



Variabilidade espaço-temporal da chuva, energia cinética e erosividade baseado em dados diários em região semiárida

José Bandeira Brasil¹, Ana Célia Maia Meireles², Carlos Wagner Oliveira², Everton Alencar Patrício³; Ana Alice Cardoso Carneiro³; Sirleide Maria de Menezes¹; Francisco Dirceu Duarte Arraes⁴

¹ Bolsista PNPd, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável – PRODER, Universidade Federal do Cariri. E-mail: josebbrasil@gmail.com (Autor Correspondente); sirleidemenezes@hotmail.com;

² Professor (a), Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável – PRODER, Universidade Federal do Cariri. E-mail: ana.meireles@ufca.edu.br; carlos.oliveira@ufca.edu.br;

³ Bolsista PET-Agronomia, Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade, Universidade Federal do Cariri, Crato-Ceará. E-mail: everton.alencar@aluno.ufca.edu.br; ana.carneiro@aluno.ufca.edu.br;

⁴ Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE) - campus Salgueiro. E-mail: dirceu.arraes@ifsertao-pe.edu.br.

Artigo recebido em 03/09/2024 e aceito em 26/02/2025

RESUMO

Variáveis facilmente obtidas, como a altura de chuva, permitem entender as interações entre energia cinética e potencial de erosividade em locais não monitorados. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento da variação espaço-temporal da chuva, energia cinética e índice de erosividade a partir de dados de altura de chuva diária em uma região semiárida do Brasil. Os dados diários de chuva foram coletados no site da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, referente aos postos pluviométricos Crato e Lameiro, durante um período de 29 anos. As características da chuva do posto Lameiro apresentaram valores superiores ao posto Crato, com chuva mínima de 0,4 mm e máxima de 122,0 mm; energia cinética de 0,1 a 33,0 MJ ha⁻¹; e índice de erosividade de 0,1 a 5.147,4 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹. Em ambos os postos, 84% da altura, energia cinética e índice de erosividade concentram-se no período chuvoso, pois esses meses concentram os maiores eventos diários. O mês mais chuvoso é março, representando 22% do total de chuva, energia cinética e índice de erosividade, e agosto, o menor com 0,2% do total. Essa diferença na alta variabilidade espaço-temporal da chuva, energia cinética e índice de erosividade ao longo dos meses e no total anual deve-se às características específicas do município e devido a variação de altitude entre os postos. Os achados deste estudo melhoram a compreensão da distribuição da energia cinética e do potencial de erosividade em locais que não possuem características da chuva medidas.

Palavras-chave: Características da chuva, Altura de chuva, Eventos diários, Postos pluviométricos, Índice de erosividade.

Spatial-temporal variability of rainfall, kinetic energy and erosivity based on daily data in semiarid region

ABSTRACT

Easily obtained variables, such as rainfall depth, allow us to understand the interactions between kinetic energy and erosion potential in unmonitored locations. This work aims to analyze the behavior of the spatiotemporal variation of rainfall, kinetic energy and erosivity index from data on daily rainfall depth in a semiarid region of Brazil. Daily rainfall data were collected from the website of the Ceará Foundation for Meteorology and Water Resources – FUNCEME, referring to the Crato and Lameiro rainfall stations, over a period of 29 years. The rainfall characteristics at the Lameiro station showed higher values than at the Crato station, with a minimum rainfall of 0,4 mm and a maximum of 122,0 mm; kinetic energy of 0,1 to 33,0 MJ ha⁻¹; and an erosivity index of 0,1 to 5.147,4 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹. In both stations, 84% of the depth, kinetic energy and erosivity index are concentrated in the rainy season, as these months concentrate the largest daily events. The rainiest

Brasil, J. B.; Meireles, A. C. M.; Oliveira, C. W.; Patrício, E. A.; Carneiro, A. A. C.; Menezes, S. M.; Arraes, F. D. D.

month is March, representing 22% of the total rainfall, kinetic energy and erosivity index, and August, the lowest with 0,2% of the total. This difference in the high spatial-temporal variability of rainfall, kinetic energy and erosivity index over the months and in the annual total is due to the specific characteristics of the municipality and due to the variation in altitude between the stations. The findings of this study improve the understanding of the distribution of kinetic energy and erosivity potential in locations that do not have measured rainfall characteristics.

Introdução

A escassez hídrica em regiões semiáridas, que deve se agravar em cenários de mudanças climáticas, cria a necessidade de caracterizar a dinâmica espaço-temporal da distribuição e ocorrência das chuvas com base em eventos individuais para melhor compreensão dos processos e modelos hidrológicos (Brasil et al., 2022a).

Essas regiões apresentam alta variabilidade espaço-temporal, elevada intensidade de chuvas (Brasil et al., 2020; Brasil et al., 2022b; Guerreiro et al., 2013) e grande variabilidade interanual na duração das estações hidrológicas (Soares et al., 2024), além de vivenciarem extremos climáticos, como secas e inundações constantes (Marengo et al., 2022; Pereira et al., 2025). A chuva nessas localidades tem distribuição anômala, com o início da estação chuvosa ocorrendo de dezembro a maio, e uma estação seca de agosto a novembro, com apenas 1% do total anual de chuvas, dependendo da área da região (Campos et al., 2020; Guerreiro et al., 2021).

Informações específicas sobre as características da chuva, como altura, duração e intensidade (Brasil et al., 2020; Souza et al., 2025) para obter a energia cinética e o potencial erosivo da chuva, ainda são escassas em muitas regiões semiáridas. Destacam-se estudos realizados em escala experimental de bacia (Medeiros & Araújo, 2014; Santos et al., 2017), que, por meio de um pluviógrafo de balança, permitiram obter a duração e a intensidade da chuva e, assim, utilizar relações empíricas para obter a energia cinética e seu potencial de erosividade, com base no modelo padrão de Wischmeier e Smith (1978).

A carência de estudos nessas regiões se deve ao alto custo de obtenção de equipamentos específicos para mensurar tais características da chuva (Brasil et al., 2022b). Em função disso, os padrões globais de erosividade das chuvas continuam mal quantificados e as estimativas apresentam grandes incertezas, dificultando a implementação de estratégias eficazes de mitigação e restauração da degradação do solo (Panagos et al., 2022; Santos et al., 2022; Zhao et al., 2024). Devido a essas dificuldades enfrentadas

no monitoramento, o banco de dados pluviométricos mais consistente e abrangente do Brasil consiste no monitoramento diário das chuvas em escalas individuais de eventos, no qual é obtida a altura total de chuva durante 24 h (Andrade et al., 2020; Guerreiro et al., 2021; Guerreiro et al., 2022; Medeiros & Araújo, 2014; Santos et al., 2017).

Como alternativa aos modelos tradicionais utilizados na literatura de intensidade da chuva para obtenção da energia cinética, o estudo desenvolvido por Brasil et al. (2024) em Iguatu-CE, região semiárida, mediu as características da chuva (diâmetro e velocidade das gotas) utilizando um disdrômetro. A partir dessas informações medidas, foi obtido diretamente um modelo que relaciona a energia cinética e o índice de erosividade medidos pelo disdrômetro versus a altura total de chuva em escala de eventos individuais diários, calibrado e validado com um índice de confiabilidade maior que 0,97. Este estudo é uma alternativa em regiões semiáridas que não possuem dados específicos sobre as características da chuva (duração e intensidade), em que, a partir da obtenção de dados sobre a altura de chuva diária, é possível calcular a energia cinética e o índice de erosividade da chuva (Teixeira et al., 2022; Wang et al., 2024).

