



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

MARIANA GONÇALVES VIEIRA DA SILVA

**EROSIVIDADE DA CHUVA NA BACIA EXPERIMENTAL DE AIUABA,
SEMIÁRIDO CEARENSE**

FORTALEZA

2025

MARIANA GONÇALVES VIEIRA DA SILVA

EROSIVIDADE DA CHUVA NA BACIA EXPERIMENTAL DE AIUABA, SEMIÁRIDO
CEARENSE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo
Coorientadora: Dra. Nazaré Suziane Soares

FORTALEZA

2025

MARIANA GONÇALVES VIEIRA DA SILVA

EROSIVIDADE DA CHUVA NA BACIA EXPERIMENTAL DE AIUABA, SEMIÁRIDO
CEARENSE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 19/09/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Nazaré Suziane Soares (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. George Leite Mamede
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

A Deus, por guiar meus passos e me dar força para seguir em frente.

À minha mãe, que, mesmo sem oportunidades de estudo, sempre me ensinou o valor da dedicação e da perseverança. Ao meu pai, que trabalha incansavelmente para me proporcionar oportunidades de aprendizado e crescimento. Ao meu marido, Diego, por estar ao meu lado em toda a trajetória acadêmica, oferecendo amor, paciência e compreensão nos momentos de estresse e dificuldade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir que eu esteja aqui e por me guiar em cada etapa desta jornada.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos e pelo apoio financeiro que tornou possível o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), por me proporcionar o ambiente acadêmico e os recursos necessários para o estudo.

À FUNCEME e ao grupo HIDROSED, pelo apoio técnico e científico, que contribuiu significativamente para a realização desta pesquisa.

Ao Prof. José Carlos de Araújo e à Dra. Nazaré Suziane Soares, por suas orientações, paciência e dedicação. Suas valiosas contribuições, críticas construtivas e incentivo constante foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos membros da banca examinadora, Teresa Raquel Lima Farias e George Leite Mamede, por dedicarem seu tempo, suas observações e sugestões, que enriqueceram este trabalho.

À Dona Hosana Américo, pela acolhida, hospitalidade e apoio que tornaram a realização desta pesquisa mais leve e motivadora.

E, finalmente, à minha família, meu marido e amigos, pelo amor, paciência e apoio incondicional. Sem vocês, acreditar em mim e superar cada obstáculo teria sido muito mais difícil. Este trabalho também é fruto da fé, da confiança e do incentivo de todos vocês.

“Vou em busca de um grande talvez.”
(François Rabelais, 1553).

RESUMO

O estudo da erosividade das chuvas é de grande relevância devido aos seus impactos sobre o solo e o meio ambiente, especialmente em regiões vulneráveis, como o semiárido. No entanto, há uma escassez significativa de dados de erosividade para áreas como a Caatinga. Esse trabalho tem como objetivo sistematizar dados de disdrômetro, estimar a energia cinética, a erosividade das chuvas, e o coeficiente de arraste das gotas na Caatinga do semiárido cearense, particularmente na Bacia Experimental de Aiuaba. A erosividade foi estimada com base na energia cinética da chuva e na intensidade máxima em intervalos de 30 minutos, sendo comparada com a equação do fator de erosividade de Wischmeier e Smith (1978). O desenvolvimento de um programa computacional possibilitou a análise detalhada dos dados do disdrômetro e o cálculo da erosividade de cada evento de chuva. O coeficiente de arraste das gotas de chuva, um parâmetro necessário ao cálculo da velocidade última, é inexplorado na região da Caatinga. Os resultados indicaram que a energia cinética medida foi 1,9 vezes superior à estimada por modelos e que a erosividade média das chuvas foi aproximadamente duas vezes maior do que a obtida pelo método convencional, evidenciando a subestimação do potencial erosivo pelo modelo tradicional. Os parâmetros calibrados para a equação de erosividade mensal da Caatinga resultou em valores superiores aos encontrados para região temperada do Brasil, confirmando a necessidade de ajustes regionais. Os resultados dessa pesquisa fornecem parâmetros específicos para a Caatinga e podem subsidiar a melhoria de modelos e o desenvolvimento de estratégias de conservação do solo em áreas semiáridas.

Palavras-chave: disdrômetro; erosão; energia cinética; coeficiente de arraste de gotas.

ABSTRACT

The study of rainfall erosivity is of great relevance due to its impacts on soil and the environment, especially in vulnerable regions such as the semiarid. However, there is a significant scarcity of erosivity data for areas like the Caatinga. This work aims to systematize disdrometer data, estimate kinetic energy, rainfall erosivity, and the raindrop drag coefficient in the Caatinga of the semiarid region of Ceará, particularly in the Aiuaba Experimental Basin. Erosivity was estimated based on the rainfall kinetic energy and the maximum intensity in 30-minute intervals, and compared with the erosivity factor equation of Wischmeier and Smith (1978). The development of a computational program enabled detailed analysis of disdrometer data and the calculation of erosivity for each rainfall event. The raindrop drag coefficient, a parameter required for calculating terminal velocity, remains unexplored in the Caatinga region. The results indicated that the measured kinetic energy was 1.9 times higher than that estimated by models and that the average rainfall erosivity was approximately twice as high as that obtained through the conventional method, highlighting the underestimation of erosive potential by the traditional model. The calibrated parameters for the monthly erosivity equation of the Caatinga resulted in higher values than those found for the temperate region of Brazil, confirming the need for regional adjustments. The findings of this research provide specific parameters for the Caatinga and may support improvements in models and the development of soil conservation strategies in semiarid areas.

Keywords: disdrometer; erosion; kinetic energy; drag coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Localização da Bacia Experimental de Aiuaba e do bioma Caatinga	20
Figura 2	- Aparelho disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba, onde: (a) encontra-se a fonte de emissão laser-óptica; (b) conversor de dados e as baterias de alimentação do disdrômetro	21
Figura 3	- Fluxograma do algoritmo para organização e análise de dados do disdrômetro	23
Figura 4	- Combinação das classes de diâmetro e velocidade fornecidos pelo disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba e usado no âmbito da presente pesquisa	25
Figura 5	- Ilustração do critério de separação dos eventos de chuvas para a presente pesquisa, realizada na Bacia Experimental de Aiuaba	26
Figura 6	- Relação entre intensidade da chuva e energia cinética específica	28
Figura 7	- Dados do modo como saem do disdrômetro em formato de documento de texto e após processamento no algoritmo em formato de Excel	33
Figura 8	- Relação entre a energia cinética específica e a intensidade em 30 minutos na Bacia Experimental de Aiuaba. Os símbolos BF significam Brown e Foster (1987) e WS Wischmeier e Smith (1978)	34
Figura 9	- Relação entre a energia cinética específica (EC/P) medida e modelada para os 58 eventos de chuva encontrados durante o período de observação (03/04/2022 a 30/09/2023) na Bacia Experimental de Aiuaba.	35
Figura 10	- Relação entre a Erosividade da chuva (R) medida e modelada para os 58 eventos de chuva encontrados durante o período (03/04/2022 a 30/09/2023) de observação na Bacia Experimental de Aiuaba. O símbolo WS significa Wischmeier e Smith (1978)	37
Figura 11	- Relação entre o fator de precipitação (chuva mensal, [mm] ao quadrado dividida pela chuva anual média [mm]) e a erosividade (R) da chuva na Bacia Experimental de Aiuaba	42
Figura 12	- Coeficiente de arraste associado a cada diâmetro fornecido pelo disdrômetro e aos valores encontrados na literatura, conforme Mason (1957)	43
Figura 13	- Frequência de ocorrência dos valores do coeficiente de arraste das gotas	

de chuva na Bacia Experimental de Aiuaba (os valores de d se referem
ao diâmetro das gotas) 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Dados sobre o diâmetro fornecidos pelo disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba e usados no âmbito da presente pesquisa.....	23
Tabela 2	- Dados sobre a velocidade fornecidos pelo disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba e usados no âmbito da presente pesquisa.....	24
Tabela 3	- Valores de erosividade e a classificação dos eventos de chuvas detectados pelo algoritmo no período de 2022 e 2023 para a Bacia Experimental de Aiuaba	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α	parâmetro (multiplicador) de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992)
β	parâmetro (potência) de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992)
ρ_w	Densidade do ar
ρ_A	Densidade da água
A	Área de captação do disdrômetro
BEA	Bacia Experimental de Aiuaba
BF	Brown e Foster
C	Fator de cobertura vegetal de Wischemeier e Smith (1978)
CA	Coefficiente de arraste das gotas de chuva
d	Diâmetro em mm
EC	Energia cinética
EC/P	Energia cinética específica
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia
g	Aceleração da gravidade
ha	Hectare
HIDROSED	Hidrologia e Sedimentologia do Semi-Árido
Ha	Média da chuva anual
Hm	Chuva mensal
I30	Intensidade máxima da chuva em 30 minutos
I _p	Intensidade média da chuva
J	Joule
k	Constante que equivale a $2,613 \cdot 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
M	Massa
MJ	Megajoule
P	Lâmina total precipitada no evento
R	Fator de erosividade da chuva segundo Wischemeier e Smith (1978)
R ²	Coefficiente de determinação
u	Velocidade de impacto
USLE	Equação Universal de Perda de Solo
WS	Wischmeier e Smith

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Hidrologia do Semiárido	15
2.2	Sedimentologia	15
2.3	Erosividade da chuva	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	Área de Estudo	19
3.2	Coleta, processamento e sistematização de dados	20
3.2.1	<i>Coleta de dados</i>	20
3.2.2	<i>Processamento de dados do disdrômetro</i>	21
3.2.3	<i>Análise dos eventos de chuva</i>	25
3.3	Energia cinética e erosividade da chuva	26
3.3.1	<i>Energia cinética da chuva medida e modelada</i>	26
3.3.2	<i>Erosividade da chuva medida e modelada</i>	29
3.4	Medida do coeficiente de arraste das gotas de chuva	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	Coleta, processamento e sistematização de dados	32
4.2	Energia cinética e erosividade da chuva	34
4.2.1	<i>Energia cinética medida e modelada</i>	34
4.2.2	<i>Erosividade da chuva</i>	36
4.3	Medida do coeficiente de arraste da chuva	43
5	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	47
	ANEXO A – CÓDIGO EM LINGUAGEM DE PYTHON PARA LEITURA DOS DADOS DO DISDRÔMETRO	52

1 INTRODUÇÃO

A compreensão aprofundada dos processos hidrológicos em regiões semiáridas tropicais é necessária para orientar as decisões sobre o uso sustentável da água e do solo, ajudando a enfrentar os desafios enfrentados por essas regiões (Brasil, 2022). No semiárido brasileiro, onde o regime de chuvas é irregular, com longos períodos de seca e chuvas concentradas em eventos intensos, os processos hidrológicos se tornam ainda mais críticos (Lima *et al.*, 2020).

A escolha do estudo da erosividade das chuvas no contexto da Caatinga é motivada pela necessidade de entender os impactos hidrológicos em regiões semiáridas, onde os eventos de precipitação são marcados por alta intensidade. A erosividade das chuvas é um fator determinante para uma série de processos hidrológicos, afetando desde a disponibilidade hídrica, a dinâmica de sedimentos e o fluxo de nutrientes no ambiente (Lopes, Neto e Pinheiro, 2015).

Ao relacionar a erosividade com as mudanças nos padrões de precipitação se busca entender como o risco de erosão do solo está evoluindo em resposta às mudanças climáticas (Petsch *et al.*, 2022). A erosividade da chuva em regiões semiáridas é elevada durante os períodos de precipitação intensa, o que pode influenciar o comportamento da água na superfície, sua capacidade de transporte e a interação com a vegetação e o solo (Medeiros e De Araújo, 2014).

