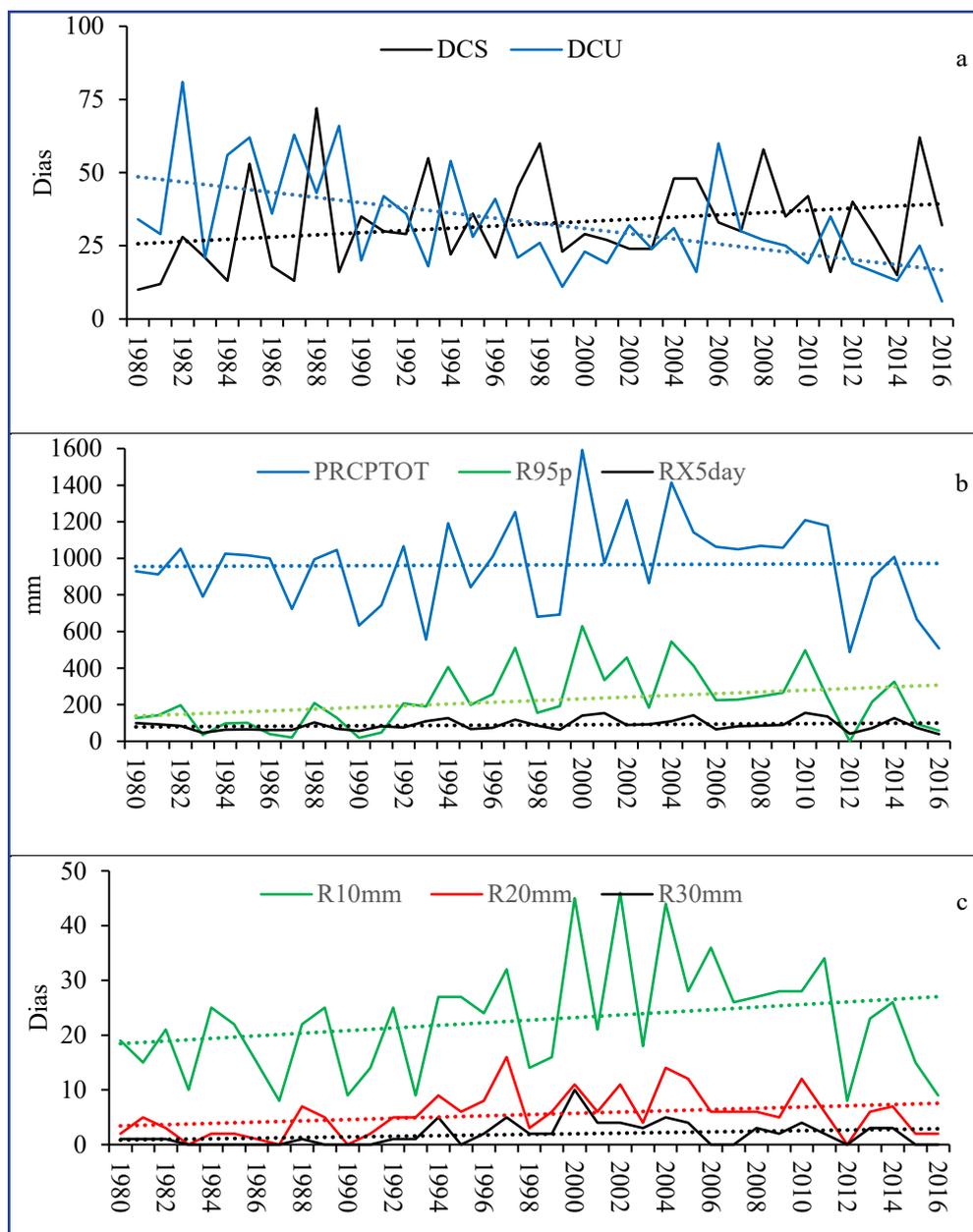
Dormentes apresenta tendência de redução no número de dias consecutivos secos, a uma taxa de -0,593 dias ao ano, enquanto Canhotinho apresenta tendência de aumento no mesmo período, de 0,379 dias ao ano (Figuras 6a e 7a, Tabela 5). Quanto ao índice DCU, Dormentes e Canhotinho, apresentaram tendência significativa de redução no número de dias consecutivos úmidos, a uma taxa de -0,230 dias e -0,885 dias ao ano, respectivamente. A chuva total acumulada no ano (PRCPTOT, Figuras 6b e 7b, Tabela 5), apresenta tendência de redução em Dormentes e aumento em Canhotinho, a uma taxa de -2,246 mm e 0,473 mm ao ano, respectivamente.

Figura 6 – Tendências da duração (em dias) de dias consecutivos secos (DCS) e dias consecutivos úmidos (DCU) (a); intensidade (em mm) de chuva total (PRCPTOT), chuva em dias muito úmidos (R95p) e chuva máxima em 5 dias (RX5day) (b); e frequência (em dias) de dias com chuva acima de 10, 20 e 30 mm (R10, R20 e R30) (c), em Dormentes, Pernambuco



Fonte: Os Autores (2023)

Figura 7 – Tendências da duração (em dias) de dias consecutivos secos (DCS) e dias consecutivos úmidos (DCU) (a); intensidade (em mm) de chuva total (PRCPTOT), chuva em dias muito úmidos (R95p) e chuva máxima em 5 dias (RX5day) (b); e frequência (em dias) de dias com chuva acima de 10, 20 e 30 mm (R10, R20 e R30) (c), em Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Os autores (2023)

Deve-se ter atenção especial ao fato dos DCU, apresentarem redução significativa, um parâmetro geralmente negligenciado nos estudos. A redução no número de dias com chuva agrava o efeito da disponibilidade hídrica devido a descontinuidade das

chuvas (menor frequência) e impacta negativamente as culturas agrícolas (Sanches et al., 2019). Os DCU também exercem influência no escoamento superficial das áreas de captação de tecnologias de recursos hídricos, impactando diretamente na quantidade de água armazenada (Santana; Paiva; Santos, 2015).