O foco do nosso estudo, o município do Crato, está localizado na zona climática semiárida, na base da Chapada do Araripe no extremo sul do estado do Ceará, na Microrregião do Cariri. O município se diferencia das demais cidades da região semiárida pela diferença climática, devido à influência direta do efeito orográfico da Chapada do Araripe, onde está localizada a Floresta Nacional do Araripe - Flona Araripe (Sampaio et al., 2019). Esse cenário pode influenciar diretamente nas características da altura total de chuva anual, mensal, diária e nas diferentes estações ao longo do ano. Estudos que visem analisar os fatores específicos que influenciam o comportamento, as características da chuva (duração e intensidade) e as variações espaço-temporais da chuva entre os postos pluviométricos dentro do município do Crato ainda são escassos, e os que existem visam analisar o comportamento da

chuva na Região Metropolitana do Cariri (Sousa, 2019) ou mesmo o comportamento da variação temporal da precipitação em apenas uma estação do município do Crato (Sampaio et al., 2019).

O conhecimento das características da chuva utilizando variáveis facilmente obtidas de entrada, como a altura total de chuva em cada evento (Brasil et al., 2024), servirá de base para o entendimento das interações entre a dinâmica da distribuição da energia cinética da chuva e para futuras investigações do potencial de erosividade do solo em locais que não possuem características da chuva medidas. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento da variação espaço-temporal da chuva, energia cinética e índice de erosividade a partir de dados de altura de chuva diária em uma região semiárida do Brasil.

Material e métodos

Local de estudo

A área de estudo está localizada no município do Crato, inserido na sub-bacia da bacia hidrográfica do Salgado, na região do Cariri, Ceará, Nordeste do Brasil (Figura 1). As coordenadas geográficas dos postos pluviométricos são: Crato - 7° 7' 7" S e 39° 25' 45.1" W, com altitude de 425 m; Lameiro - 7° 13' 58.8" S e 39° 25' 0.1" W, com altitude de 448 m. O posto Lameiro localiza-se próximo a encosta da Chapada do Araripe onde a altitude pode chegar a 920 m e o posto Crato está a 13 km em linha reta do posto Lameiro, distanciando-se assim do efeito da encosta da Chapada. O município do Crato possui clima tropical quente semiárido (Sousa, 2019), e está inserido na região metropolitana do Cariri, composta por 9 municípios, com área de aproximadamente 5.460,0 km² (Sampaio et al., 2019).

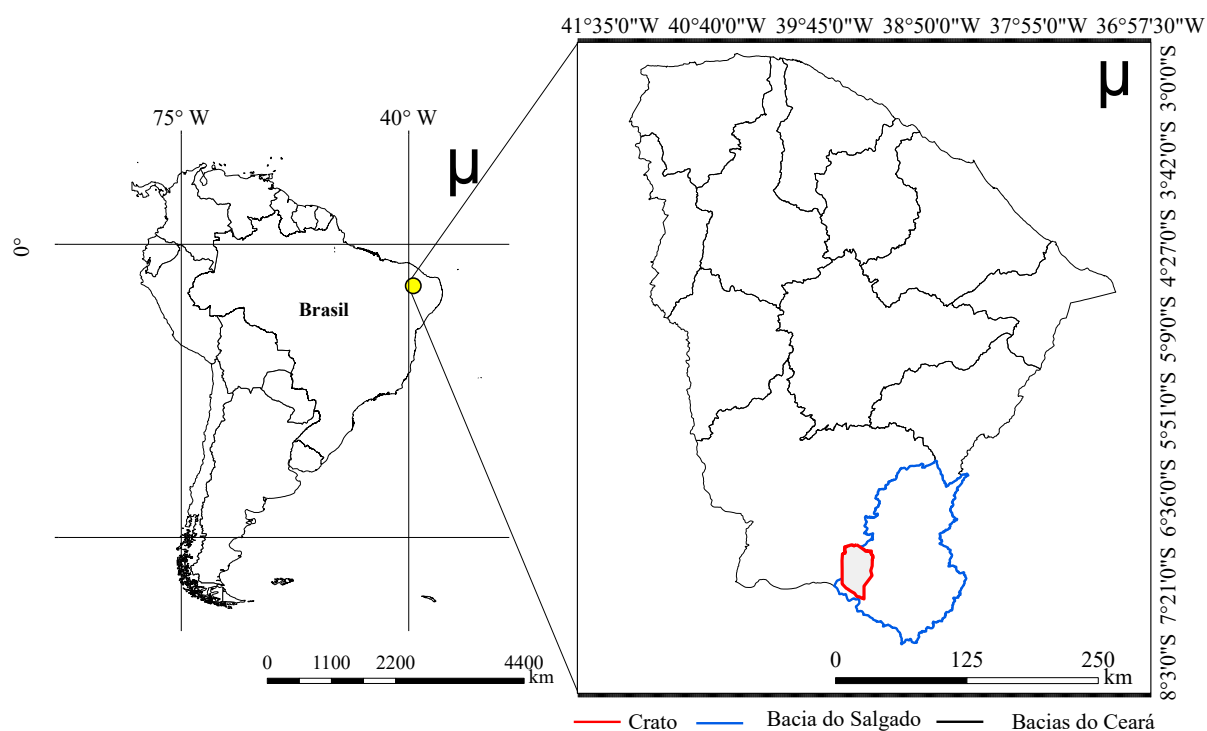


Figura 1. Localização do município do Crato-Ceará, Nordeste do Brasil.

O município do Crato está localizado na base da Chapada do Araripe no extremo sul do estado do Ceará, na Microrregião do Cariri. Por estar localizado na base da Chapada do Araripe, suas temperaturas são relativamente baixas no inverno, embora altas no verão, diferentemente de outras áreas do Nordeste do Brasil. O município

ocupa uma área total de 1.138,1 km², possui uma população de 133.913,0 habitantes segundo o levantamento do IBGE (2021) e se diferencia de outras cidades de regiões semiáridas pela diferença climática, devido à influência direta do efeito orográfico da Chapada do Araripe na qual está localizada a Floresta Nacional do Araripe - Flona

Araripe. Além dessas características, o sistema hídrico da região é constituído por mananciais superficiais, poços profundos e nascentes, uma vez

Coleta dos dados de chuva

Para estudar a variabilidade espaço-temporal das chuvas no município do Crato, foram selecionados os postos pluviométricos que não apresentavam falhas no conjunto de dados diários. Dos quatro postos pluviométricos do município do Crato, apenas os postos Crato e Lameiro apresentaram uma série de dados de chuva consistentes e sem falhas.

De maneira geral, as temperaturas médias ao longo do ano variam entre 24 °C e 27 °C, com temperaturas máximas de 34 °C e mínimas de 18 °C (Araújo et al., 2017); além de estações chuvosa e seca bem definidas (Guerreiro et al., 2013; Sampaio et al., 2019). Em ambos os postos, os dados de altura chuva na escala de eventos diários foram obtidos de uma série histórica de 29 anos (1994 a 2022) obtidos no site da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, com séries consistentes e que não apresentavam falhas em ambos os postos.

Modelo de energia cinética - EC e índice de erosividade - EI30

A partir da obtenção dos dados de chuva diária, foi possível calcular a energia cinética (EC) por mm de chuva utilizando o modelo desenvolvido por Brasil et al. (2024), que relaciona a energia cinética medida pelo disdrômetro versus a altura de chuva total, calibrado e validado para uma região semiárida do Nordeste brasileiro, conforme equação 1.

$$EC = 0,2705 * C \quad (1)$$

Em que: EC é a energia cinética total do evento de chuva (MJ ha⁻¹), e C é a altura de chuva de cada evento individual (mm).