A erosividade da chuva está diretamente relacionada à energia cinética das chuvas e à intensidade da precipitação. A energia cinética das gotas de chuva é proporcional à sua massa e ao quadrado da velocidade, o que significa que chuvas intensas têm maior potencial de erosividade do que chuvas moderadas e prolongadas (Sreekanth *et al.*, 2019). Nesse contexto, os processos hidrológicos como a infiltração e o escoamento superficial são influenciados pela quantidade de chuva que o solo é capaz de absorver, bem como pela sua distribuição ao longo do tempo. Gotas maiores tendem a ter mais energia cinética quando atingem o solo, causando um impacto mais significativo e, portanto, uma maior capacidade de erosão (Brasil *et al.*, 2022).

A Equação Universal de Perda de Solo (*Universal Soil Loss Equation* - USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), é uma ferramenta usada para prever o impacto do uso da terra na erosão do solo, fornecendo a erosão média anual de longos períodos (Haan, Barfield e Hayes, 1994). O fator de erosividade da chuva é um dos elementos da USLE e representa o potencial da precipitação de causar erosão do solo (Righetto, 1998). De acordo

com o mesmo autor, para calcular o seu fator é necessário saber a energia cinética da chuva (EC) e a sua intensidade máxima em 30 min (I_{30}).

Há uma lacuna significativa na literatura relacionada aos parâmetros hidrológicos para a Caatinga, como o coeficiente de arraste das gotas de chuva, o fator de cobertura vegetal da Caatinga preservada e a energia cinética das precipitações. Esses parâmetros são importantes para entender como as condições locais influenciam a erosividade das chuvas e como esses dados podem ser aplicados para aprimorar modelos hidrológicos existentes. A calibração desses valores permite melhor manejo da água e do solo na região. Assim, este estudo busca criar dados regionais específicos e aplicar uma abordagem científica para melhorar a compreensão da erosividade da chuva na região semiárida do Brasil.

O objetivo geral desta pesquisa consiste em caracterizar o potencial erosivo da chuva na região do semiárido brasileiro, com base em dados de disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba. São objetivos específicos: (i) coletar, processar e sistematizar de forma automatizada os dados do disdrômetro; (ii) estimar a energia cinética e a erosividade da chuva, comparando-as com aquelas do modelo de Wischmeier e Smith (1978) e (iii) estimar o coeficiente de arraste de gotas de chuva.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Hidrologia do Semiárido

O semiárido brasileiro é caracterizado como um território com chuvas irregulares e secas frequentes, onde o solo de embasamento cristalino limita a disponibilidade de água subterrânea. Essas condições criam uma complexa relação com a sociedade local, aumentando a vulnerabilidade à desertificação, erosividade e problemáticas socioambientais (Andrade *et al.*, 2020; Souza, Souza e Sousa, 2022). Os eventos de precipitação são, em geral, concentrados em poucos meses e de alta intensidade, o que aumenta o risco de erosão e limita a infiltração da água no solo (Rodrigues *et al.*, 2009; Medeiros e De Araújo, 2014).

Segundo Santos *et al.* (2017), as chuvas no semiárido ocorrem de forma torrencial e em curtos intervalos, o que favorece o escoamento superficial em desvantagem à infiltração. Esse escoamento, por sua vez, transporta sedimentos e nutrientes, influenciando tanto a fertilidade do solo quanto a capacidade de retenção de água nas bacias hidrográficas (Silva *et al.*, 2022). A limitada capacidade de infiltração do solo aumenta a vulnerabilidade à erosão hídrica, agravando o quadro de degradação ambiental, especialmente em áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal (Sousa *et al.* 2020).

Além disso, a evaporação intensa devido às elevadas temperaturas na região faz com que grande parte da água das precipitações seja rapidamente perdida para a atmosfera, reduzindo ainda mais a quantidade de água disponível para o armazenamento (Cirilo, 2008). Outro fator relevante na hidrologia do semiárido é o impacto da vegetação na regulação do ciclo hidrológico. A vegetação da Caatinga, quando intacta, contribui para a redução do escoamento superficial e a proteção do solo contra o impacto direto das gotas de chuva (Silva Jr *et al.*, 2011).

2.2 Sedimentologia

A Equação Universal de Perdas do Solo (USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), busca quantificar o impacto das chuvas e das práticas de manejo na erosão do solo, servindo de base para muitos estudos posteriores sobre produção de sedimentos.

O processo de erosão hídrica tem três etapas: desagregação, transporte e deposição. Na desagregação, as partículas do solo são soltas dos agregados pela ação das gotas de chuva, especialmente em solos sem cobertura vegetal ou que tenham algum manejo

agrícola insustentável, as partículas leves, como matéria orgânica e argila, são preferencialmente soltas; no transporte, essas partículas são movidas pela água; na deposição, quando a água perde energia, as partículas são depositadas (Oliveira *et al.*, 2023).

França *et al.* (2020) reforçam que as ravinas, sulcos e voçorocas são sinais visíveis de erosão severa, tornando as áreas afetadas improdutivas. Além disso, os sedimentos resultantes desses processos erosivos contribuem para o assoreamento de rios e outros corpos d'água, reduzindo sua vazão e impactando negativamente o meio ambiente e o uso humano desses recursos hídricos.

A cobertura vegetal (representada na USLE pelo fator adimensional *C*) também é um fator de destaque na USLE. Segundo Moura *et al.* (2021), a vegetação da Caatinga tem características únicas que influenciam diretamente na erosividade das chuvas. A revisão dos valores do fator *C* para a região é importante para adaptar modelos universais às condições locais, permitindo uma melhor estimativa dos impactos hidrológicos.

2.3 Erosividade da chuva

A erosividade da chuva é um conceito fundamental em estudos de erosão hídrica, pois está diretamente relacionada à energia gerada pelas gotas de chuva ao atingirem a superfície do solo. Segundo Oliveira *et al.* (2023), a erosividade é um fator importante na modelagem de processos erosivos, especialmente em regiões semiáridas, onde eventos de precipitação intensa podem gerar grandes volumes de escoamento superficial em curtos períodos. Santos *et al.* (2024) reforçam que a perda de solo por erosão hídrica no semiárido brasileiro tem sido motivo de atenção, em especial no âmbito ambiental.

As áreas mais propensas à erosão e a serem impactadas pela erosividade são aquelas que apresentam baixos teores de matéria orgânica e argila, solos com fraco grau de agregação, tendo assim uma baixa proteção ao potencial erosivo (Macêdo *et al.*, 2021). Métodos agrícolas não sustentáveis também colaboram para uma aceleração no processo de erosão, podendo causar também uma queda na produção (Alves *et al.*, 2022).

Um dos parâmetros importantes para o cálculo da erosividade é a energia cinética das gotas de chuva. Dias e Silva (2003) ressaltam que a energia cinética da chuva é diretamente proporcional à sua intensidade e ao tamanho das gotas. Estudos recentes, como os de Costa *et al.* (2023), calcularam a erosividade utilizando modelos matemáticos por meio de dados pluviométricos da chuva no semiárido.

A utilização de disdrômetro para medir as características físicas da chuva, como o diâmetro das gotas e a velocidade de queda, é um avanço significativo na avaliação da erosividade. Joss e Waldvogel (1967) foram pioneiros na aplicação desses dispositivos, que permitem uma análise detalhada da distribuição de tamanhos de gotas de chuva, oferecendo uma visão mais precisa da energia cinética associada à precipitação. Estudos recentes, como os de Queiroz (2021) e Carnevskis (2023), apontam que os disdrômetros proporcionam dados essenciais para a calibração de modelos hidrológicos em áreas com dados pluviométricos escassos ou de baixa qualidade.

Outro parâmetro importante para a hidrossedimentologia a ser considerado é o coeficiente de arraste das gotas (CA), que se correlaciona com a resistência oferecida pelo ar ao movimento das gotas de chuva. O coeficiente influencia diretamente a velocidade terminal das gotas, que, por sua vez, está relacionada à energia cinética liberada quando estas atingem o solo. Setti *et al.* (2022) analisaram a importância do coeficiente de arraste para a calibração de modelos hidrológicos. Entretanto, há uma escassez de dados específicos sobre o coeficiente em regiões como a Caatinga, onde o comportamento das gotas pode ser diferente devido às condições climáticas e de vegetação locais.

A compreensão dos padrões de processos erosivos ao longo do período chuvoso pode subsidiar ações de planejamento territorial e de conservação do solo. O monitoramento contínuo dos padrões de chuvas e erosividade contribui na identificação de áreas mais vulneráveis à erosão e direciona medidas de conservação de forma mais eficaz e sustentável (Silva e Carvalho, 2023).

A degradação do solo na América do Sul tem sido agravada por práticas agrícolas adversas, desmatamento e chuvas intensas (Riquetti *et al.*, 2020). Os autores ainda enfatizam que o continente apresenta uma complexidade climática significativa, abrangendo os tipos climáticos A (tropical), C (temperado), B (árido e semiárido) e E (polar) de Köppen-Geiger. Os padrões de erosividade na América do Sul são influenciados por sistemas sinóticos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas frontais, ciclones extratropicais e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que frequentemente geram chuvas intensas e altos valores de Fator R (Riquetti *et al.*, 2020).

O Brasil, com seu vasto território (cerca de 8.500.000 km²), possui heterogeneidade geográfica e climática, com altitudes variando de 0 a 2600 m e predominância de clima tropical e úmido (Mello *et al.*, 2013; Almagro *et al.*, 2017). Historicamente, estudos de erosividade no Brasil eram limitados pelo uso de séries pluviográficas curtas (menos de 20 anos) (Almagro *et al.*, 2017; Oliveira, Wendland e

Nearing, 2012). O índice de erosividade anual no Brasil varia amplamente, com extremos observados entre 1672 e 22.452 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (Oliveira, Wendland e Nearing, 2012). Um mapa anterior de 2004 para o Brasil utilizou 1600 estações pluviométricas e 8 equações adaptadas, encontrando valores variando de 3116 a 20.035 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (Da Silva, 2004). De acordo com o mesmo autor, o mapa inicial indicou que a maior parte do território (68,8%) apresentava potencial erosivo classificado como forte ou muito forte.

O clima do Nordeste brasileiro é quente e seco, típico de regiões semiáridas, caracterizado pela recorrência natural de secas e vulnerabilidade a extremos de variabilidade climática (Marengo, Torres e Alves, 2017). A região semiárida brasileira é caracterizada por baixa e irregular precipitação, alta insolação e alta evapotranspiração (Da Silva *et al.*, 2025). A precipitação é marcada por pronunciada variabilidade temporal e concentração em um curto período (3 a 4 meses), com ocorrência de eventos repentinos e breves (Brasil *et al.*, 2025; Da Silva *et al.*, 2025).