Assim, a redução dos dias consecutivos úmidos (DCU), observada em ambas as cidades também demonstra uma atenção especial para a eficiência de tecnologias de captação e armazenamento de água. Neste caso, as políticas de gestão hídrica necessitam ser reavaliadas e ajustadas à luz dessas mudanças climáticas, a fim de garantir que as estruturas e técnicas de armazenamento de água pluvial, amplamente utilizadas no semiárido, mantenham sua eficiência e funcionalidade em cenários de precipitação mais errática e reduzida.

Os índices que representam a chuva anual acumulada em dias úmidos (R95p) e em 5 dias consecutivos (RX5day), mostram tendência negativa de -0,700 mm e -0,139 mm ao ano em Dormentes, e tendência positiva de 4,705 mm e 0,585 mm ao ano em Canhotinho (Figuras 6b e 7b). Nas Figuras 6c e 7c, os índices que representam os dias com chuvas, R10, R20, e R30, apresentaram estabilidade, com leves tendências positivas para o número de dias com chuvas acima de 10, 20 e 30 mm (exceto em Dormentes para R10), a uma taxa de -0,055 dias 0,003 dias e 0,001 dias ao ano em Dormentes e 0,238 dias, 0,115 dias e 0,057 dias ao ano em Canhotinho, respectivamente. Em geral, na região do sertão pernambucano, de acordo com Farias, Alves e Nóbrega (2012), há a predominância de tendência positiva entre 1979 a 2010, no aumento nos totais pluviométricos, especificamente na área da bacia do rio Pajeú. Neste estudo, assim como foi registrado no município de Canhotinho entre 1980 e 2016, há esse potencial de elevação na pluviometria total local.

O aumento no total anual de chuva em Canhotinho, com redução significativa nos dias consecutivos úmidos, está relacionado com o aumento na frequência e intensidade de eventos extremos. Resultado similar foi encontrado na Região Metropolitana de São Paulo (Marengo et al., 2020a), onde as chuvas intensas têm se concentrado em poucos dias, separados por períodos mais longos de seca.

Considerando que os índices R95p e RX5day estão relacionados a chuvas intensas, a exemplo do que foi identificado em Canhotinho, com tendência de aumento de 4,705 mm e 0,585 mm ao ano (Figura 7b e Tabela 5). Estas podem resultar em maiores impactos em ambiente urbano, devido ao processo de impermeabilização de superfícies, dificultando a infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial e inundações (Rodrigues et al., 2021; Marengo et al., 2023).

Por outro lado, Dormentes historicamente com chuvas irregulares e escassas, mostra tendência de redução no acumulado total (e principalmente, redução na intensidade dos eventos de chuva como visto na Tabela 5), aumentando o risco de secas e estiagens que tem seus impactos na produção de alimentos, na geração de energia e à saúde das populações (MMA, 2017). Os eventos de seca do Nordeste brasileiro, tem sido associado ao El Niño e aquecimento do Oceano Atlântico tropical Norte, resultando em um aumento da vulnerabilidade social da região (Cunha et al., 2018; Marengo et al., 2018; Medeiros; Oliveira, 2021; Marengo et al., 2018). Considerando que grande parte da agricultura na região Nordeste do país é de sequeiro, a falta de chuvas ocasiona impactos devido a secas severas aumentando assim a vulnerabilidade hídrica na região. Somado a isso, a seca das últimas 2 décadas foi de intensidade e impacto econômico e social nunca antes vista (Marengo et al., 2018; Sanches et al., 2019; Carvalho et al., 2020), sendo inclusive identificado as maiores perdas agrícolas no bioma caatinga, muito em função da seca e mesmo a estiagem serem desastres recorrentes.

Portanto, os resultados encontrados concordam parcialmente com as previsões realizadas para a sub-região Nordeste da América do Sul (IPCC, 2021) que abrange o Nordeste brasileiro que indica alta confiança de que haverá aumento na duração da seca e, confiança média de que aumentarão a intensidade e frequência das chuvas extremas.

Essas alterações nos extremos de chuva e temperatura, podem estar relacionados a variabilidade natural do clima, ou ainda ao aumento nas emissões de gases de efeito estufa na atmosfera pelas atividades antrópicas (Marengo et al., 2020a), mas, mecanismos de escala regional também podem exercer influência no ambiente, a exemplo, mudanças no uso e cobertura do solo (Tomasella et al., 2018). Embora

os índices de chuva não tenham se mostrado significativos em suas tendências de aumento ou diminuição (exceto para o índice DCU), os resultados evidenciam um aumento nas disparidades regionais do padrão de distribuição da chuva. Já os índices de temperatura apresentaram na sua maioria, tendências significativas de aquecimento (máxima e mínima). A maior incerteza em relação a mudança nos índices de chuva corrobora com trabalhos anteriores (Bender; Sentelhas, 2018; IPCC, 2021).