O índice de erosividade da chuva (EI30) de cada evento diário foi estimado utilizando o modelo desenvolvido por Brasil et al. (2024), que relaciona o índice de erosividade da chuva medida pelo disdrômetro versus a altura total de chuva (equação 2).

$$EI30 = 0,1908 * C^{2,1238} \quad (2)$$

que o município possui características sedimentares.

Em que: EI30 é o índice de erosividade da chuva (MJ ha⁻¹ mm h⁻¹).

Análises estatísticas

Análises estatísticas descritivas, boxplots e análises de regressão linear foram usadas para avaliar as características da chuva, a distribuição dos dados de energia cinética e o índice de erosividade em uma escala de eventos diários.

A normalidade dos dados foi analisada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Como o teste de Kolmogorov-Smirnov não foi aderente, adotou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon com nível de confiança de 99% para verificar a variação espaço-temporal das características das chuvas (altura, energia cinética e índice de erosividade) para os postos do Crato e Lameiro.

As análises estatísticas foram realizadas usando o Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versão 16.0, MINITAB versão 18 e as figuras no Microsoft Excel.

Resultados e discussão

Escala de eventos diários – geral

As estatísticas descritivas das características da chuva (altura, energia cinética e índice de erosividade) na escala de eventos diários no Posto Crato e Lameiro durante o período estudado, de 1994 a 2022, são apresentadas na Tabela 1. De acordo com os resultados, todas as variáveis no posto Lameiro apresentaram valores maiores que no posto Crato, na seguinte ordem: chuva mínima de 0,4 mm e máxima de 122,0 mm; a energia cinética da chuva variou de 0,1 a 33,0 MJ ha⁻¹; e o índice de erosividade da chuva registrou valor mínimo de 0,1 e máximo de 5.147,4 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ (Tabela 1). Esses resultados confirmam que as características da chuva do posto Crato e Lameiro (altura, energia cinética e índice de erosividade) apresentam alta variabilidade espaço-temporal dentro do próprio município, além de serem estatisticamente diferentes ao nível de 1% (*p*-valor = 0,000) pelo teste de Wilcoxon (Tabela 1).

Tabela 1. Estatísticas descritivas das características da chuva por eventos diários para o posto Crato e Lameiro

Posto Crato								
Variáveis	Média	DP	Mínimo	Q1 - 25	Q2 - 50 Mediana		Q3 - 75	Máximo
Chuva	15,9	18,8	0,2	3,2	9,0	b	21,4	120,2
EC	4,3	5,1	0,1	0,9	2,4	b	5,8	32,5
EI30	188,0	495,2	0,1	2,3	20,3	b	127,7	4.987,5
Posto Lameiro								
Chuva	17,5	19,7	0,4	4,0	10,0	a	24,0	122,0
EC	4,7	5,3	0,1	1,1	2,7	a	6,5	33,0
EI30	216,6	545,6	0,1	3,6	25,4	a	162,9	5.147,4

Chuva (mm); EC – Energia cinética (MJ ha^{-1}); Índice de erosividade ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$); Percentis -Q1—25th, Q2—50th (Mediana) e Q3—75th; DP - Desvio padrão. * Letras diferentes (a, b) representam uma mediana estatisticamente diferente ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon.

Em ambos os postos, a maior frequência de ocorrência (50%) de eventos individuais foi registrada para altura de chuva abaixo de 9,0 mm e 10,0 mm – Q2 = 50%, energia cinética $\leq 3,0 \text{ MJ ha}^{-1}$ e índice de erosividade $\leq 25,5 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ (Tabela 1). Estudos anteriores sobre caracterização de chuvas indicaram que a alta ocorrência de pequenos eventos de chuva e a alta variabilidade espaço-temporal são características comuns presentes nas regiões semiáridas do Nordeste do Brasil (Brasil et al., 2022a; Brasil et al., 2022b), como obtido neste estudo. Entretanto, esses eventos são de grande importância para a compreensão dos processos hidrológicos na escala da bacia (Andrade et al., 2020; Guerreiro et al., 2021; Guerreiro et al., 2022), como o processo de

interceptação (Souza et al., 2025), redistribuição das gotas de chuva e poder atenuante da vegetação sob o dossel da vegetação (Brasil et al., 2020; Brasil et al., 2022b).

Como a equação utilizada é linear, a relação entre chuva versus energia cinética para ambos os postos na escala de eventos apresenta uma relação linear (Figuras 2a e 2c), na qual a energia cinética aumenta diretamente conforme aumentam os valores de chuva. A energia cinética da chuva (EC) apresentou valores máximos de 32,5 e 33,0 (MJ ha^{-1}) para os postos Crato e Lameiro (Tabela 1; Figuras 2a e 2c), em conformidade com valores máximos de energia cinética para eventos de chuva natural de alta qualidade obtidos em região semiárida (Brasil et al., 2024).

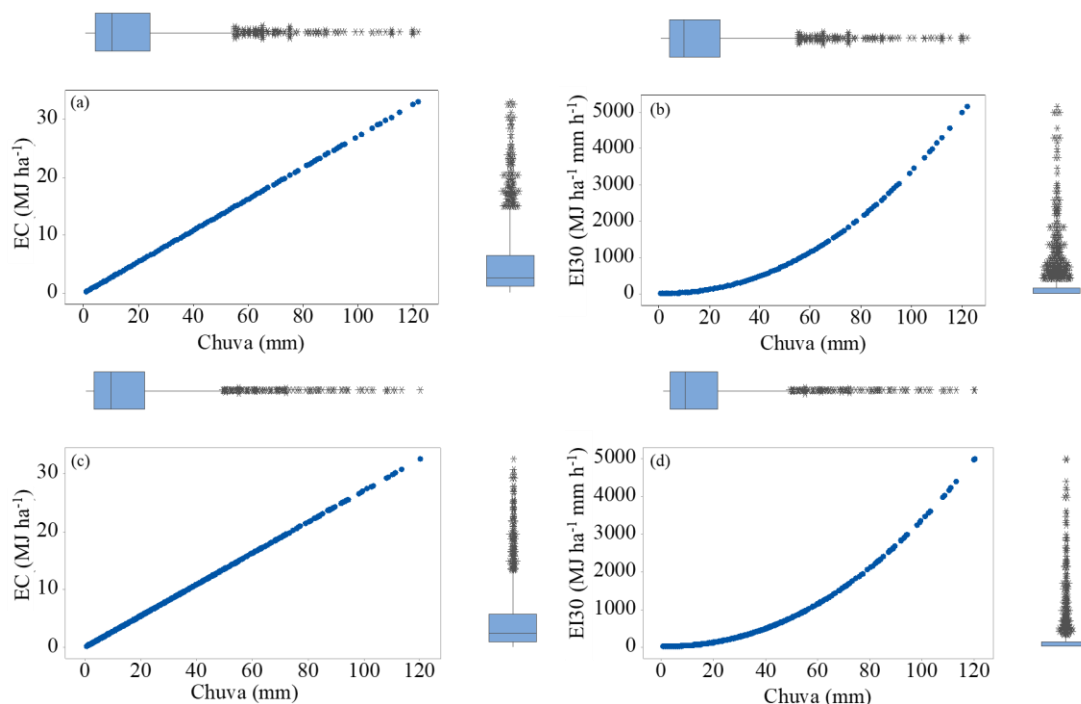


Figura 2. Relação entre chuva versus energia cinética (a) e (c); relação entre chuva versus índice de erosividade (b) e (d) em escala de eventos diários para o posto Crato e Lameiro

Como a equação utilizada é potencial, a relação entre chuva versus índice de erosividade para ambos os postos na escala de eventos mostra uma relação potencial (Figura 2b e 2d). Conforme a Tabela 1; Figura 2b e 2d, observa-se que 75% dos eventos de índice de erosividade são menores que 127,7 e 162,9 $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm h}^{-1}$ para os postos Crato e Lameiro e chuva menor que 24,0 mm, comprovando a alta frequência de ocorrência de eventos com baixa altura de chuva.