Os valores de erosividade anual distribuído ao longo do tempo no Semiárido tendem a ser os mais baixos do Brasil (Oliveira, Wendland e Nearing, 2012). No entanto, a precipitação, embora em menor volume, é muito mais concentrada, o que significa que o potencial erosivo ainda pode ser significativo (Mello *et al.*, 2013). Estudos na bacia do Rio Apodi-Mossoró (BSAR/RN) mostraram que a erosividade varia de moderada a muito forte, com Z-testes indicando tendências de declínio nos eventos de precipitação extrema, sugerindo aumento da aridez em algumas estações (Da Silva *et al.*, 2025). Os mesmos autores complementam que a erosividade mais alta nesta bacia foi encontrada na parte norte, associada à maior energia dos eventos de precipitação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

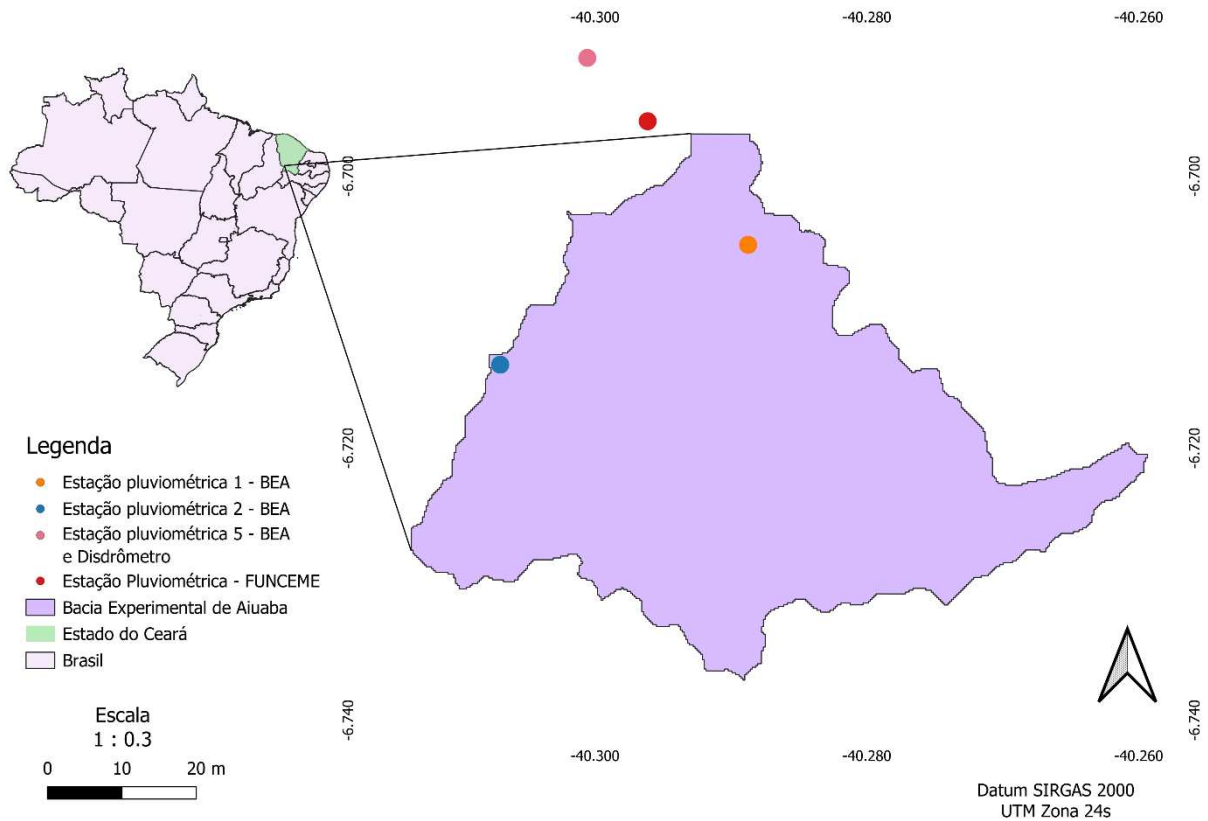
Nessa seção detalha-se os procedimentos e técnicas utilizados para coletar, processar e analisar os dados a fim de atender aos objetivos da pesquisa. O capítulo será estruturado em subseções que explicam os processos de coleta de dados, cálculo dos parâmetros de erosividade e coeficiente de arraste.

3.1 Área de Estudo

A área de estudo da pesquisa é a Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), localizada em uma área da Caatinga preservada, no estado do Ceará, que está sendo monitorada desde 2002 pelo grupo de pesquisa em Hidrologia e Sedimentologia do Semiárido (HIDROSED). A BEA possui uma área de aproximadamente 12 km² e está situada dentro da Estação Ecológica de Aiuaba, que é administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) (Soares *et al.*, 2024).

A região é caracterizada por um clima semiárido, com chuvas irregulares e concentradas em curtos períodos do ano, com precipitação média anual de 549 mm (Figueiredo *et al.*, 2016; Medeiros e De Araújo., 2014). A escolha desta área é justificada pela relevância ecológica e ambiental da Caatinga, além da representatividade da BEA como uma bacia experimental que permite estudos detalhados sobre o comportamento das chuvas e seus efeitos na erosão do solo. A Figura 1 apresenta o mapa de localização da BEA, bem como a distribuição das estações pluviométricas do grupo HIDROSED e a estação da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME). Essas estações realizam o monitoramento contínuo, em intervalos de 5 minutos, de variáveis como precipitação, velocidade do vento, radiação e temperatura.

Figura 1 - Localização da Bacia Experimental de Aiuaba e do bioma Caatinga.



Fonte: Autora (2025).

3.2 Coleta, processamento e sistematização de dados

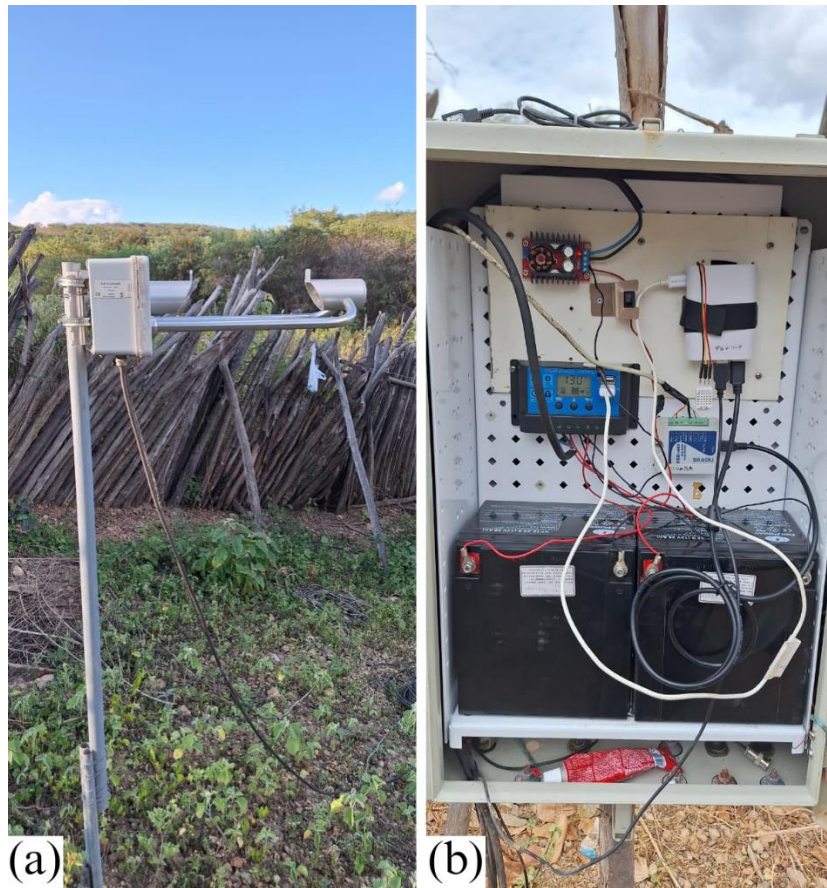
3.2.1 Coleta de dados

Os dados foram coletados por meio de um disdrômetro a laser para monitoramento de precipitação, da marca Thies Clima, modelo 5.4110.xx.x00, versão V2.5x STD. O equipamento atua como transmissor de valores de medição e é adequado para detectar e quantificar diferentes tipos de precipitação. Seu funcionamento baseia-se em uma fonte de emissão laser-óptica (diodo laser e sistema óptico), que gera um feixe de luz paralelo infravermelho (785 nm, não visível). No lado oposto, um fotodiodo acoplado a uma lente registra a intensidade óptica, convertendo-a em sinal elétrico.

O disdrômetro foi instalado na BEA em 03 de abril de 2022, permanecendo em operação até 30 de setembro de 2023, período no qual foram obtidos os dados utilizados nesta pesquisa. Além disso, o equipamento continuou registrando informações referentes aos anos de 2024 e 2025. Esse equipamento registra informações detalhadas sobre a precipitação, incluindo o tamanho das gotas e registra outras características da chuva, como lâmina

precipitada, diâmetro da gota e a velocidade da gota. A escolha do disdrômetro é justificada pela necessidade de obter dados precisos sobre a energia cinética das chuvas, importantes para o cálculo da erosividade e do coeficiente de arraste. A Figura 2 apresenta o aparelho disdrômetro instalado em uma área aberta na BEA.

Figura 2 - Aparelho disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba, onde: (a) encontra-se a fonte de emissão laser-óptica; (b) conversor de dados e as baterias de alimentação do disdrômetro.



Fonte: Autora (2025).

3.2.2 Processamento de dados do disdrômetro

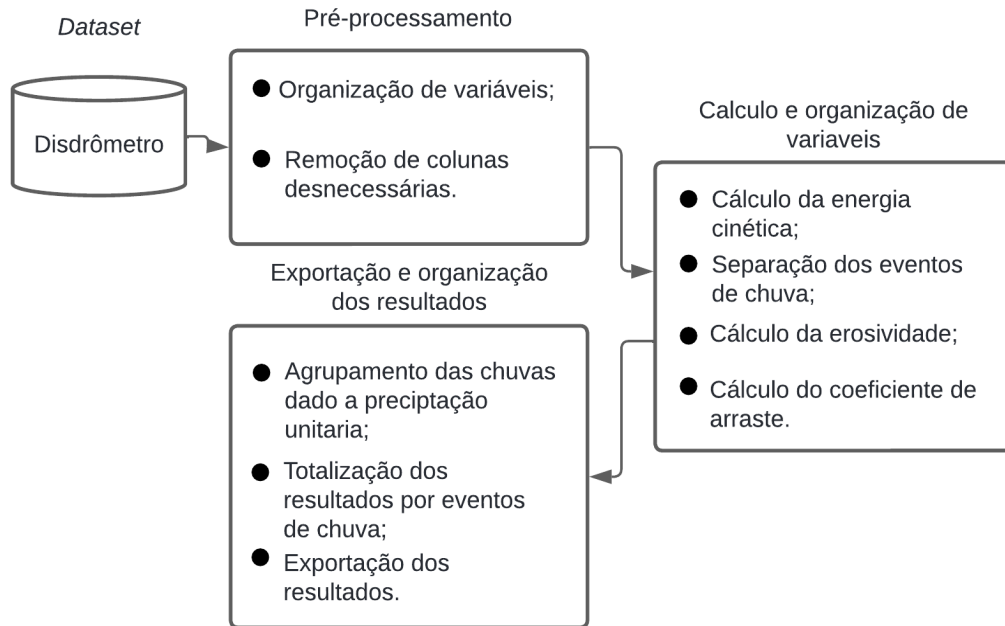
Após a aquisição dos dados, foram estudados os meios para o desenvolvimento de um método para facilitar a interpretação desses dados, devido à sua complexidade e volume. Isso inclui a análise das características das gotas de chuva, como tamanho, velocidade e distribuição espacial e temporal. Assim, foi desenvolvido um algoritmo na linguagem de programação Python, que permite a filtragem e análises dessas informações.