Índice de Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI)

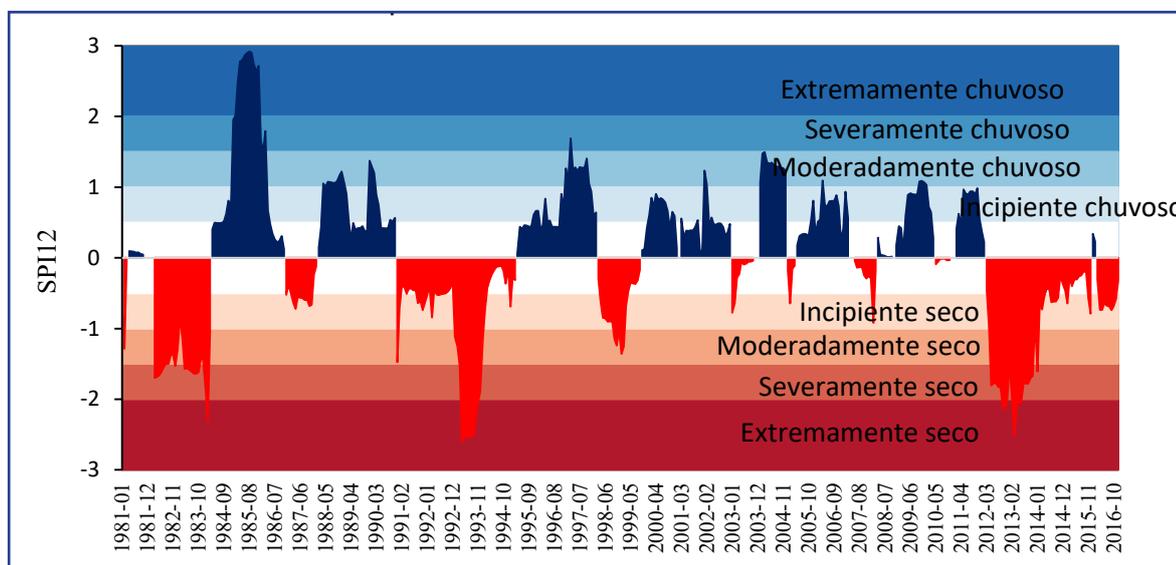
Adicionalmente, para dar maior suporte aos índices de extremos climáticos, foi calculado o SPI, considerando que o mesmo pode ser utilizado para auxiliar na quantificação e no monitoramento de condições associadas a secas e excesso de chuva em diferentes escalas de tempo (McKee; Doesken; Kleist, 1993). Os eventos climáticos representado por valores de SPI superiores/inferiores a 0,5/-0,5, indicando o início do período chuvoso/seco.

As Figuras 8 e 9, mostram a variabilidade do SPI para as regiões de Dormentes e Canhotinho, respectivamente, com a área em azul/vermelha indicando condições úmidas/secas. Em conformidade com Cunha et al. (2018), os episódios de 1982-1983, 1992-1993, 1997-1998 e 2012-2016, foram os eventos secos de maior intensidade que afetaram a região, sendo este último, o mais intenso, duradouro e abrangente (Marengo; Torres; Alves, 2017; Cunha et al., 2018; Marengo et al., 2018). O índice SPI em Dormentes, indica tendência negativa (embora não significativa), o que sugere um aumento na frequência de eventos secos nos últimos anos.

Especificamente para o estado de Pernambuco, em estudo de Guedes et al. (2016) considerando um período de tempo maior, o SPI apontou que os principais eventos chuvosos críticos que ocorreram no estado foram diagnosticados como eventos chuvosos de categoria moderada nos anos de 1963 a 1973 e de chuva severa em 1984. Ademais, os eventos secos ocorreram nas categorias extrema em 1993, 1998 e 2012. Estes resultados também corroboram com alguns dados obtidos para Dormentes e

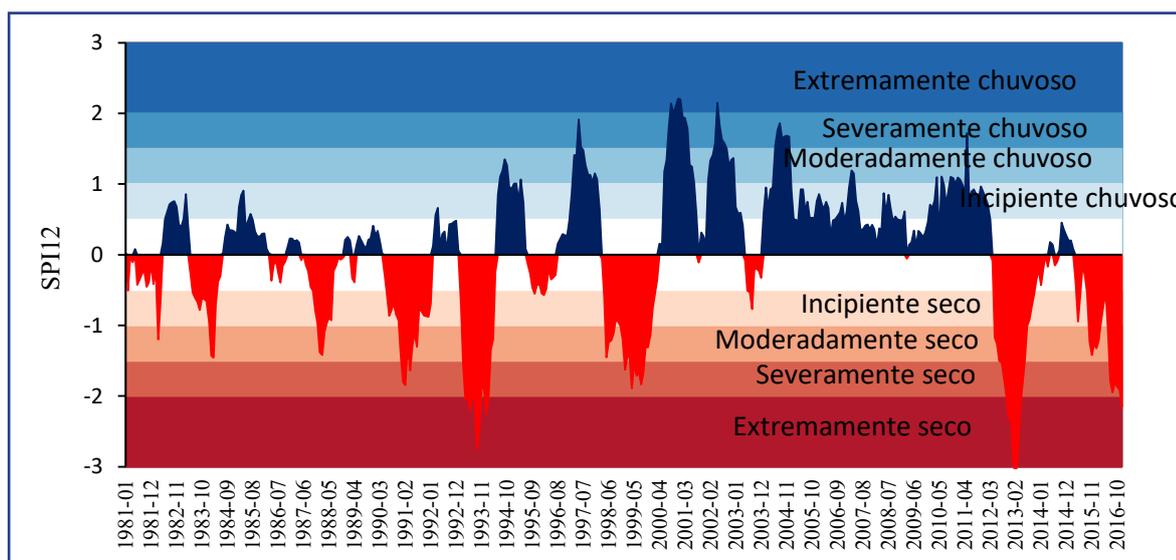
Canhotinho, onde os períodos de seca também acompanharam parcialmente os eventos registrados no estado todo, conforme apontou Guedes et al. (2016).