Apesar disso, foram registrados valores máximos de EI30 na ordem de 4.987,5 e 5.147,4 $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm h}^{-1}$ quando foram registrados valores máximos de chuva (Tabela 1; Figura 2b e 2d) em ambos os postos. Estudos apresentando altos valores de índice de erosividade na escala de eventos foram observados em outras regiões semiáridas, como visto na pesquisa de Medeiros e Araújo (2014) para a Bacia Experimental de Aiuaba-CE e Santos et al. (2017) na Bacia Experimental de Iguatu-CE utilizando o modelo padrão de Wischmeier e Smith (1978). Vale ressaltar que chuvas de grande magnitude são importantes variáveis de entrada para entender a variabilidade do índice de erosividade, pois esses eventos influenciam diretamente os processos hidrológicos e erosivos diante das mudanças climáticas em diferentes regiões do mundo

(Panagos et al., 2022; Santos et al., 2022; Zhao et al., 2024).

Os resultados deste estudo serão úteis para avaliar mudanças a longo prazo (séries de 29 anos) na energia cinética da precipitação e na erosividade, e serão fundamentais para analisar as causas potenciais da variabilidade da erosão do solo em regiões semiáridas não monitoradas (Teixeira et al., 2022; Wang et al., 2024).

Escala de eventos diários por mês

Conforme a Figura 3; Tabela 2, o comportamento da variabilidade descritiva dos eventos diários de chuva, energia cinética e índice de erosividade para eventos diários por mês para o posto Crato e Lameiro são semelhantes ao longo de cada mês investigado, não apresentando diferença estatística ao nível de 1% ($p\text{-valor} = 0,000$), como pode ser observado na variação espaço-temporal e pelos valores outliers apresentados no gráfico boxplot (Figura 3).

De modo geral, para o posto Crato o mês com maior evento diário de chuva, energia cinética e índice de erosividade é janeiro (Figura 3a, 3c e 3e), caracterizando a pré-estação chuvosa da região e são oriundos em função dos sistemas frontais, ou frentes frias, fazendo com que ocorram eventos diários extremos (Guerreiro et al., 2013). Para o

posto Lameiro o mês com maior evento diário de chuva acontece em abril e ocorrem em função do avanço da Zona de Convergência Intertropical - ZCIT (Marengo et al., 2022) (Figura 3; Tabela 2). Segundo Medeiros e Araújo (2014), eventos

diários extremos como os apresentados na (Figura 3; Tabela 2) são caracterizados por forte concentração temporal da chuva, além de alta magnitude, em que 95% da chuva pode ocorrer em um intervalo de 1 h.

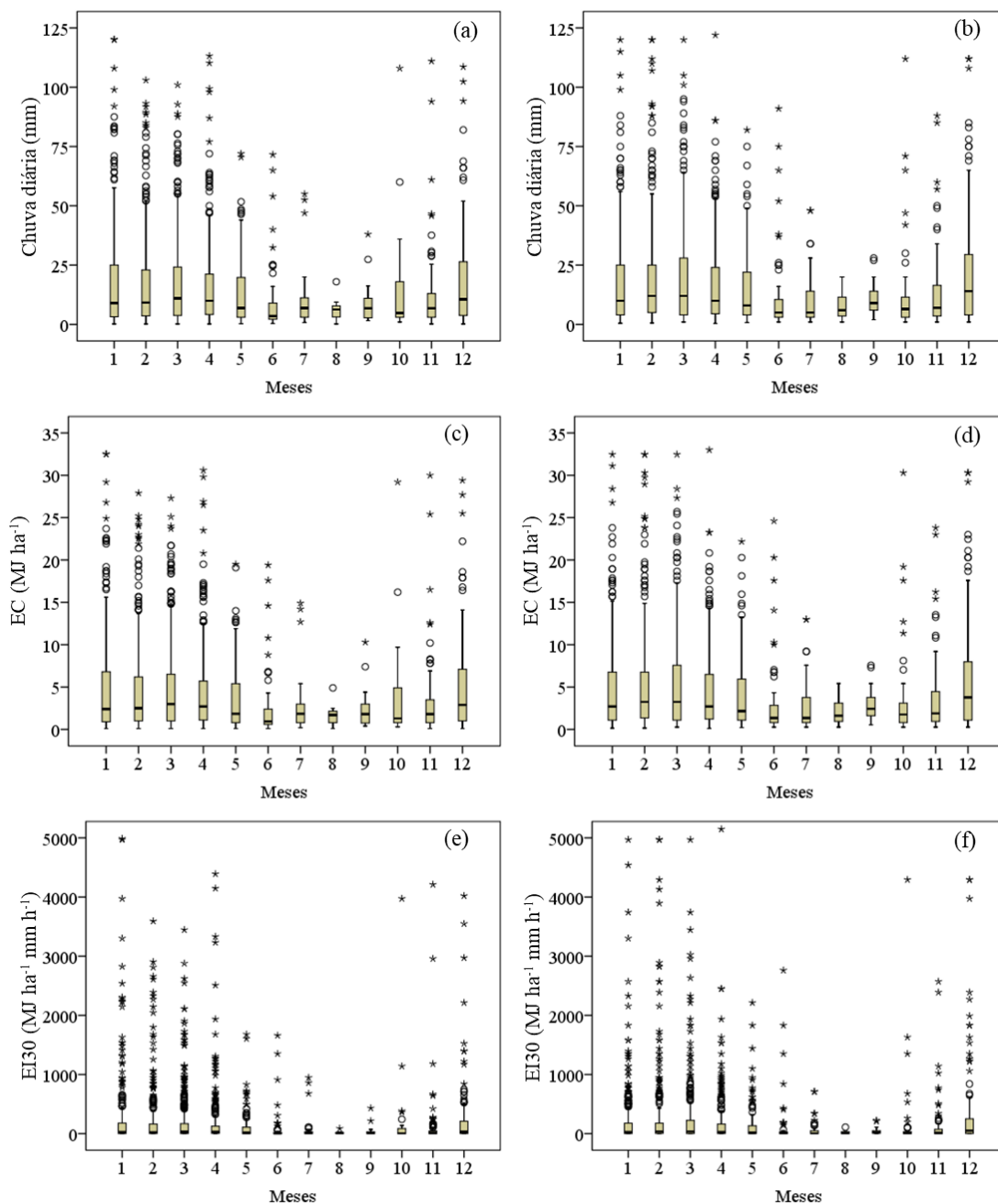


Figura 3. Série histórica da variabilidade dos eventos diários por mês: chuva (a e b); energia cinética (c e d); índice de erosividade (e e f) para o posto Crato e Lameiro respectivamente

Tabela 2. Estatísticas descritivas das características dos eventos diários de chuva por mês para o posto Crato e Lameiro