Assim, para conduzir uma análise melhor dos dados, foi necessário um processo detalhado de armazenamento e organização dos dados. Inicialmente, os dados encontrados foram organizados em um banco de dados de fácil acesso e gerenciamento, o que permitiu uma estrutura clara para as análises subsequentes. Em seguida, foi realizada a limpeza dos dados, removendo valores ausentes, duplicados ou inconsistentes, garantindo a integridade do conjunto de dados.

Além da filtragem e reconhecimento dos dados fornecidos pelo disdrômetro, o algoritmo também permitiu o cálculo automatizado da energia cinética das gotas de chuva e da erosividade, utilizando os dados coletados ao longo dos anos de 2022 a 2023. Isso foi possível devido ao processamento das medidas de diâmetro e velocidade das gotas, fornecendo percepções sobre a intensidade, impacto e potencial erosivo das chuvas. Além disso, foi possível calcular o coeficiente de arraste para as faixas de diâmetros e velocidades das gotas de chuvas que ocorrem na região.

O fluxograma apresentado na Figura 3 descreve esse processo de análise de dados coletados pelo disdrômetro, que começa com o pré-processamento dos dados e a organização em um *dataframe*. Em seguida, ocorre o cálculo da energia cinética das gotas de chuva com base no diâmetro, velocidade e número de gotas, seguido pelo cálculo da intensidade máxima em 30 minutos e separação dos eventos de chuva. Os eventos de chuva são agrupados com base na precipitação, e os resultados totais, como precipitação e erosividade, são calculados para cada evento. Além disso, o coeficiente de arraste é calculado para cada classe de diâmetro e velocidade. O processo se encerra com a exportação e organização dos resultados.

Figura 3 - Fluxograma do algoritmo para organização e análise de dados do disdrômetro.



Fonte: Autora (2025).

Os dados de diâmetro e velocidade das gotas foram obtidos por meio do disdrômetro, que os classifica em classes e quantifica o número de gotas em cada uma delas. Essas classes estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2. Para maior precisão nos cálculos, utilizou-se a média de cada classe, sendo 22 classes de diâmetro e 20 de velocidade, o que possibilitou fazer as combinações entre elas.

Tabela 1 - Dados sobre o diâmetro fornecidos pelo disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba e usados no âmbito da presente pesquisa.

Classe	Diâmetro (mm)	Faixa da classe (mm)
1	$\geq 0,125$	0,125
2	$\geq 0,25$	0,125
3	$\geq 0,37$	0,125
4	$\geq 0,5$	0,25
5	$\geq 0,75$	0,25
6	$\geq 1,0$	0,25
7	$\geq 1,25$	0,25
8	$\geq 1,5$	0,25

9	$\geq 1,75$	0,25
10	$\geq 2,0$	0,25
11	$\geq 2,5$	0,5
12	$\geq 3,0$	0,5
13	$\geq 3,5$	0,5
14	$\geq 4,0$	0,5
15	$\geq 4,5$	0,5
16	$\geq 5,0$	0,5
17	$\geq 5,5$	0,5
18	$\geq 6,0$	0,5
19	$\geq 6,5$	0,5
20	$\geq 7,0$	0,5
21	$\geq 7,5$	0,5
22	+8,0	

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

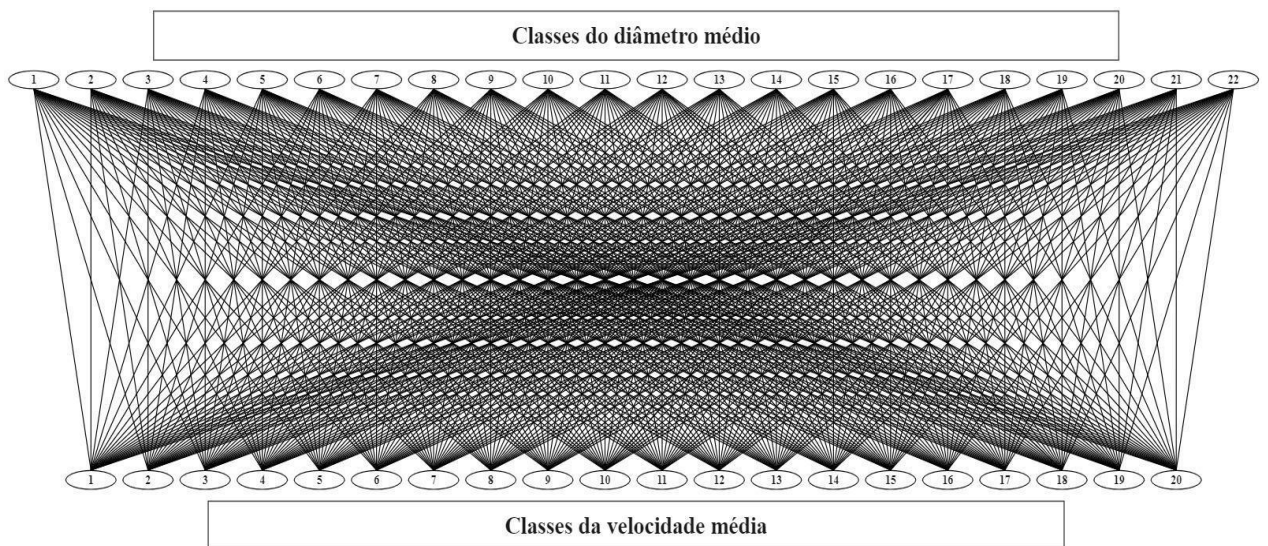
Tabela 2 - Dados sobre a velocidade fornecidos pelo disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba e usados no âmbito da presente pesquisa.

Classe	Velocidade (m/s)	Faixa da classe (m/s)
1	$\geq 0,0$	0,2
2	$\geq 0,2$	0,2
3	$\geq 0,4$	0,2
4	$\geq 0,6$	0,2
5	$\geq 0,8$	0,2
6	$\geq 1,0$	0,4
7	$\geq 1,4$	0,4
8	$\geq 1,8$	0,4
9	$\geq 2,2$	0,4
10	$\geq 2,6$	0,4
11	$\geq 3,0$	0,4
12	$\geq 3,4$	0,8
13	$\geq 4,2$	0,8
14	$\geq 5,0$	0,8

15	$\geq 5,8$	0,8
16	$\geq 6,6$	0,8
17	$\geq 7,4$	0,8
18	$\geq 8,2$	0,8
19	$\geq 9,0$	1,0
20	$\geq 10,0$	10,0

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 4 - Combinação das classes de diâmetro e velocidade fornecidos pelo disdrômetro instalado na Bacia Experimental de Aiuaba e usado no âmbito da presente pesquisa.



Fonte: Autora (2025).

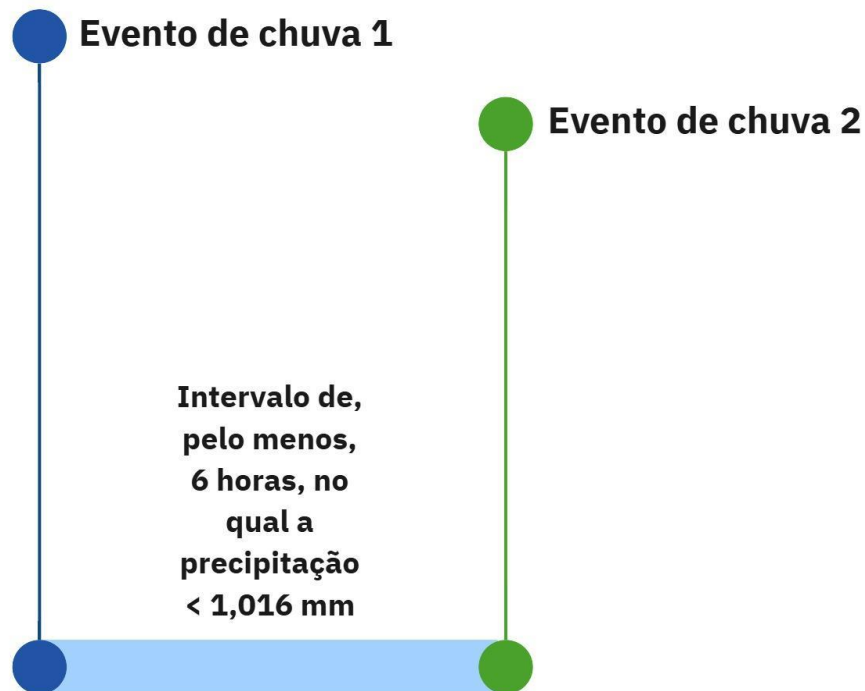
A Figura 4 representa graficamente a relação entre as classes de diâmetro e as classes de velocidade das gotas de chuva. Essa interação entre diâmetro e velocidade é fundamental para compreender o impacto da chuva sobre o solo, uma vez que gotas maiores e mais rápidas transportam maior quantidade de energia, elevando a capacidade erosiva da precipitação. A partir dessa relação, foi calculada a energia cinética de cada gota e, em seguida, esse valor foi multiplicado pelo número de gotas observadas em cada classe de diâmetro e velocidade, permitindo estimar a energia total associada ao evento.

3.2.3 Análise dos eventos de chuva

Para classificar os eventos de chuva, foram utilizados os critérios descritos Dunkerley (2008), que sugere que o intervalo entre eventos de chuva, comumente utilizado na

literatura, varia de 6 a 8 horas sem que haja precipitação. Assim, foi admitido que um evento de chuva se encerra sempre que houver um intervalo entre eventos de, pelo menos, 6 horas, no qual a precipitação não supere 1,016 mm (Barbosa *et al.*, 2018). A Figura 5 detalha, em forma de fluxograma, como se dá a separação dos eventos de chuvas segundo o critério utilizado na presente pesquisa.

Figura 5 - Ilustração do critério de separação dos eventos de chuvas para a presente pesquisa, realizada na Bacia Experimental de Aiuaba.



Fonte: Autora (2025).

A análise permite identificar e classificar os eventos de chuva com base nas seguintes características (Brasil, 2022): a lâmina da chuva (mm) corresponde à quantidade total de precipitação medida durante o evento; a duração (min) representa o tempo total em que ocorreu a chuva; a intensidade média (mm h^{-1}) refere-se à quantidade média de precipitação por hora ao longo do evento; a intensidade máxima em intervalos de 30 minutos (I_{30} , mm h^{-1}) corresponde ao maior volume de precipitação registrado em um intervalo contínuo de 30 minutos; a data do evento indica o dia em que a precipitação ocorreu.

3.3 Energia cinética e erosividade da chuva

3.3.1 Energia cinética da chuva medida e modelada

A energia cinética da chuva medida foi avaliada a partir dos dados obtidos pelo disdrômetro e calculada com base nas Equações 1 e 2, expressas conforme proposto por Newton.

$$EC = \frac{1}{2A} m \cdot u^2 = \frac{1}{2A} \cdot 10^3 \cdot \frac{4\pi}{24} \cdot d^3 \cdot u^2 \quad (1)$$

$$EC = \frac{(k \cdot d^3 \cdot u^2)}{A} \quad (2)$$

Em que:

EC é a energia cinética por unidade de área dada em $J \cdot m^{-2}$;

m é a massa da gota de chuva em kg;

k é uma constante que equivale a $2,613 \cdot 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$;

d é o diâmetro da gota em mm;

u é a velocidade de impacto em $m \cdot s^{-1}$;

A é a área de captação do disdrômetro em m^2 .