Figura 8 – Série temporal mensal do SPI em escala de 12 meses no período de 1981-2016 para Dormentes, Pernambuco



Fonte: Os Autores (2023)

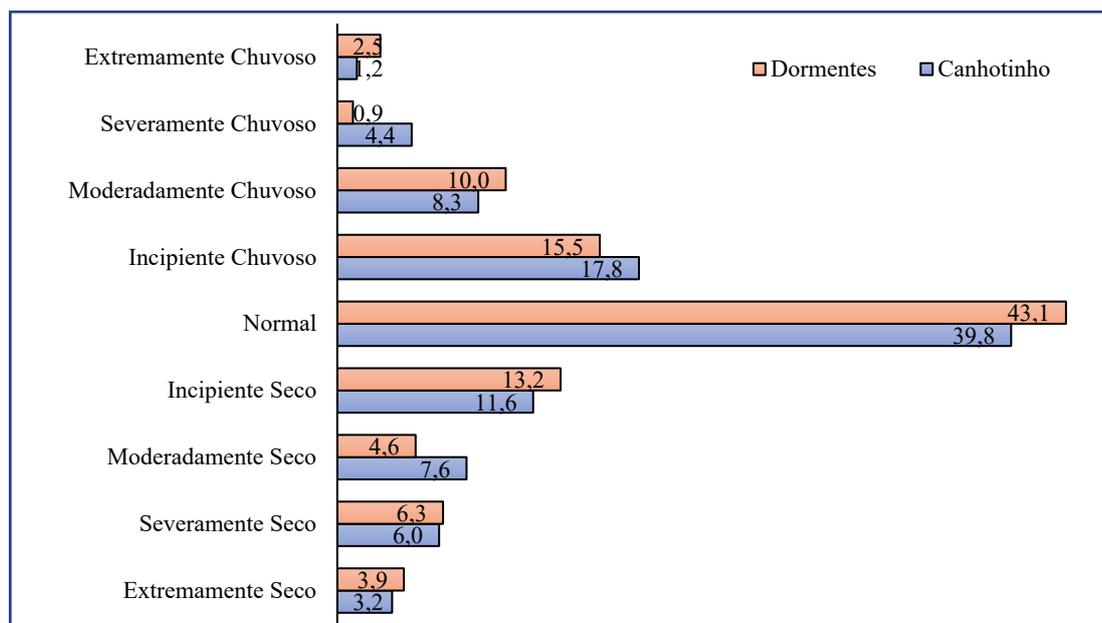
Figura 9 - Série temporal mensal do SPI em escala de 12 meses no período de 1981-2016 para Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Os Autores (2023)

Na Figura 10, observa-se que para Dormente, predominam eventos que se enquadram na categoria normal (43,1%), ao passo que as categorias incipiente, moderada, severa e extrema para os eventos secos e chuvosos apresentam frequências de 13,2%; 4,6%; 6,3% e 3,9% e, 15,5%; 10,0%; 0,9% e 2,5%, respectivamente. Portanto, o número de ocorrências dos eventos secos (28,0%) e chuvosos (28,9%) são similares, no entanto, as secas de maiores/menores intensidades, a exemplo das categorias severa e extrema/incipiente e moderada são mais/menos frequentes se comparados aos eventos chuvosos na mesma categoria.

Figura 10 - Frequência dos eventos secos e chuvosos (%) de acordo com o SPI (1981-2016), para Dormentes e Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Os Autores (2023)

Para Canhotinho também predominam eventos na categoria normal (39,8%) ao passo que as categorias incipiente, moderada, severa e extrema para os eventos secos e chuvosos apresentam frequências de 11,6%; 7,6%; 6,0% e 3,2% e, 17,8; 8,3%; 4,4% e 1,2%, respectivamente (Figura 10). Portanto, para a região do agreste ocorre a predominância de eventos chuvoso (31,7%), em comparação aos eventos de seca (28,5%), porém, as chuvas na sua maioria, concentram-se nas categorias incipiente e moderada.

A disparidade entre os padrões de chuva, com tendência de redução dos índices R95p e RX5day em Dormentes e aumento em Canhotinho, reforça a necessidade de políticas públicas que levem em consideração as particularidades climáticas e hidrológicas de cada microrregião. Essas variações inter-regionais indicam que o planejamento de ações adaptativas deve ser sensível às especificidades locais, uma vez que a ocorrência de eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e secas prolongadas, afeta de maneira desigual as diferentes áreas do estado.