	Posto Crato								Posto Lameiro							
	Mês	Méd	DP	Mín	Q1-25	Q2-50	Q3-75	Máx	Méd	DP	Mín	Q1-25	Q2-50	Q3-75	Máx	
Chuva (mm)	Jan	17,7	21,4	0,2	3,2	9,0	25,0	120,2	18,5	20,5	0,5	4,0	10,0	25,0	120,0	
	Fev	17,0	19,6	0,2	3,5	9,2	23,4	103,0	19,7	22,3	0,6	5,0	12,0	25,0	120,0	
	Mar	17,4	18,7	0,2	3,8	11,0	24,2	101,0	19,2	20,2	1,0	4,0	12,0	28,0	120,0	
	Abr	16,4	18,9	0,2	4,2	10,0	21,3	113,2	16,6	18,0	0,4	4,3	10,0	24,0	122,0	
	Mai	13,0	13,8	0,3	3,0	6,9	19,9	72,0	15,0	15,5	0,8	4,0	8,0	22,3	82,0	
	Jun	8,9	13,7	0,4	2,2	3,5	9,0	71,6	11,2	16,8	1,0	3,0	5,0	11,0	91,0	
	Jul	10,1	12,7	0,8	3,0	6,9	11,4	55,0	10,6	11,8	1,0	3,0	5,0	15,5	48,0	
	Ago	6,3	4,7	0,2	2,4	6,3	7,9	18,0	7,9	6,2	1,0	3,3	6,0	11,8	20,0	
	Set	9,1	9,5	1,6	2,5	6,8	12,2	38,0	10,9	7,4	2,0	5,5	9,0	14,5	28,0	
	Out	12,5	18,7	1,0	3,0	4,8	18,2	108,0	13,1	20,5	1,0	3,0	6,5	11,8	112,0	
	Nov	12,1	16,9	0,2	3,0	6,8	13,2	111,0	13,1	16,0	1,0	3,0	7,0	17,0	88,0	
	Dez	18,0	19,8	0,2	3,6	10,6	27,1	108,6	21,1	22,4	1,0	4,0	14,0	30,0	112,0	
Energia cinética (MJ ha ⁻¹)	Jan	4,8	5,8	0,1	0,9	2,4	6,8	32,5	5,0	5,6	0,1	1,1	2,7	6,8	32,5	
	Fev	4,6	5,3	0,1	0,9	2,5	6,3	27,9	5,3	6,0	0,2	1,4	3,2	6,8	32,5	
	Mar	4,7	5,1	0,1	1,0	3,0	6,5	27,3	5,2	5,5	0,3	1,1	3,2	7,6	32,5	
	Abr	4,4	5,1	0,1	1,1	2,7	5,7	30,6	4,5	4,9	0,1	1,2	2,7	6,5	33,0	
	Mai	3,5	3,7	0,1	0,8	1,9	5,4	19,5	4,0	4,2	0,2	1,1	2,2	6,0	22,2	
	Jun	2,4	3,7	0,1	0,6	0,9	2,4	19,4	3,0	4,6	0,3	0,8	1,4	3,0	24,6	
	Jul	2,7	3,4	0,2	0,8	1,9	3,1	14,9	2,9	3,2	0,3	0,8	1,4	4,2	13,0	
	Ago	1,7	1,3	0,1	0,6	1,7	2,1	4,9	2,1	1,7	0,3	0,9	1,6	3,2	5,4	
	Set	2,5	2,6	0,4	0,7	1,8	3,3	10,3	3,0	2,0	0,5	1,5	2,4	3,9	7,6	
	Out	3,4	5,1	0,3	0,8	1,3	4,9	29,2	3,5	5,5	0,3	0,8	1,8	3,2	30,3	
	Nov	3,3	4,6	0,1	0,8	1,8	3,6	30,0	3,6	4,3	0,3	0,8	1,9	4,6	23,8	
	Dez	4,9	5,3	0,1	1,0	2,9	7,3	29,4	5,7	6,1	0,3	1,1	3,8	8,1	30,3	
Índice de erosividade (MJ ha ⁻¹ mm h ⁻¹)	Jan	250,5	641,6	0,1	3,6	25,4	180,7	4.987,5	238,0	581,6	0,0	3,6	25,4	177,6	4.969,9	
	Fev	214,7	506,2	0,1	3,6	24,3	165,1	3.592,9	279,5	690,1	0,1	5,8	37,4	177,6	4.969,9	
	Mar	202,9	441,4	0,1	3,7	31,1	170,2	3.446,3	241,5	542,1	0,2	3,6	37,4	226,0	4.969,9	
	Abr	199,2	535,3	0,1	4,8	27,9	128,3	4.390,7	184,0	447,1	0,0	4,2	25,4	162,9	5.147,4	
	Mai	107,8	234,8	0,1	2,0	13,4	110,6	1.679,5	138,7	301,6	0,1	3,6	15,8	138,8	2.213,8	
	Jun	81,4	273,5	0,1	1,0	2,9	20,3	1.659,7	126,5	428,9	0,2	2,0	5,8	31,1	2.761,8	
	Jul	77,3	214,9	0,1	2,0	11,5	33,6	947,9	71,9	156,3	0,2	2,0	5,8	65,1	709,9	
	Ago	16,7	24,7	0,4	4,9	11,2	15,8	88,4	25,3	37,1	0,2	2,4	8,9	35,8	110,6	
	Set	47,3	105,6	0,5	1,3	11,2	38,7	432,2	46,6	64,1	0,8	7,2	20,3	55,9	226,0	
	Out	157,7	603,6	0,2	2,0	5,3	90,0	3.973,4	186,3	656,8	0,2	2,0	10,2	35,8	4.292,5	
	Nov	135,7	525,3	0,1	2,0	11,2	46,5	4.211,5	129,9	378,4	0,2	2,0	11,9	78,3	2.572,0	
	Dez	223,6	539,9	0,1	3,6	29,9	222,6	4.020,4	297,0	676,2	0,2	3,6	51,8	261,6	4.292,5	

Méd – Média; DP - Desvio padrão; Mín – mínimo; Percentis - Q1—25th, Q2—50th (Mediana) e Q3—75th; Máx – máximo.

As Figuras 4a e 4b, mostram a contribuição das características da chuva (altura, energia cinética e índice de erosividade) mensal (%), sendo que em ambos os postos, 84% da altura, energia cinética e índice de erosividade concentram-se no período chuvoso - dezembro a abril (Figuras 3a e 3b; Figuras 4a e 4b), pois esses meses concentram

os maiores eventos diários como observado na Tabela 2. Para os dois postos em estudo, o mês mais chuvoso é março, representando 22% do total de chuva, energia cinética e índice de erosividade, e agosto, o menor com 0,2% do total (Figuras 3a e 3b; Figuras 4a e 4b). Em relação à altura de chuva, resultados semelhantes foram encontrados por

Sampaio et al. (2019) em que estudaram o comportamento das chuvas de apenas um posto pluviométrico no município de Crato no período de 1974 a 2009. Segundo os autores, os primeiros meses do ano são os mais chuvosos no Crato

(janeiro a abril), com alto potencial para serem aproveitados por meio da utilização de sistemas de armazenamento, para garantir água nos meses secos.