A energia cinética modelada foi calculada a partir da Equação 3, de Wischmeier e Smith (1978), considerando os eventos de chuva registrados na BEA. Para cada evento, verificou-se se a intensidade média (I_p) era menor que 75 mm h^{-1} condição necessária para a aplicação desta equação (Duarte *et al.*, 2024).

$$EC = [916 + 331 \cdot \text{Log}_{10}\left(\frac{I_p}{25,4}\right)] \cdot \left(\frac{P}{25,4}\right) \quad (3)$$

Em que:

EC é a energia cinética por unidade de área dada em $MJ \text{ ha}^{-1}$;

I_p é a intensidade média da chuva em mm h^{-1} ;

P é a lâmina total precipitada no evento em mm.

O fator logarítmico ajusta a energia cinética em função da intensidade, refletindo o aumento não linear da energia das gotas de chuva conforme a intensidade cresce. A aplicação da Equação 3 permite estimar de forma precisa a energia disponível para o processo erosivo.

Para eventos mais intensos, em que a intensidade média é maior que $75 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, a energia cinética foi calculada utilizando a Equação 4:

$$EC = 1074 \cdot \left(\frac{P}{25,4}\right) \quad (4)$$

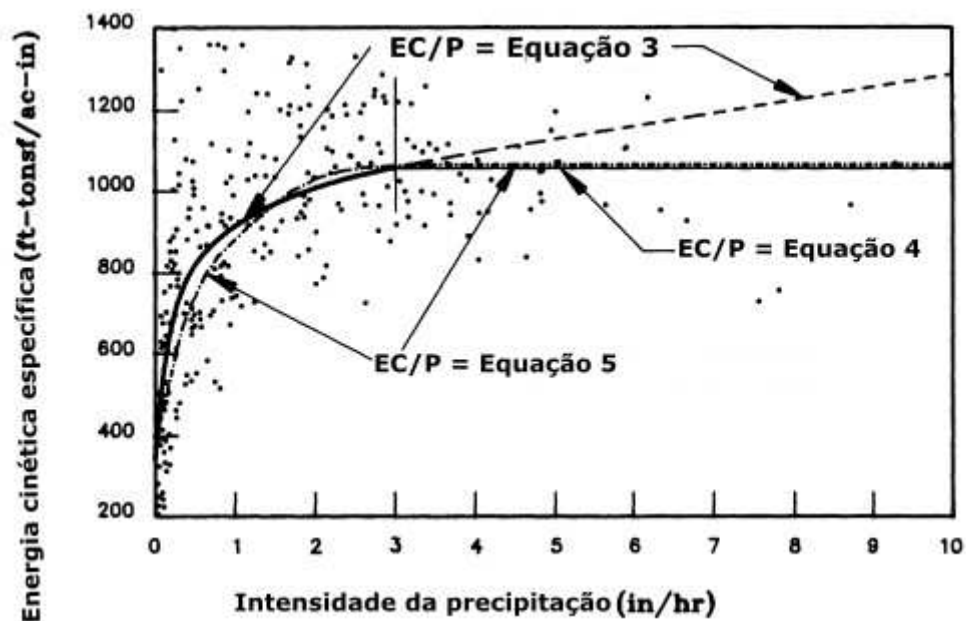
Essa simplificação se justifica pelo comportamento da energia cinética em chuvas muito intensas, nas quais o aumento da intensidade já não apresenta efeito linear sobre a energia disponível, tornando a aplicação da equação logarítmica desnecessária.

Na Equação Universal de Perda de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation* - RUSLE), conforme proposto por Brown e Foster (1987), a energia cinética foi calculada utilizando Equação 5:

$$EC = 1099 [1 - 0,72 \exp(-1,27Ip/25,4)] \quad (5)$$

Com os valores de intensidade média do evento e de energia cinética obtidos a partir dos dados do disdrômetro, foi traçada uma curva que relaciona esses dois parâmetros, conforme demonstrado por Haan, Barfield e Hayes (1994) na Figura 6. A intensidade da chuva refere-se à quantidade de precipitação em um determinado período, enquanto a energia cinética corresponde à energia que as gotas de chuva possuem em movimento.

Figura 6 - Relação entre intensidade da chuva e energia cinética específica (EC/P). Os símbolos BF e WS significam respectivamente Brown e Foster (1987) e Wischmeier e Smith (1978).



Fonte: Haan, Barfield e Hayes, Figura 8.5 (1994).

A curva que relaciona esses dois fatores seguiu o princípio de que, à medida que a intensidade da chuva aumentou, a energia cinética também tende a aumentar até atingir um ponto de saturação. Esse ajuste da curva proporcionou uma compreensão mais detalhada sobre como diferentes intensidades de chuva contribuíram para a energia disponível para causar erosão.

3.3.2 Erosividade da chuva medida e modelada

A energia cinética das gotas de chuva é um fator determinante no processo de erosão, uma vez que representa a força com que as gotas atingem o solo, contribuindo para o desagregamento de partículas e o transporte de sedimentos. Portanto, a erosividade das chuvas pode ser quantificada com base na combinação desses fatores, fornecendo uma métrica clara para avaliar o potencial erosivo da ocorrência em diferentes eventos climáticos.

O fator de erosividade medido e modelado da chuva foram calculados de acordo com a Equação 6 desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), onde é necessário saber o valor da energia cinética medida e modelada da chuva, a sua intensidade máxima em 30 minutos. Foi necessário realizar a conversão de unidade da energia cinética medida de J para MJ e área para hectare.

$$R = \sum_{j=1}^N (EC \cdot I_{30})_j \quad (6)$$

Em que:

R é o fator de erosividade da chuva em $(\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1})$;

EC é a energia cinética medida da chuva em MJ ha^{-1} ;

I_{30} é a intensidade máxima da chuva em 30 minutos ao longo da duração de uma chuva em mm h^{-1} , de um evento j ocorrido dentro do período de interesse.

Ao obter o valor da erosividade, foi possível resolver as incógnitas necessárias para o cálculo da erosividade de acordo com a Equação 7, desenvolvida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), que facilita as aplicações e estudos de erosividade para locais com base em precipitações mensais e anual. Entretanto, os valores de α e β referem-se à região de Campinas, permanecendo uma lacuna quanto a esses parâmetros para a região da Caatinga preservada.

$$R = \alpha \cdot \left(\frac{Hm^2}{Ha}\right)^\beta \quad (7)$$

Em que:

R é o fator de erosividade;

α é parâmetro; equivale a 67,355 segundo Lombardi Neto e Moldenhauer (1992);

β é parâmetro; equivale a 0,85 segundo Lombardi Neto e Moldenhauer (1992);

Hm é a chuva mensal (mm);

Ha é a média da chuva anual (mm);

Com base nos valores encontrados de erosividade, nas séries históricas de precipitação e nos dados obtidos em campo, a calibração de α e β foi realizada para as condições específicas da BEA. A estimativa desses parâmetros permitiu adaptar a equação de erosividade para representar com maior precisão as condições climáticas e hidrológicas da Caatinga, considerando que esses valores variam significativamente em diferentes biomas e regimes de precipitação.

3.4 Medida do coeficiente de arraste das gotas de chuva

O coeficiente de arraste quantifica a resistência ao movimento das gotas de chuva enquanto atravessam o ar, influenciando diretamente a velocidade terminal das gotas. Para este caso foi considerada igual à velocidade obtida no disdrômetro, pois ele fica instalado em um campo aberto, sem nenhuma vegetação significativa ao seu redor. Para calcular o coeficiente de arraste na BEA, empregou-se a Equação 8, apresentada por Mason (1957). Foram utilizados os dados coletados pelo disdrômetro, que fornece informações sobre o diâmetro e a velocidade das gotas de chuva, fazendo as combinações entre eles (Figura 4).

$$CA = \frac{4 \cdot g \cdot d}{3 \cdot u^2} \left(\frac{\rho_W}{\rho_A} - 1\right) \quad (8)$$

Em que:

CA é o coeficiente de arraste, adimensional;

g é a aceleração da gravidade, admitida $9,81 \text{ m s}^{-2}$;

d é o diâmetro da gota, em m;

u é a velocidade da gota, em m s^{-1} ;

ρ_W é a massa específica da água, admitida 997 kg m^{-3} (temperatura ambiente: $25 \text{ }^\circ\text{C}$);
 ρ_A é a massa específica do ar, admitida $1,18 \text{ kg m}^{-3}$ (Halliday; Resnick; Walker, 2016).

A análise do coeficiente de arraste na BEA foi comparada com estudos realizados em outras regiões do Brasil e do mundo, oferecendo percepções sobre como diferentes condições climáticas influenciam o arraste das gotas de chuva. O cálculo do coeficiente possibilitou uma compreensão mais aprofundada da dinâmica da chuva na Caatinga e contribuiu para o desenvolvimento de modelos mais precisos para a erosividade das chuvas nessa região.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Coleta, processamento e sistematização de dados

Os dados brutos coletados pelo disdrômetro foram processados e organizados, resultando na identificação de eventos de chuva na BEA. Foram calculados, para cada evento, erosividade, energia cinética, duração, intensidade média e intensidade máxima em 30 minutos (*I30*). A sistematização desses dados permitiu observar a variabilidade dos eventos de chuva, tanto em termos de intensidade quanto de energia para causar erosão. A Figura 7 apresenta o fluxo dos dados desde a saída do disdrômetro até a organização final em relatórios e planilhas.

4.2 Energia cinética e erosividade da chuva

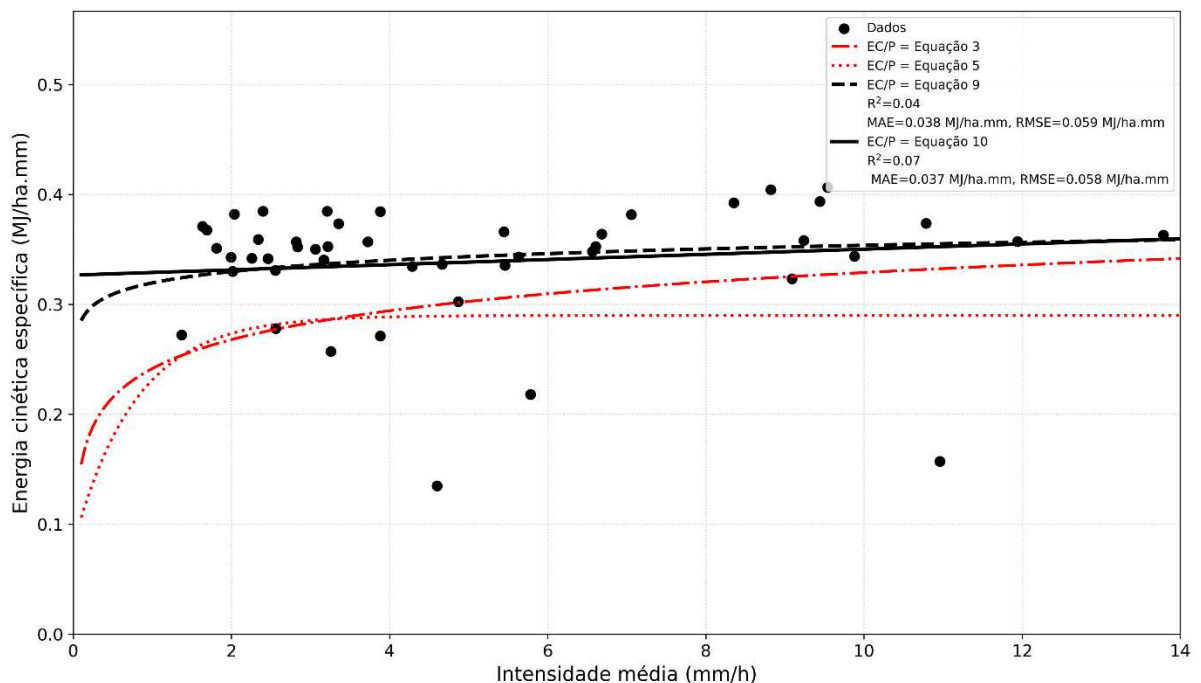
4.2.1 Energia cinética medida e modelada

Os valores de energia cinética específica da chuva foram calculados utilizando o algoritmo desenvolvido neste estudo, permitindo analisar a relação entre a energia cinética média e a intensidade máxima da precipitação em intervalos de 30 minutos, conforme ilustrado na Figura 8. Observa-se que, para intensidades baixas a moderadas, a energia cinética aumenta de forma não linear com o incremento da intensidade da chuva, comportamento consistente com os resultados reportados por Brown e Foster (BF) (1987) e Wischmeier e Smith (WS) (1978). A partir dos dados observados, foram obtidas as equações 9 e 10 ajustadas, apresentadas a seguir.

$$EC/P = 0,32 + 0,03 \cdot \text{Log}_{10}(I_p) \quad (9)$$

$$EC/P = 131,18 [1 - 0,998 \exp(-0,00002I_p)] \quad (10)$$

Figura 8 - Relação entre a energia cinética específica (EC/P) e a intensidade média na Bacia Experimental de Aiuaba. Os símbolos BF e WS significam Brown e Foster (1987) e Wischmeier e Smith (1978).