Índice de Aridez - IA

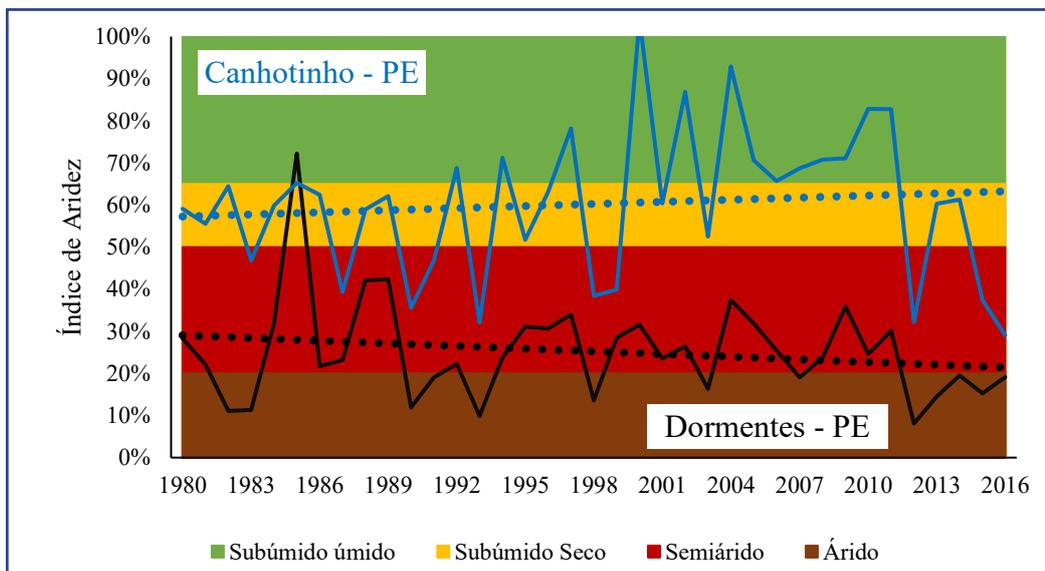
Considerado que a classificação de terras suscetíveis ao processo de desertificação pode ser determinado com o Índice de Aridez obtido a partir do quociente entre a chuva total anual e a evapotranspiração potencial total anual (UNEP, 1992), um ambiente condicionado a índices pluviométricos decrescentes (-22,46 mm/década, Tabela 2 e Figura 6), no qual o aumento da temperatura média (a uma taxa de 0,50 °C/década) induz a uma maior taxa de evapotranspiração, o que implica em menor índice de aridez, e maior suscetibilidade a desertificação, a exemplo do que se observa em Dormentes, de acordo com a Figura 11. Já na região de Canhotinho, historicamente com maiores acumulados de chuva (somado a tendência de aumento, a uma taxa de 4,73 mm/década, Tabela 2 e Figura 7), a taxa decrescente na evapotranspiração (a uma taxa de -30,82 mm/década), induz a um índice de aridez crescente, reduzindo ainda mais a suscetibilidade a degradação.

Considerando, áreas suscetíveis à desertificação, aquelas com índice de aridez variando entre 5 até 65%. A suscetibilidade pode variar de muito alta (5% a 20%), alta (21 a 50%) até moderada (51 até 65%), de acordo com o próprio índice de aridez, isto é, quanto mais seco mais susceptível à desertificação (UNEP, 1992). Portanto a região de Dormentes, com regime de chuvas concentrado em poucos meses, marcado por forte irregularidade interanual e com temperatura média de 26,7°C, que determina altas taxas de evapotranspiração, configurando déficit hídrico, apresenta tendência de transição de área semiárida para árida, colocando-a em uma condição de elevado risco

(alto e muito alto) à desertificação. Enquanto Canhotinho, com tendência de transição da área subúmida seca para subúmida úmida, está em uma condição de moderado risco (moderado e baixo) à degradação.

Ademais, como por ser visualizado para Canhotinho, com dados representados pela linha azul na Figura 11, são revelados picos de aridez mais elevados, como em 1986 e 1998, seguidos por anos com melhores condições, próximos ao subúmido úmido. No entanto, a maior parte dos valores situa-se nas faixas de subúmido úmido e subúmido seco, indicando um clima relativamente mais ameno, com menor suscetibilidade à desertificação. Essas oscilações refletem o regime pluviométrico mais favorável de Canhotinho, que se encontra em uma área do estado com características climatológicas mais úmidas.

Figura 11 - Variabilidade interanual do índice de aridez e tendência climática à desertificação para Dormentes e Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Os Autores (2023)

Em contrapartida, em Dormentes, com dados representados pela linha preta na Figura 11, é possível visualizar uma tendência mais constante de aridez elevada, com valores que frequentemente se situam nas faixas de semiárido e árido. Em anos como 1983, 1992 e 2013, os índices indicam uma situação de aridez severa, típica das condições climáticas do sertão pernambucano. A tendência de maior aridez

em Dormentes reflete as características do semiárido, onde a escassez hídrica é uma constante, tornando a região mais vulnerável à desertificação. Essa dinâmica é preocupante, pois sugere que, em anos de seca prolongada, os impactos negativos podem ser exacerbados, afetando tanto os ecossistemas quanto as populações locais.

Na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, em Pernambuco, que também abrange áreas de semiárido, segundo Silva et al. (2019) também foram registrados ambientes semiáridos secos com níveis de susceptibilidade oscilando entre muito alta e alta, 1962-2015. Este cenário também pode ser visualizado no município de Dormentes, no sertão pernambucano, evidenciando que a problemática da desertificação, também assola outras áreas do estado.