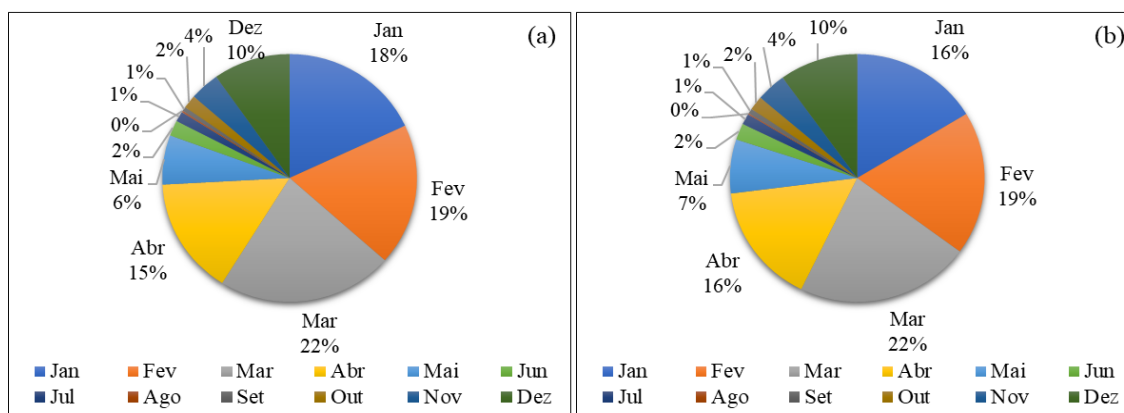


Figura 4. Contribuição das características da chuva (altura, energia cinética e índice de erosividade) mensal (%) para o posto Crato (a) e posto Lameiro (b)

Estudos anteriores mostraram o comportamento da energia cinética e índice de erosividade ao longo dos eventos (Brasil et al. 2024; Medeiros & Araújo, 2014; Santos et al. 2017). No entanto, este estudo específico se concentra em analisar essas variáveis ao longo dos meses de acordo com a altura de chuva de cada evento diário obtidos nos bancos de dados pluviométrico (Figura 3; Figura 4; Tabela 2), a fim de fornecer mais detalhes para os gestores definirem práticas de conservação do solo e da água em ambientes semiáridos conforme as contribuições das características da chuva (altura, energia cinética e índice de erosividade) em escala mensal (Figura 3; Tabela 2).

Sousa (2019), que estudaram o comportamento das chuvas na Região

Metropolitana do Cariri, concluíram que o período chuvoso se estende de janeiro a abril e o período seco de maio a dezembro, conforme observado neste estudo para as variáveis altura, energia cinética e índice de erosividade da chuva (Figura 3; Figura 4; Tabela 2). Analisando a variabilidade total da chuva em escala mensal acumulada, observa-se que para o mês de março, o total acumulado de chuva neste mês pode representar 50% da chuva média total do período de estudo em ambos os postos (Figura 5), comportamento semelhante ao observado por Brasil et al. (2022a); Brasil et al. (2022b); Guerreiro et al. (2013); Guerreiro et al. (2021); Guerreiro et al. (2022) para o estado do Ceará.

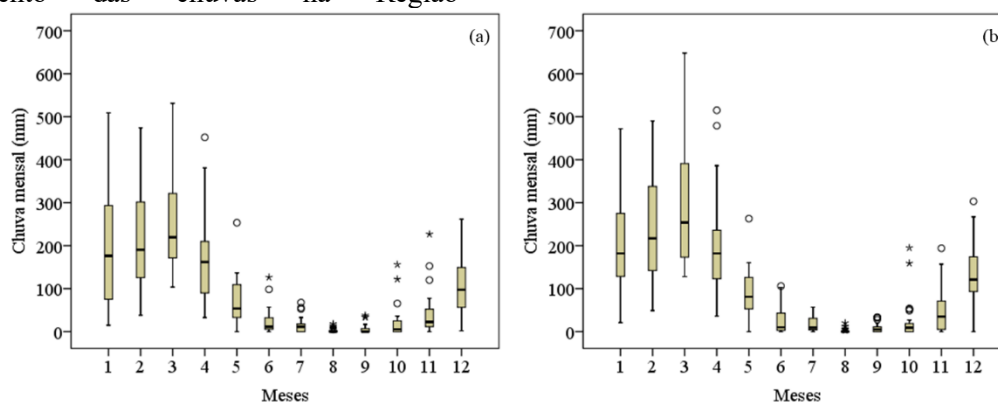


Figura 5. Série histórica da variabilidade total de chuva acumulada mensal para o município do Crato-CE, posto Crato (a) e posto Lameiro (b)

Com base nos resultados obtidos, o semestre seco ocorre de maio a novembro, com 16% da altura, energia cinética e índice de erosividade, conforme observado pela redução na amplitude do box plot (Figura 3) e pela variação percentual nos totais mensais (Figura 4) em ambos os postos. Essas características da distribuição das chuvas em cada posto destacam a alta variabilidade temporal da ocorrência de chuva ao longo dos meses do ano (Figura 5), o que é comum no estado do Ceará (Guerreiro et al., 2013).

Essa irregularidade na distribuição das chuvas ao longo do ano resulta em diferentes alturas de chuva e alta variabilidade interanual na duração das estações hidrológicas (Soares et al., 2024), proporcionando assim respostas rápidas ao desenvolvimento da cobertura vegetal da caatinga e aos processos hidrológicos (Andrade et al., 2020), em especial, na atenuação da intensidade da precipitação interna (Brasil et al., 2020), atenuação no número de gotas que chegam ao solo (Brasil et al., 2022b) e atenuação na energia cinética e erosividade em diferentes estágios de desenvolvimento da vegetação de caatinga em uma região semiárida (Brasil et al., 2024).

De modo geral, a variabilidade intra e interanual da chuva é causada por diferentes sistemas atmosféricos que atuam no Nordeste brasileiro (Silva et al., 2012), principalmente os Vórtices Ciclônicos em Ar Superior, a Zona de Convergência do Atlântico Sul e os Sistemas Frontais e o avanço da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) entre janeiro e maio, com máximo em março-abril sobre o Nordeste. Esses fenômenos influenciam direta e indiretamente a ocorrência de chuvas sobre a região Nordeste do Brasil (Guerreiro et al., 2013; Silva et al., 2012), como visto neste estudo.

Escala de eventos diários por ano

O posto do Crato apresenta chuva média anual de 1.122,1 mm (Figura 6a) e o posto Lameiro apresenta chuva média anual de 1.275,0 mm (Figura 6b). Os resultados comprovam que o posto Lameiro registra maiores chuvas ao longo dos meses (Figura 3; Figura 4), na chuva média anual e no acumulado anual (Figura 6b), um aumento de 12% em relação à chuva média anual do posto Crato. Em ambos os postos, o ano com maior acumulado de chuva foi 2011, com 1.588,4 mm para posto Crato (Figura 6a) e 1.848,5 mm para o posto Lameiro (Figura 6b). Chuvas como as de 2011 podem ser prejudiciais às pessoas que vivem em áreas de risco, transbordando canais e impactando diretamente na economia por meio de perdas de safras, como também observado por Oliveira Junior et al. (2019).

Além disso, ambos os postos apresentam séries históricas de chuva com anos alternados acima e abaixo da média (Figura 6), destacando extremos climáticos, como secas e inundações constantes, comuns no estado do Ceará (Marengo et al., 2022; Pereira et al., 2025; Sampaio et al., 2019). Analisando a figura 6, pode-se observar a variação da chuva ao longo dos anos com valores acima da média histórica, anos abaixo da média histórica e outros próximos da média. O estudo de Silva (2017) destaca que os anos de 1985 e 2011 foram classificados como muito chuvosos e 1993 e 2012 como muito secos.

De acordo com a figura 6, são evidentes dois períodos sucessivos com chuva abaixo da média: 1997–2003 e a seca mais recente (2012–2017), em que todos os anos para o posto do Crato ficaram abaixo da média histórica (Figura 6a) e para o posto do Lameiro, apenas os anos de 2013 e 2014 ficaram acima da média (Figura 6b).