Fonte: Autora (2025).

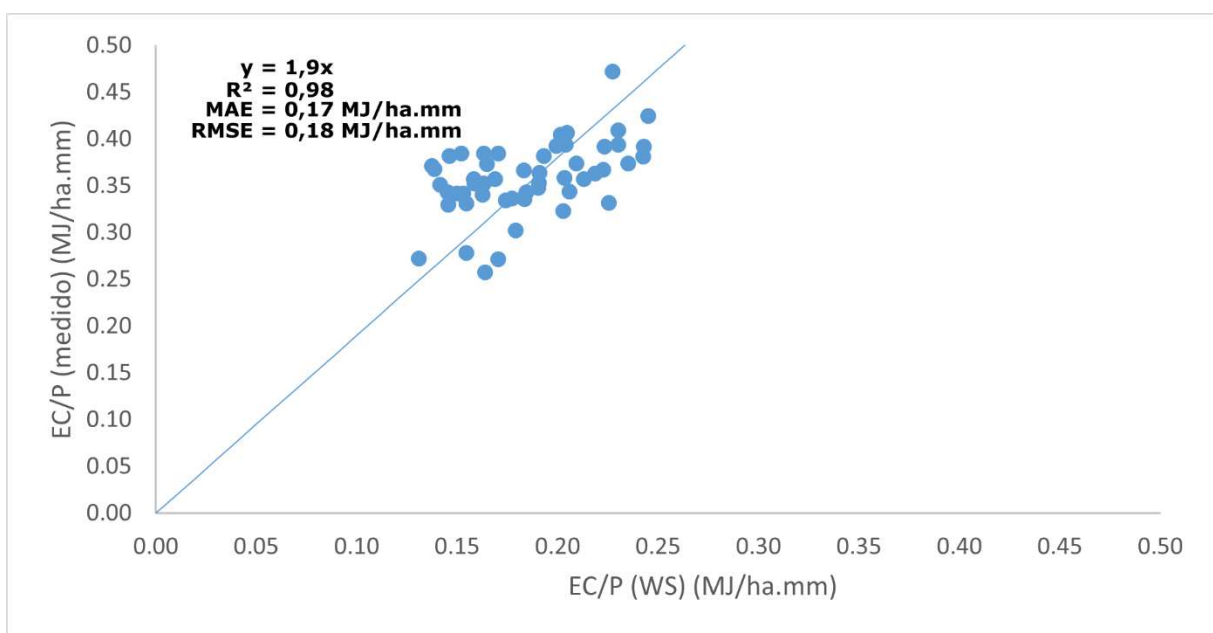
Entretanto, em chuvas de maior intensidade, a energia cinética apresenta um comportamento assintótico em relação à intensidade da chuva, indicando que a energia

disponível tende a se estabilizar mesmo com o aumento da intensidade. Esse fenômeno está relacionado à limitação física da velocidade terminal das gotas e à saturação do tamanho das gotas durante eventos intensos, fenômeno também observado em estudos anteriores (Brown e Foster, 1987; Wischmeier e Smith, 1978).

As curvas teóricas ajustadas aos dados experimentais, representadas por diferentes modelos (Figura 8), evidenciam que os ajustes logarítmicos são mais adequados para intensidades baixas a moderadas, enquanto para chuvas intensas, a diferença entre os modelos teóricos e os dados medidos é pequena, corroborando a ideia de que, nessa faixa, a aplicação de funções logarítmicas torna-se menos relevante. O ajuste exponencial realizado para os eventos da BEA apresentou baixo desempenho ($R^2 = 0,07$), refletindo a tendência de saturação da energia cinética em intensidades elevadas.

Ao comparar a energia cinética específica medida nos eventos de chuva com os valores modelados, observou-se que os valores medidos são, em média, 1,9 vezes maiores que aqueles valores obtidos pelo modelo de Wischmeier e Smith (1978) ou de Brown e Foster (1987). A relação linear ajustada entre energia cinética medida e modelada apresentou um coeficiente de determinação R^2 de 0,98, indicando um alto grau de correlação e que grande parte da variabilidade nos dados medidos é explicada pelo modelo (Figura 9).

Figura 9 - Relação entre a energia cinética específica (EC/P) medida e modelada para os 58 eventos de chuva encontrados durante o período de observação (03/04/2022 a 30/09/2023) na Bacia Experimental de Aiuaba.



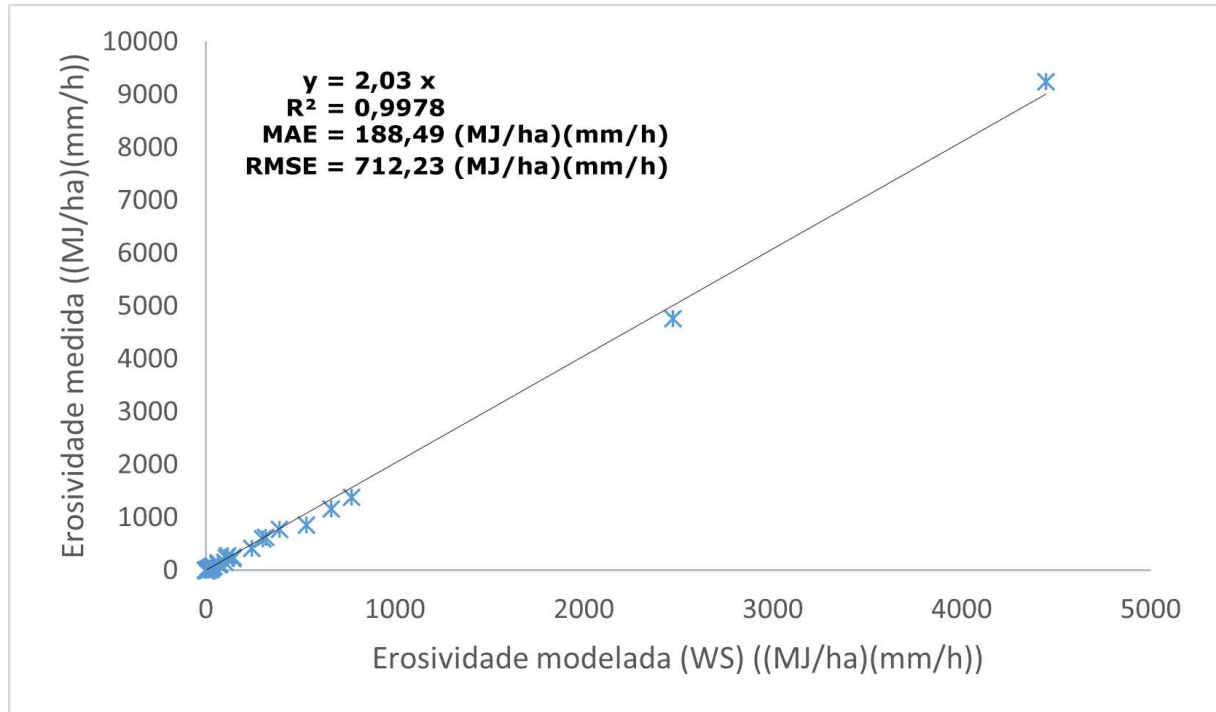
Fonte: Autora (2025).

Este comportamento sugere que, embora o modelo seja capaz de reproduzir a tendência geral da energia cinética, ele subestima seus valores. Isso se dá, possivelmente, devido à variabilidade inerente às chuvas de diferentes regiões do globo, como observado em estudos sobre energia cinética de chuvas (Amorim *et al.*, 2001). A discrepância entre os valores medidos e modelados também pode refletir a sensibilidade dos instrumentos de medição em captar variações rápidas na intensidade da chuva, não tendo sido registrado neste período nenhum evento com intensidade superior a 75 mm/h, nos quais a energia cinética tende a aumentar de forma não linear em relação à intensidade (Renard *et al.*, 1997).

4.2.2 Erosividade da chuva

A determinação do fator de erosividade da chuva (R) é importante para entender o potencial erosivo das chuvas na BEA, permitindo quantificar o impacto das chuvas sobre os processos hidrossedimentológicos locais. A Figura 10 apresenta a relação entre os valores de erosividade medidos a partir dos dados do disdrômetro e aqueles modelados pela equação proposta por Wischmeier e Smith (1978). O ajuste linear revelou que os valores medidos são, em média, duas vezes superiores aos estimados pelo método clássico, com elevado coeficiente de determinação R^2 de 0,9978, destacando a forte associação entre ambos.

Figura 10 - Relação entre a Erosividade da chuva (R) medida e modelada para os 58 eventos de chuva encontrados durante o período (03/04/2022 a 30/09/2023) de observação na Bacia Experimental de Aiuaba. O símbolo WS significa Wischmeier e Smith (1978).



Fonte: Autora (2025).

Esse resultado sugere que, embora a equação de Wischmeier e Smith (1978) seja amplamente utilizada em diferentes regiões do mundo, sua aplicação direta no semiárido pode levar a subestimativas significativas da erosividade real das chuvas. Isso se deve, em grande parte, às características particulares das precipitações no semiárido nordestino, que se destacam por sua elevada intensidade em curtos intervalos de tempo, como observado ao longo de uma década de medição por Figueiredo *et al.* (2016). Esse aspecto também foi destacado no estudo de Medeiros e De Araújo (2014), que verifica a influência da intensidade das chuvas na Caatinga sobre a erosão no bioma.

A Tabela 3 apresenta os valores de erosividade desagregados por evento de chuva, o que permite compreender a variabilidade anual do fator R . Observa-se que a maior contribuição para os valores anuais de erosividade advém de poucos eventos de elevada intensidade, confirmando o caráter concentrado da precipitação na BEA. Essa característica é consistente com resultados encontrados em outros estudos no semiárido nordestino, onde eventos extremos, apesar de pouco frequentes, respondem pela maior parcela do potencial erosivo anual (Da Silva, 2004; Medeiros e De Araújo, 2014).

Tabela 3 - Valores de erosividade e a classificação dos eventos de chuvas detectados pelo algoritmo no período de 2022 e 2023 para a Bacia Experimental de Aiuaba.