Soma-se ao risco do aumento das áreas semiáridas e surgimento de áreas áridas (Marengo et al., 2020b), a redução da produção, perda de biodiversidade e a degradação dos ecossistemas, principalmente em áreas de pastagem e caatinga, como é o caso do estado de Pernambuco (Vieira et al., 2015; Tomasella et al., 2018). Ademais, os riscos são acelerados por eventos de seca mais intensos, longos e abrangentes que tem sido observados nos anos de 2012 a 2018 (Brito et al., 2018; Cunha et al., 2019).

4 CONCLUSÕES

As análises de tendência dos índices de temperatura indicam aumento de temperatura, sendo os valores encontrados quando significativos, muito próximos para ambos os locais de estudo. Tanto Dormentes quanto Canhotinho apresentaram tendência significativa negativa de noites frias (TN10p) - 0,800 % e - 0,755 e dias frios (TX10p) - 411 % e - 0,322, ao passo que tendência significativa positiva de noites quentes (TN90p) e dias quentes (TX90p) foi observada apenas em Dormentes, 0,78 % e 0,507%.

Quando significativas, as tendências de diminuição das noites frias (TN10p) foi mais acentuada que a de dias frios (TX10p), assim como, o aumento das noites quentes (TN90p) mais expressivo que a de dias quentes (TX90p), portanto, um aumento mais pronunciado em relação a temperatura mínima e redução da amplitude térmica diária. Além disso, Dormentes apresenta valores de tendência de aquecimento mais

pronunciado quando comparada a Canhotinho, historicamente com temperatura média de 26,7°C e 23,9°C, e aumento a uma taxa de 0,5°C/década e 0,3°C/década, respectivamente, o que indica tendência de maiores temperaturas no semiárido, que já é climatologicamente mais quente.

Quanto a tendência dos dias consecutivos úmidos (DCU), ambas as localidades apresentaram tendência negativa. Portanto, essa condição, exige atenção especial considerando que este é um parâmetro muitas vezes negligenciado nos estudos, porém de grande importância, considerando que está associado diretamente a eficiência de captação de água de diversas tecnologias de recursos hídricos (Santana; Paiva; Santos, 2015). Essa tendência de redução dos DCU, sugere que as tecnologias de armazenamento de água utilizadas no semiárido, devem ser revisadas em suas estruturas, a fim de adequar-se às mudanças climáticas desta região, mantendo desta forma suas eficiências de captação de água.

O índice de dias muito úmidos (R95p) e da chuva máxima em 5 dias (RX5day), apresentaram tendência de redução para Dormentes e de aumento em Canhotinho. Apesar do padrão regional, verifica-se a concordância local de sinal da tendência para os índices R95p e RX5day, com tendência negativa (positiva) em Dormentes (Canhotinho), embora os valores das tendências não sejam estatisticamente significativos.

Portanto, a partir das tendências observadas, os índices relacionados à temperatura, sendo a maioria significativa, mostram aumento de noites e dias quentes e uma redução de noites e dias frios em ambas as localidades de Pernambuco, evidenciando tendência de aquecimento. Enquanto os índices de chuva mostram maior incerteza decorrente da própria variabilidade espaço-temporal, com aumento das condições de seca no semiárido e das condições úmidas no sertão, acentuando ainda mais as diferenças regionais já existentes no padrão de distribuição anual da chuva no estado de Pernambuco.

Nesse contexto, a formulação de políticas ambientais que promovam a resiliência das comunidades locais deve priorizar a adaptação das infraestruturas hídricas e agrícolas às tendências das condições climáticas. É essencial que essas políticas

incentivem o uso de tecnologias que otimizem a captação e o armazenamento de água, como cisternas e barragens subterrâneas, bem como a implementação de sistemas agroflorestais e o cultivo de variedades agrícolas mais resistentes à seca. Ademais, é fundamental que haja um monitoramento contínuo dos indicadores climáticos, como os índices de temperatura e precipitação, para que as políticas possam ser ajustadas de maneira dinâmica e eficaz frente à intensificação dos fenômenos climáticos extremos.

Somado a isso, as mudanças de temperatura identificadas no presente estudo são consistentes com o aquecimento global, com os índices de aumento na temperatura mínima sendo mais pertinentes. O padrão regional em relação a tendência da chuva, que a depender do local indica tendência de aumento ou redução na duração, intensidade e frequência, já foi identificado em estudo anterior para a região.

Considerando assim, que temperaturas mais altas, aumentam a demanda diária da água pelas plantas, ambiente e população e a evaporação de corpos d'água e solos, aumenta-se o potencial de secas que podem ser mais intensas e prolongadas e, somado aos extremos chuvosos mais intensos e frequentes, a região torna-se mais vulnerável aos impactos que esses eventos podem causar. Esse panorama remete ao fato de que é imprescindível uma revisão e adequação regional, nas tecnologias hídricas, customizando-as de acordo com a microrregião a qual devem ser instaladas, dando suporte a maior eficácia no armazenamento de águas (principalmente pluviais).