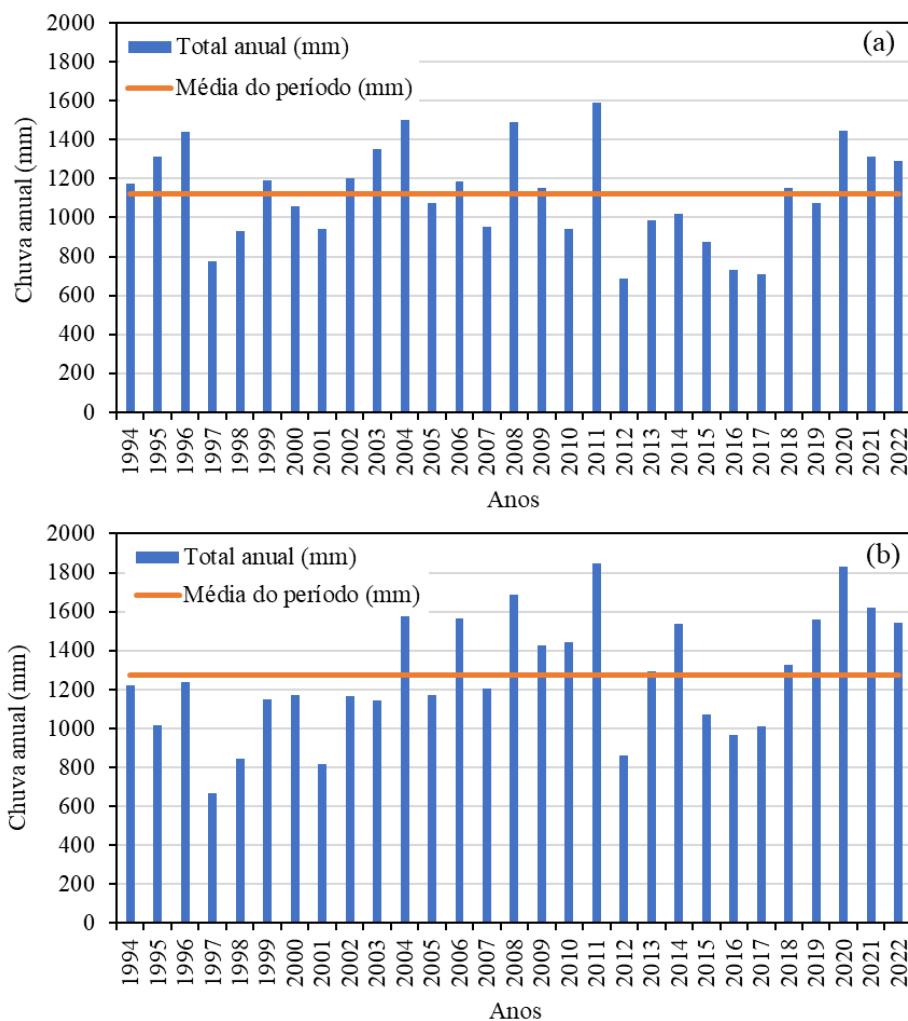


Figura 6. Variação da chuva total ao longo dos anos e média de chuva para o período de estudo para o posto Crato (a) e Lameiro (b)

De acordo com o estudo de Marengo et al. (2022), foram observados anos com seca durante o El Niño em 1983, 1998 e 2016, bem como em outros anos caracterizados por águas superficiais quentes no Atlântico Norte tropical. Este foi o caso da seca de 2012–2018 com clima tropical mais quente no Atlântico Norte e agravada por um evento El Niño em 2016 (Marengo et al., 2020). As influências do Oceano Pacífico tropical através do El Niño e de um Atlântico Norte tropical mais quente que move a ZCIT de forma anormal para o norte são as principais causas da falta de chuvas e da seca na região, favorecendo assim este último longo período de seca em ambas as localidades.

Essa diferença na alta variabilidade espaço-temporal na distribuição energia cinética e índice de erosividade ao longo dos meses e na altura do total anual se deve às características específicas do município de Crato. O município

está próximo ao topo da Floresta Nacional do Araripe, que sofre influência direta do efeito orográfico da Chapada do Araripe, onde as temperaturas tendem a ser mais amenas devido à altitude. Por estar localizado no sopé de uma floresta onde a altitude no topo da Floresta Nacional do Araripe pode chegar a 920 m e o município estar localizado a uma altitude em torno de 425 m, ele sofre influência direta da altitude e da Floresta Nacional do Araripe sobre a chuva total anual, mensal e diária em cada posto pluviométrico.

Esse efeito fica evidente ao analisar as altitudes de cada posto em relação ao topo da Floresta Nacional do Araripe. O posto Lameiro localiza-se próximo a encosta da Chapada do Araripe e o posto Crato está distante 13 km em linha reta do posto Lameiro. Assim, o posto Lameiro registra maiores características (altura,

energia cinética e índice de erosividade) devido à sua altitude de 448 m em comparação ao posto Crato, que tem altitude de 425 m. Esses resultados confirmam a alta variabilidade espaço-temporal da chuva, energia cinética e índice de erosividade dentro do próprio município. Segundo Pepin et al. (2022), a altura de chuva geralmente aumenta com a elevação. No entanto, as relações precipitação-elevação são altamente variáveis no espaço e dependem da escala considerada.

Conclusões

Dados diários de altura de chuva ao longo de 29 anos obtidos de um banco de dados pluviométricos em uma região semiárida do Brasil foram utilizados para calcular a energia cinética e o índice de erosividade da chuva. A relação entre chuva versus energia cinética na escala de eventos diários apresenta uma relação linear e uma relação potencial entre chuva versus índice de erosividade. As características da chuva (altura, energia cinética e índice de erosividade) no posto Lameiro apresentaram valores maiores do que no posto Crato ao longo dos meses e no total anual devido às características específicas de altitude entre os postos.

Os postos pluviométricos do Crato e Lameiro apresentam duas estações bem definidas: a chuvosa, que ocorre de dezembro a abril, com 84% da altura, energia cinética e índice de erosividade, pois esses meses concentram os maiores eventos diários. O mês mais chuvoso é março, representando 22% do total de chuva, energia cinética e índice de erosividade, e agosto, o menor com 0,2% do total. O semestre seco ocorre de maio a novembro, com 16% da altura, energia cinética e índice de erosividade.

Os achados deste estudo melhoram a compreensão das interações entre a dinâmica da distribuição da energia cinética da chuva e para futuras investigações do potencial de erosividade em locais que não possuem características da chuva medidas. Além disso, esperamos que o modelo utilizado neste estudo possa ser aplicado em outras pesquisas hidrológicas em regiões semiáridas, utilizando variáveis facilmente obtidas como entrada, como a altura total de chuva em escala diária.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB) da

Brasil, J. B.; Meireles, A. C. M.; Oliveira, C. W.; Patrício, E. A.; Carneiro, A. A. C.; Menezes, S. M.; Arraes, F. D. D.

Universidade Federal do Cariri (UFCA) pela logística para realização do trabalho, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo seu apoio financeiro aos bolsistas participantes desta pesquisa, ao PROJETO: Edital n.162022, PROCESSO CAPES: 88887.807824/2023-00, PDPG – Pós-doutorado Estratégico e à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCME pelo fornecimento dos dados.