Data	Evento	Duração (min)	Precipitação (mm)	Intensidade		Intensidade em 30min (mm.h ⁻¹)	Energia Cinética (MJ.ha ⁻¹)	Energia cinética específica (MJ.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	Erosividade (medido) (MJ.ha ⁻¹ .mm.h ⁻¹)	Erosividade (modelado de WS) (MJ.ha ⁻¹ .mm.h ⁻¹)
				Intensidade média (mm.h ⁻¹)	Intensidade média consistida*(mm. h ⁻¹)					
18/04/22	1	251	65,42	15,64	15,64	45,26	25,64	0,39	1160,63	661,04
21/04/22	2	22	1,28	3,49	2,56	2,56	0,36	0,28	0,91	0,51
23/04/22	3	63	2,14	2,04	2,04	2,66	0,82	0,38	2,18	0,83
23/04/22	4	117	10,62	5,45	5,45	16,40	3,89	0,37	63,77	31,92
24/04/22	5	19	9,31	29,40	18,68	18,68	3,81	0,41	71,18	40,00
03/05/22	6	12	1,61	8,05	3,22	3,22	0,57	0,35	1,83	0,85
13/05/22	7	28	8,28	17,74	16,56	16,56	2,75	0,33	45,51	30,91
20/05/22	8	41	14,65	21,44	21,44	28,8	5,47	0,37	157,68	99,24
26/05/22	9	69	2,94	2,56	2,56	3,18	0,97	0,33	3,09	1,45
30/05/22	10	20	4,94	14,82	9,88	9,88	1,70	0,34	16,78	10,05
31/05/22	11	1348	40,7	1,81	1,81	19,8	14,29	0,35	282,94	114,04
02/06/22	12	277	6,32	1,37	1,37	4,96	1,72	0,27	8,54	4,10
02/06/22	13	115	12,81	6,68	6,68	13,96	4,66	0,36	65,08	34,16
05/06/22	14	75	17,23	13,78	13,78	19,14	6,26	0,36	119,78	72,05
08/06/22	15	7	1,16	9,94	2,46	2,46	0,40	0,34	0,98	0,44

15/06/22	16	33	1,79	3,25	3,25	3,46	0,46	0,26	1,59	1,01
04/07/22	17	63	4,5	4,29	4,29	6,10	1,51	0,33	9,19	4,78
07/07/22	18	42	2,76	3,94	3,88	3,88	0,75	0,27	2,91	1,82
25/09/22	19	16	1,52	5,7	3,06	3,06	0,53	0,35	1,63	0,75
03/11/22	20	748	216,35	17,35	17,35	90,42	102,18	0,47	9239,57	4444,67
06/11/22	21	515	27,2	3,17	3,17	14,38	9,26	0,34	133,21	63,65
08/11/22	22	257	12,15	2,84	2,84	7,30	4,28	0,35	31,26	14,06
30/11/22	23	175	10,86	3,72	3,72	17,30	3,88	0,36	67,08	31,72
02/12/22	24	390	70,09	10,78	10,78	52,64	26,19	0,37	1378,77	771,70
04/12/22	25	34	5,15	9,09	9,09	10,22	1,66	0,32	17,01	10,67
23/12/22	26	540	15,18	1,69	1,69	3,46	5,58	0,37	19,31	7,29
24/12/22	27	18	1,4	4,67	2,82	2,82	0,50	0,36	1,41	0,62
02/01/23	28	72	14,33	11,94	11,94	21,90	5,12	0,36	112,12	66,85
15/01/23	29	42	18,22	26,03	26,03	31,82	6,94	0,38	220,81	140,64
16/01/23	30	149	4,95	1,99	1,99	3,24	1,70	0,34	5,50	2,33
17/01/23	31	38	5,85	9,24	9,24	11,38	2,10	0,36	23,85	13,53
18/01/23	32	509	28,46	3,35	3,35	23,02	10,63	0,37	244,63	108,02
19/01/23	33	590	92,84	9,44	9,44	130,38	36,54	0,39	4763,69	2470,76
23/01/23	34	15	1,93	7,72	3,88	3,88	0,74	0,38	2,88	1,28
24/01/23	35	83	36,39	26,31	26,31	59,96	14,25	0,39	854,66	530,17
31/01/23	36	40	10,27	15,41	15,41	18,98	3,77	0,37	71,50	43,41

02/03/23	37	137	5,15	2,26	2,26	4,22	1,76	0,34	7,43	3,26
08/03/23	38	1	5,48	328,80	10,96	10,96	0,86	0,16	9,44	12,60
13/03/23	39	297	47,23	9,54	9,54	40,24	19,20	0,41	772,65	388,70
13/03/23	40	2	1,35	40,50	4,60	4,60	0,18	0,13	0,84	1,10
14/03/23	41	317	44,14	8,35	8,35	34,20	17,32	0,39	592,46	301,14
14/03/23	42	22	2,73	7,45	5,46	5,46	0,92	0,34	5,00	2,73
15/03/23	43	157	17,18	6,57	6,57	21,50	5,98	0,35	128,55	70,31
17/03/23	44	174	16,34	5,63	5,63	21,46	5,61	0,34	120,39	64,71
21/03/23	45	223	8,91	2,40	2,40	4,68	3,43	0,38	16,04	6,34
26/03/23	46	72	7,93	6,61	6,61	8,22	2,80	0,35	22,99	12,42
26/03/23	47	653	17,75	1,63	1,63	7,38	6,58	0,37	48,60	18,02
30/03/23	48	5	1,14	13,68	2,34	2,34	0,41	0,36	0,96	0,40
30/03/23	49	137	10,65	4,66	4,66	16,52	3,58	0,34	59,22	31,21
08/04/23	50	385	45,28	7,06	7,06	35,92	17,28	0,38	620,88	314,04
15/04/23	51	12	4,41	22,05	8,82	8,82	1,78	0,40	15,72	7,84
16/04/23	52	92	28,68	18,70	18,70	36,60	11,29	0,39	413,24	241,48
25/04/23	53	1	2,89	173,40	5,78	5,78	0,63	0,22	3,64	3,10
26/04/23	54	4	7,67	115,05	15,34	15,34	1,33	0,17	20,42	26,18
27/04/23	55	54	2,89	3,21	3,21	4,24	1,11	0,38	4,72	2,00
28/04/23	56	37	17,16	27,83	27,83	33,80	7,28	0,42	246,16	142,17
05/05/23	57	740	24,85	2,01	2,01	17,56	8,20	0,33	143,96	63,51

18/05/23	58	36	2,92	4,87	4,87	5,68	0,88	0,30	5,02	2,97
Total			1104,33						22461,76	11547,52

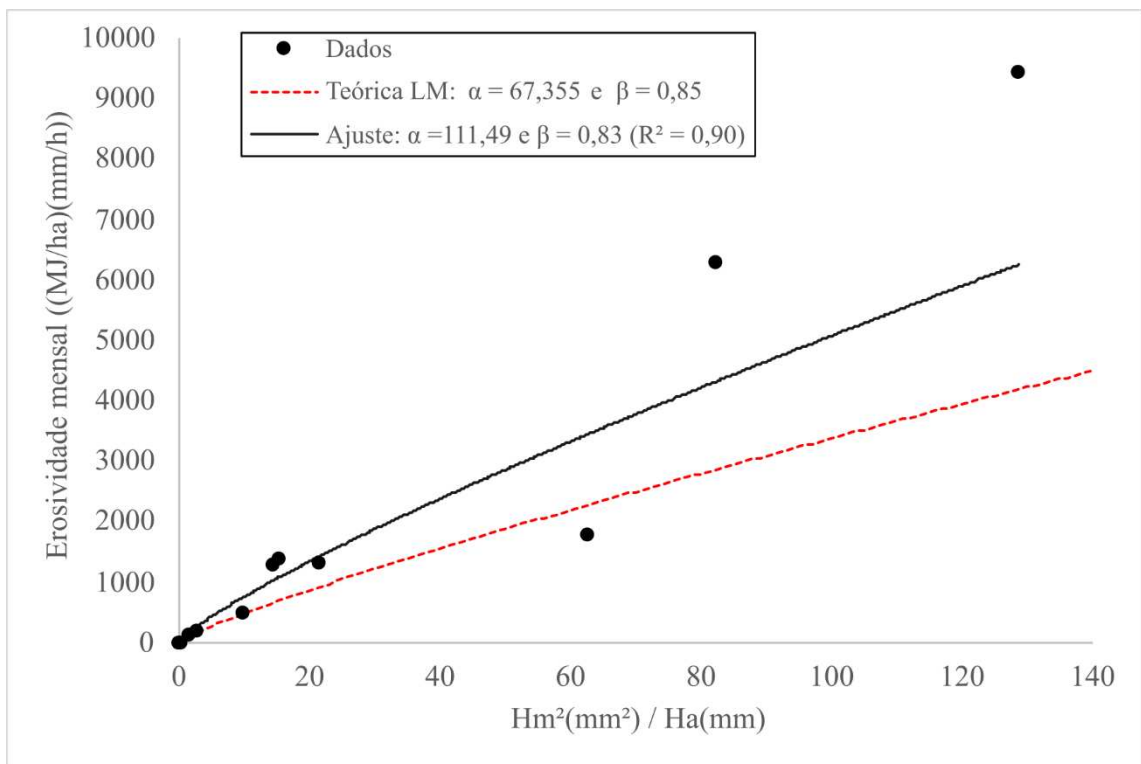
*Intensidade média consistida: Se o valor da intensidade média ultrapassar o da intensidade máxima em 30 minutos (I30), adota-se o valor de I30 em substituição à intensidade média.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os parâmetros α e β da Equação 6, de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), foram calibrados para a Caatinga partir da relação entre a precipitação e a erosividade das chuvas locais. Os ajustes obtidos resultaram em $\alpha = 111,49$ e $\beta = 0,83$, valores que diferem daqueles originalmente desenvolvidos para Campinas (SP), que foram $\alpha = 68,73$ e $\beta = 0,841$. Essa diferença reforça que os parâmetros α e β não são universais, mas condicionados às características climáticas de cada região.

Campinas (localizada no estado de São Paulo) apresenta um regime pluviométrico típico de clima temperado úmido, com chuvas mais bem distribuídas ao longo do ano, e o semiárido nordestino caracteriza-se por forte concentração das precipitações em poucos meses e poucos eventos em curtos períodos (De Aguiar e Nunes, 2006; Souza *et al.*, 2024).

Figura 11 - Relação entre o fator de precipitação (chuva mensal, [mm] ao quadrado dividida pela chuva anual média [mm]) e a erosividade (R) da chuva na Bacia Experimental de Aiuaba.



Fonte: Autora (2025).