A integração de práticas adaptativas, aliada ao fortalecimento das instituições locais e ao apoio técnico para agricultores e gestores de recursos hídricos, é crucial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas no semiárido pernambucano. Deste modo, este estudo pode subsidiar a formulação de políticas públicas que visam garantir a sustentabilidade ambiental e a segurança hídrica, promovendo um desenvolvimento adaptado às realidades climáticas emergentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsas do primeiro e terceiro autores.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, L.; HEROLD, N. **ClimPACT2: Indices and software**. ARCCSS-extremes / climfact2. 2016. Disponível em: <<https://github.com/ARCCSS-extremes>>. Acesso em: novembro de 2021.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_anual_2019-versao_web-0212-1.pdf>. Acesso em: novembro de 2021.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**. Brasília: ANA, 118p., 2020. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.23309814.pdf>>. Acesso em: novembro de 2021.

BATTISTI, R.; BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, n. 1–2, p. 237–247, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2383-y>.

BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Solar radiation models and gridded databases to fill gaps in weather series and to project climate change in Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2018, p.1-15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/6204382>.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, n.2, p. 517-529, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5225>.

CARVALHO, A. T. F. Caracterização climática da quadra chuvosa de município do semiárido brasileiro, entre os anos de 2013 a 2017. **Geografia em Atos (Online)**, Presidente Prudente, v. 2, n. 17, p. 04–23, 2020. DOI: [10.35416/geoatos.v2i17.7116](https://doi.org/10.35416/geoatos.v2i17.7116).

CARVALHO, A. L.; SANTOS, D. V.; MARENGO, J. A.; COUTINHO, S. M. V.; MAIA, S. M. F. Impacts of extreme climate events on Brazilian agricultural production. **Sustainability in Debate**, v. 11 n. 3, p. 197–210, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33814>.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. S.; SILVA, M. G. A. J. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CEPED/UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012**. 2. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED), 126 p., 2013. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>. Acesso em: novembro de 2021.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; ... MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 438-454, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>.

CUNHA, A. P. M. A.; TOMASELLA, J.; RIBEIRO-NETO, G. G.; BROWN, M.; GARCIA, S. R.; BRITO, S. B.; CARVALHO, M. A. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. **Atmospheric Science Letters**, v. 19, n. 10, p. e855, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.855>.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; ... RIBEIRO-NETO, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>.

DOMINGOS, S.; GASPAR, R.; FONSECA, H.; MAROCO, J. DeCodeR framework: data collection and coding for demands and resources appraisal in extreme weather events / DeCodeR framework: recogida de datos y codificación de exigencias y evaluación de recursos en fenómenos climáticos extremos. **Psycology**, v. 11, p. 90-103, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/21711976.2019.1643988>.

EASTERLING, D. R.; HORTON, B.; JONES, P. D.; PETERSON, T. C.; KARL, T. R.; PARKER, D. E.; ... FOLLAND, C. K. Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. **Science**, v. 277, n. 5324, p. 364-367, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.277.5324.364>.

FARIAS, R. F. F.; ALVES, K. M. A. S.; NÓBREGA, R. S. Climatologia de ocorrência de eventos extremos de precipitação na mesorregião do Sertão Pernambucano. **Revista GEONORTE**, v. 3, n. 8, p. 930, 2012.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; TANK KLEIN, A. M. G.; PETERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate Research**, v. 19, n. 3, p. 193-212, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr019193>.

GIL-ALANA, L. A. Maximum and minimum temperatures in the United States: Time trends and persistence. **Atmospheric Science Letters**, v. 19, n. 4, p. 1-3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.810>.

GUEDES, R. V. S.; SILVA, F. D. S.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, V. P. R. Identification and classification spatiotemporal of rainy or dry critical events in Pernambuco state. **Ciência E Natura**, v. 38, n. 1, p. 413-428, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X17167>.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; IPCC, 2021.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p.213-233.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2016.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil — past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. **Anais Da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973–1985, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ALVES, L. M.; BARRETO, N. J. C.; REBOITA, M. S.; RAMOS, A. M. Changing trends in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts. **Frontiers in Climate**, v. 2, n. 3, p. 1–13, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2020.00003>.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P. M. A.; NOBRE, C. A.; RIBEIRO NETO, G. G.; MAGALHAES, A. R.; TORRES, R. R.; ... ÁLVALA, R. C. S. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Natural Hazards**, v. 103, n. 2, p. 2589–2611, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>.

MARENGO, J. A.; GALDOS, M. V.; CHALLINOR, A.; CUNHA, A. P.; MARIN, F. R.; VIANNA, M. S.; ... BENDER, F. Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 00, p.1-20, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/cli2.17>.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relation of drought frequency and duration to time scales. **American Meteorological Society**, Boston, pp. 179–184, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1002/jso.23002>.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P. Dynamical Aspects of the Recent Strong El Niño Events and its Climate Impacts in Northeast Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 178, n. 6, p. 2315–2332, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02758-3>.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. WWF – BRASIL. Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto da mudança do clima. **Brasília**, DF: MMA, 125p., 2017. Disponível em: https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/estudo_secas_completo_com_isbn.pdf Acesso em: novembro de 2021.

NÓBREGA, R. S.; FARIAS, R. F. L.; SANTOS, C. A. C. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 2, p. 171–180, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130624>.

PETERSON, T. C.; MANTON, M. J. Monitoring changes in climate extremes: A tale of international collaboration. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 89, n. 9, p. 1266–1271, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2501.1>.

REGOTO, P.; DERECZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5125–5142, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7119>.

RODRIGUES, D. T.; GONÇALVES, W. A.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L. M. B.; SOUZA, D. O.; ARAUJO, P. A. A.; SILVA, A. C. N.; SILVA, C. M. S. Probability of occurrence of extreme precipitation events and natural disasters in the city of Natal, Brazil. **Urban Climate**, 35, p. 100753, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100753>.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n.1, p. 64–73, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620150003>.