Referências

- Araújo, A. O., Mendonça, L. A. R., Lima, M. G. D. S., Mendonça, E. D. S., Silva, F. J. A. D., Sasaki, J. M., ... & Feitosa, J. V. (2017). Adjustment of decay rates of organic matter in a Latossolo Vermelho-Amarelo in the Araripe National Forest, Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 12(8), 588–596. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11828>.
- Andrade, E. M., Guerreiro, M. J. S., Palácio, H. A. Q., & Campos, D. A. (2020). Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. *Journal of Hydrology: regional studies*, 27, 100649. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100649>.
- Brasil, J. B., de Andrade, E. M., de Queiroz Palácio, H. A., Santos, J. C. N. D., & Medeiros, P. H. A. (2020). Temporal variability of throughfall as a function of the canopy development stage: from seasonal to intra-event scale. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1640-1651. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1769105>.
- Brasil, J. B., Andrade, E. M., Guerreiro, M. S., Palácio, H. A. Q., Ribeiro Filho, J. C., Fernández-Raga, M., & Medeiros, P. H. A. (2024). Measurement and modelling of kinetic energy and erosivity of rainfall and throughfall in a tropical semiarid region. *Journal of Hydrology*, 644, 132088. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132088>.
- Brasil, J. B., Guerreiro, M. S., Andrade, E. M., Palácio, H. A. Q., Medeiros, P. H. A., & Ribeiro Filho, J. C. (2022a). Minimum rainfall inter-event time to separate rainfall events in a low latitude semi-arid environment. *Sustainability*, 14(3), 1721. <https://doi.org/10.3390/su14031721>.

Brasil, J. B., Andrade, E. M., Palácio, H. A. Q., Fernández-Raga, M., Ribeiro Filho, J. C.,

- Medeiros, P. H. A., & Guerreiro, M. S. (2022b). Canopy effects on rainfall partition and throughfall drop size distribution in a tropical dry forest. *Atmosphere*, 13(7), 1126. <https://doi.org/10.3390/atmos13071126>.
- Campos, D. A., Andrade, E. M., Castanho, A. D., Feitosa, R. C., & Palácio, H. Q. (2020). Biomass dynamics in a fragment of Brazilian tropical forest (Caatinga) over consecutive dry years. *Applied Sciences*, 10(21), 7813. <https://doi.org/10.3390/app10217813>.
- Guerreiro, M. J. S., Andrade, E. D., Abreu, I., & Lajinha, T. (2013). Long-term variation of precipitation indices in Ceará State, Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 33(14), 2929-2939. <https://doi.org/10.1002/joc.3645>.
- Guerreiro, M. S., Maia de Andrade, E., Palácio, H. A. D. Q., Brasil, J. B., & Filho, J. C. R. (2021). Enhancing ecosystem services to minimize impact of climate variability in a dry tropical forest with Vertisols. *Hydrology*, 8(1), 46. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010046>.
- Guerreiro, M. S., de Andrade, E. M., de Sousa, M. M., Brasil, J. B., Filho, J. C. R., & de Queiroz Palácio, H. A. (2022). Contribution of non-rainfall water input to surface soil moisture in a tropical dry forest. *Hydrology*, 9(6), 102. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060102>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação com data de referência em 1 de julho de 2021 (PDF). Consultado em 28 de agosto de 2024.
- Medeiros, P. H. A., & De Araújo, J. C. (2014). Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 1216-1223. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0809-9>.
- Marengo, J. A., Galdos, M. V., Challinor, A., Cunha, A. P., Marin, F. R., Vianna, M. D. S., ... & Bender, F. (2022). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability*, 1(1), e17. <https://doi.org/10.1002/cli2.17>.
- Marengo, J. A., Cunha, A. P. M., Nobre, C. A., Ribeiro Neto, G. G., Magalhaes, A. R., Torres, R. R., ... & Álvala, R. C. (2020). Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 C. *Natural Hazards*, 103, 2589-2611. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>.
- Oliveira Júnior, A. I., Martins, E. S., da Costa, C. T. F., & Caldas, H. F. M. (2019). Análise da precipitação e determinação de equações de chuvas intensas para o município de Crato-CE situado no semiárido do Brasil. *Revista Geama*, 5(3), 56-65. <https://journals.ufrpe.br/index.php/geama/artic/e/view/2806>.
- Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., ... & Adler, C. (2022). Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, 60(1), e2020RG000730. <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>.
- Pereira, B. S., Uchôa, J. G. S. M., Freitas, G. S., Meira Neto, A. A., Anache, J. A. A., Wendland, E. C., ... Medeiros, P. H. A. (2025). Hydrological heritage: a historical exploration of human–water dynamics in northeast Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2446272>.
- Panagos, P., Borrelli, P., Matthews, F., Liakos, L., Bezak, N., Diodato, N., & Ballabio, C. (2022). Global rainfall erosivity projections for 2050 and 2070. *Journal of Hydrology*, 610, 127865. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127865>.
- Silva, V. P. R., Pereira, E. R. R., & Almeida, R. S. R. (2012). Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 163-172. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200005>.
- Silva, J. M. O. (2017). Utilização de anos-padrão no estudo da variabilidade pluviométrica no município do Crato/Ceará. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, 1, 2060-2072. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2421>.
- Sousa, S. G. (2019). Temporal analysis of rainfall precipitation behavior in the Metropolitan Region of Cariri (MRC), Brazil. *Geographical Journal of Central America*, 2(63), 319-340. <https://doi.org/10.15359/rgac.63-2.12>.
- Sampaio, M. R. L., Barboza, E. N., Crisostomo, N. C., Bezerra Neto, F. das C., Silva, D. H. da, Felizardo, R. de O., & Pinto, N. A. (2019). Estudo comportamental da precipitação pluviométrica no município de Crato-Ceará, no período entre 1974-2009. *Revista Brasileira De Gestão Ambiental*, 13(4), 27–33.

- <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RBGA/article/view/7729>.
- Santos, J. C. N. D., Andrade, E. M. D., Medeiros, P. H. A., Palácio, H. A. D. Q., & Araújo, J. R. D. (2017). Sediment delivery ratio in a small semi-arid watershed under conditions of low connectivity. *Revista Ciência Agronômica*, 48(1), 49-58. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170006>.
- Santos, W. P., Avanzi, J. C., Viola, M. R., Chou, S. C., Acuña-Guzman, S. F., Pontes, L. M., & Curi, N. (2022). Projections of rainfall erosivity in climate change scenarios for the largest watershed within Brazilian territory. *Catena*, 213, 106225. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106225>.
- Souza, C. A. A., Jardim, A. M. D. R. F., de Souza, L. S. B., de Moraes, J. E. F., Júnior, G. D. N. A., Alves, C. P., ... & da Silva, T. G. F. (2025). Rainfall partitioning of tree species in a seasonally dry forest in a semiarid region of Brazil. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2025.100645>.
- Soares, N. S., Costa, C. A. G., Carneiro de Lima, J. B., Francke, T., & de Araújo, J. C. (2024). Method for identification of hydrological seasons in the semi-arid Caatinga biome, Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 69(3), 309-320. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2311758>.
- Teixeira, D. B. S., Cecílio, R. A., Moreira, M. C., Pires, G. F., & Fernandes Filho, E. I. (2022). Recent advancements in rainfall erosivity assessment in Brazil: A review. *Catena*, 219, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106572>.
- Wang, L., Li, Y., Gan, Y., Zhao, L., Qin, W., & Ding, L. (2024). Rainfall erosivity index for monitoring global soil erosion. *Catena*, 234, 107593. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107593>.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Zhao, Y., Zhu, D., Wu, Z., & Cao, Z. (2024). Extreme rainfall erosivity: Research advances and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 917, 170425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170425>.