SANCHES, R. G.; SANTOS, B. C.; NEVES, G. Z. F.; SILVA, M. S. D.; SOUZA, P. H.; TECH, A. R. B. Influência da variabilidade climática na produção canavieira na microrregião de São Carlos/SP no período de 1994 a 2014. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/ABCLIMA.V25I0.59157>.

SANTANA, A. C. A.; PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M. Considerações sobre o acúmulo de água por cisterna calçadão – um estudo de caso no Agreste Pernambucano. *In*: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH. Brasília, 10 p., 2015, **Anais [...]** Brasília, 2015.

SILVA, C. J.; FRANÇA, M. V.; MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M. O índice de aridez e sua tendência a desertificação na bacia do rio Ipojuca-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4, n. 1, p. 021–030, 2019. DOI: <https://doi.org/10.24221/jeap.4.1.2019.1875.021-030>.

SILVA, L. A. P.; SILVA, C. R.; SOUZA, C. M. P.; BOLFE, É. L.; SOUZA, J. P. S.; LEITE, M. E. Mapping of aridity and its connections with climate classes and climate desertification in future scenarios - Brazilian semi-arid region. **Sociedade & Natureza**, v. 35, p. e67666, 2023. DOI: <http://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-67666x>.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P., BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197–206, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>.

TORRES, R.R.; LAPOLA, D.M.; MARENGO, J.A.; LOMBARDO, M.A. Socio-climatic hotspots in Brazil. **Climatic Change**, v. 115, n. 3–4, p. 597–609, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0461-1>.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 112, n. 1–2, p. 253–272, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0718-7>.

UNEP - United Nations Environment Programme. **World Atlas of Desertification**. Londres: UNEP/Edward Arnold, 69 p., 1992.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, p. 347–360, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>.

VILANOVA, R. S.; DELGADO, R. C.; ANDRADE, C. F.; SANTOS, G. L.; MAGISTRALI, I. C.; OLIVEIRA, C. M. M.; TEODORO, P. E.; ... RODRIGUES, R. A. Vegetation degradation in ENSO events: Drought assessment, soil use and vegetation evapotranspiration in the Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100531, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100531>.

VOSE, R. S.; EASTERLING, D. R.; GLEASON, B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 23, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL024379>.

WMO - World Meteorological Organization. **Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970-2019)**. [S.l.]: WMO, 2021. 89 p., Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10769>. Acesso em: novembro, 2021.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil. *In*: 18th Brazilian Symposium on Remote Sensing, Santos, São Paulo, 28-31, Brazil. **Anais [...]** Santos, 2016.

ZHANG, X.; ALEXANDER, L.; HEGERL, G. C.; JONES, P.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TREWIN, B.; ZWIERS, F. W. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 2, n. 6, p. 851–870, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.

ZHANG, X.; YANG, F. **RClimDex (1.0) - User Manual**. Ontario: Climate Research Branch Environment Canada Downsview, 2004.

Contribuições de autoria

1 – Alexandre Carlos Araújo de Santana

Universidade Federal de Pernambuco, Mestre em Engenharia Civil e Ambiental
<https://orcid.org/0000-0002-6717-5396> • alexandre.sustentat@gmail.com
Contribuição: Conceituação, metodologia, curadoria de dados, escrita - primeira redação

2 – Jocimar Coutinho Rodrigues Junior

Universidade Federal de Pernambuco, Mestre em Engenharia Civil
<https://orcid.org/0000-0002-4033-3243> • jocimar_junior@hotmail.com
Contribuição: Metodologia, escrita - primeira redação, escrita - revisão e edição

3 – Timóteo Herculino Barros

Universidade de São Paulo, Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas

<https://orcid.org/0000-0002-1242-9889> • timoteo@alumni.usp.br

Contribuição: Conceituação, escrita - primeira redação

4 – Níveo Rocha

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Mestre em Geografia

<https://orcid.org/0009-0005-8417-8109> • niveo.rocha@gmail.com

Contribuição: Metodologia, escrita - primeira redação

5 – Fabiani Denise Bender

Universidade de São Paulo, Pós-doutora em Ciência

<https://orcid.org/0000-0003-3634-5265> • fabianidenise@gmail.com

Contribuição: Curadoria de dados, escrita - primeira redação

6 – José Almir Cirilo

Universidade Federal de Pernambuco, Doutor em Engenharia Civil

<https://orcid.org/0000-0002-8672-0898> • almir.cirilo@ufpe.br

Contribuição: Supervisão, escrita - revisão e edição

7 – Anderson Luiz Paiva

Universidade Federal de Pernambuco, Doutor em Engenharia Civil

<https://orcid.org/0000-0003-3475-1454> • anderson.paiva@ufpe.br

Contribuição: Supervisão, escrita - revisão e edição

Como citar este artigo

SANTANA, A. C. A. de; RODRIGUES JUNIOR, J. C.; BARROS, T. H. S. da; ROCHA, N.; BENDER, F. D.; CIRILO, J. A.; PAIVA, A. L. R. de. Estudo de tendência de mudanças climáticas, eventos extremos e análise comparativa entre dois municípios de regiões distintas do semiárido pernambucano. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 28, e86280, 2024. Disponível em: 10.5902/2236499486280. Acesso em: dia mês abreviado ano.