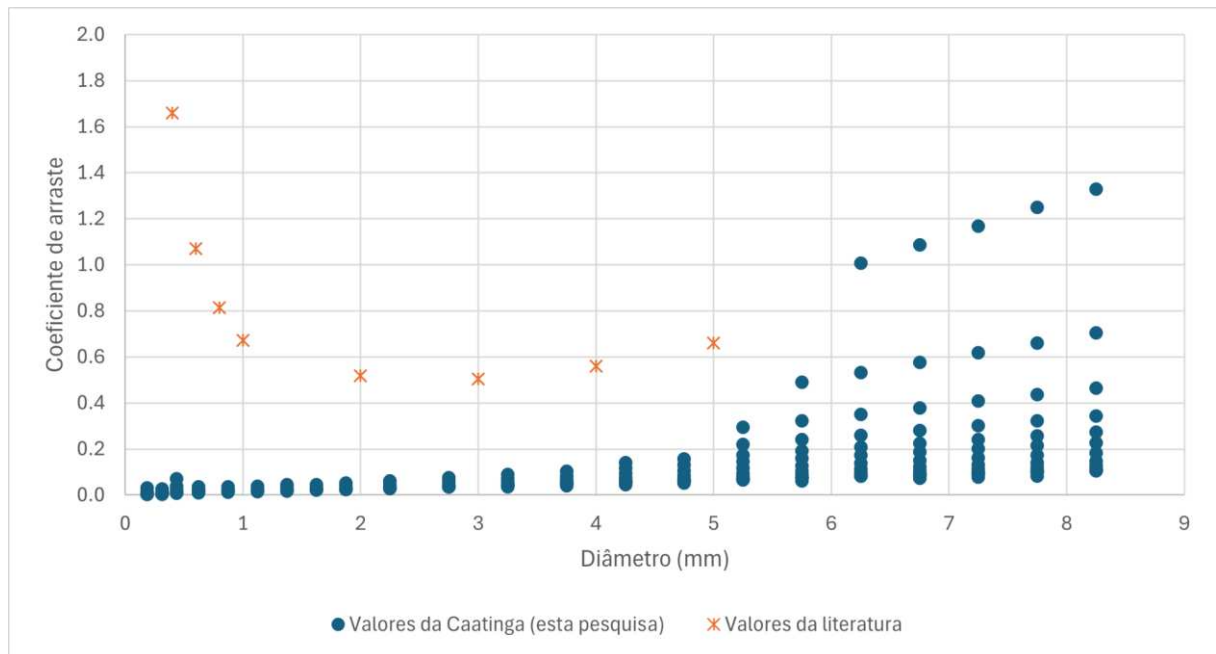
A Figura 11 ilustra graficamente a relação entre a precipitação e sua erosividade associada, evidenciando os valores ajustados para a Caatinga e destacando a diferença em relação ao ajuste desenvolvido para Campinas. Esse resultado confirma a importância de calibrar parâmetros hidrossedimentológicos para o semiárido, de modo que os modelos

empíricos possam representar com maior precisão o comportamento erosivo das chuvas locais.

4.3 Medida do coeficiente de arraste da chuva

O coeficiente de arraste de chuva representa a resistência oferecida pelo ar ao movimento das gotas, sendo parâmetro importante para o cálculo da velocidade terminal e, conseqüentemente, da energia cinética associada às precipitações (Amorim *et al.*, 2001). A Figura 12 mostra a relação entre o diâmetro das gotas e o coeficiente de arraste para os valores de diâmetro medidos pelo disdrômetro na Caatinga, em comparação com os valores de referência da literatura obtidos em condições padrão (pressão atmosférica de 101,3 kPa e temperatura de 20 °C) (Gunn e Kinzer, 1949; Beard, 1976). Os resultados obtidos evidenciaram que, diferentemente do comportamento avaliado pelos autores supracitados, gotas com maiores diâmetros apresentaram valores mais elevados de coeficiente de arraste.

Figura 12 - Coeficiente de arraste associado a cada diâmetro fornecido pelo disdrômetro e aos valores encontrados conforme Mason (1957).



Fonte: Autora (2025) e Mason (1957).

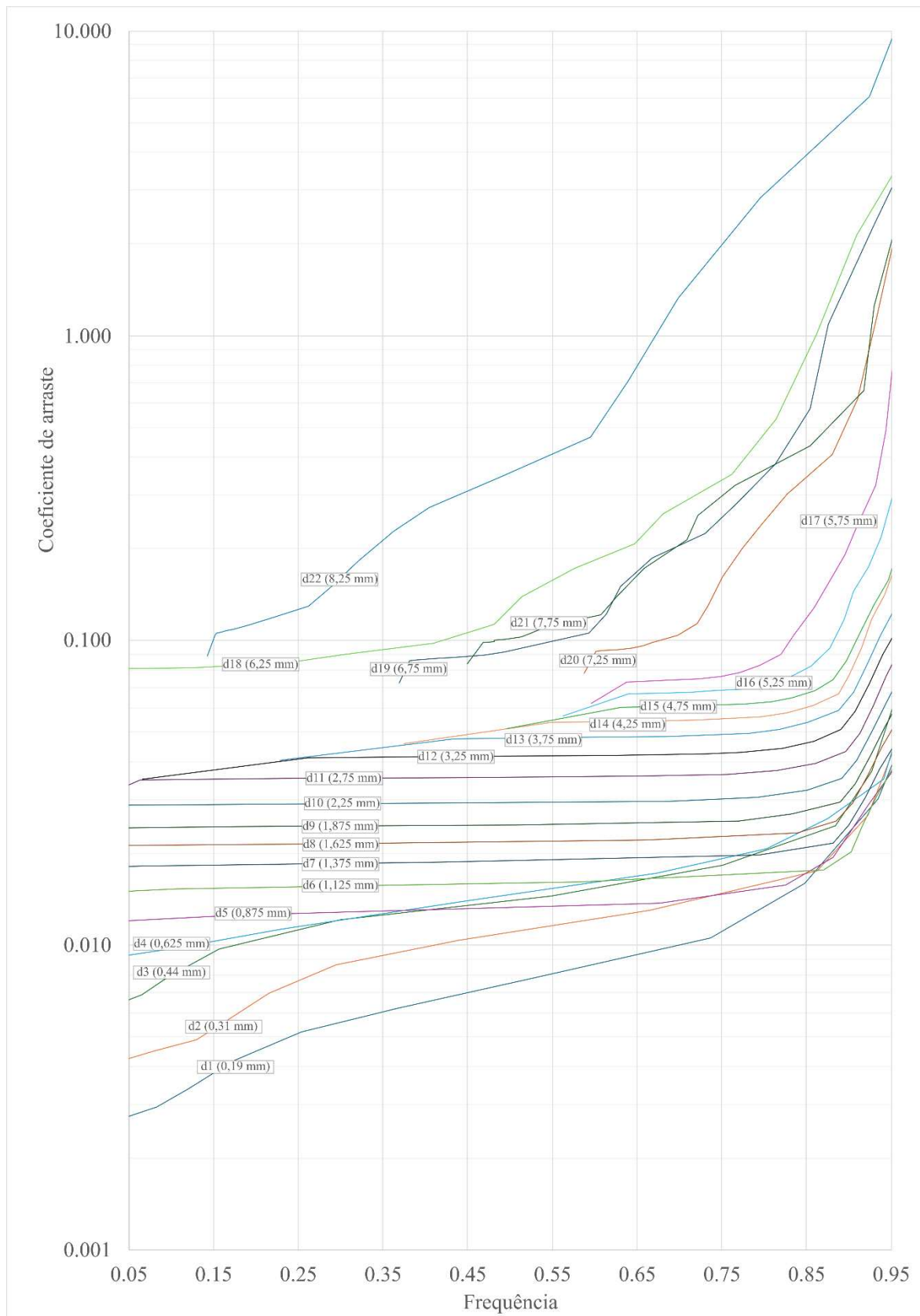
Em condições de elevada temperatura e menor pressão atmosférica, a densidade do ar é reduzida, o que pode alterar a relação entre a força de arraste e o peso da gota. Além disso, fatores como turbulência local, ventos intensos e elevada variabilidade térmica podem

intensificar o arraste sobre gotas maiores, fazendo com que elas não apresentem o comportamento esperado em condições de laboratório (pressão atmosférica de 101,3 kPa e temperatura de 20 °C) ou em regiões de clima úmido (Pruppacher, Klett e Wang, 1998).

Outro aspecto importante é a influência da heterogeneidade no formato das gotas. Enquanto na literatura os valores de coeficiente de arrasto são frequentemente obtidos considerando gotas esféricas e ambientes controlados, em campo as gotas podem sofrer deformações devido ao vento e à colisão entre gotas, o que aumenta o arrasto especialmente em gotas grandes (Beard e Chuang, 1987).

Na Figura 13, é apresentada a frequência de ocorrência dos valores do coeficiente de arraste obtidos a partir das medições dos diâmetros (d) das gotas de chuva. Observa-se que alguns intervalos de valores se repetem com maior regularidade, indicando uma distribuição característica do coeficiente de arraste para as condições estudadas na Bacia Experimental de Aiuaba.

Figura 13 - Frequência de ocorrência dos valores do coeficiente de arraste das gotas de chuva na Bacia Experimental de Aiuaba (os valores de d se referem ao diâmetro das gotas).



Fonte: Autora (2025).

5 CONCLUSÕES

A presente dissertação possibilitou a análise detalhada da erosividade da chuva na Bacia Experimental de Aiuaba, considerando a energia cinética, a intensidade máxima em 30 minutos e o coeficiente de arraste das gotas de chuva. Verificou-se que a energia cinética das gotas medida pelo disdrômetro foi 1,9 vezes maior que a estimada por modelos, evidenciando a relevância de medições diretas para caracterizar o impacto energético das chuvas sobre o solo. A erosividade da região apresentou valores médios aproximadamente duas vezes superiores aos estimados pelo modelo de Wischmeier e Smith (1978), tradicionalmente utilizado, indicando que esse método pode subestimar o potencial erosivo real das chuvas no semiárido. Além disso, a calibração dos parâmetros da equação de erosividade mensal para a Caatinga resultou em $\alpha = 111,49$ e $\beta = 0,83$, valores mais elevados do que os obtidos para região temperada do Brasil, confirmando que tais parâmetros variam em função das condições climáticas locais e reforçando a importância de ajustes regionais. O coeficiente de arraste das gotas, calculado a partir do diâmetro e da velocidade registrados pelo disdrômetro, demonstrou que gotas de maior diâmetro apresentaram valores mais elevados desse coeficiente.

Com base nas conclusões desta pesquisa, destacam-se algumas possibilidades para estudos futuros. Recomenda-se avaliar como o disdrômetro calcula a precipitação, comparando os valores obtidos com os de pluviômetros convencionais, a fim de identificar possíveis ajustes ou melhorias nos registros. Sugere-se também investigar a influência de condições ambientais externas, como vento e temperatura, sobre o coeficiente de arraste e a distribuição do tamanho das gotas em diferentes eventos de chuva. Além disso, a aplicação da metodologia em outras áreas da Caatinga ou em biomas semelhantes pode permitir comparações regionais e a generalização dos parâmetros de erosividade e coeficiente de arraste.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Daniel Alves; NUNES, Lucí Hidalgo. Variabilidade pluviométrica de alguns municípios da Região Metropolitana de Campinas (SP) em dois períodos homogêneos. **Sociedade & Natureza**, Umberlândia, v. 18, n. 35, p. 55-64, 2006.
- ALMAGRO, André *et al.* Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Scientific reports**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 8130, 2017.
- ALVES, Hygor Kristoph Muniz Nunes *et al.* Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 1, p. 373-392, 2022.
- AMORIM, Ricardo SS *et al.* Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, p. 124-130, 2001.
- ANDRADE, Eunice Maia *et al.* Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: regional studies**, [s. l.], v. 27, p. 100649, 2020.
- BARBOSA, Luís Romero *et al.* Sub-hourly rainfall patterns by hyetograph type under distinct climate conditions in Northeast of Brazil: a comparative inference of their key properties. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, p. e46, 2018.
- BEARD, Kenneth V. Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. **Journal of Atmospheric Sciences**, Boston, v. 33, n. 5, p. 851-864, 1976.
- BEARD, Kenneth V.; CHUANG, Catherine. A new model for the equilibrium shape of raindrops. **Journal of Atmospheric Sciences**, Boston, v. 44, n. 11, p. 1509-1524, 1987.
- BRASIL, José Bandeira *et al.* Canopy effects on rainfall partition and throughfall drop size distribution in a tropical dry forest. **Atmosphere**, Basel, v. 13, n. 7, p. 1126, 2022.
- BRASIL, José Bandeira *et al.* Measurement and modelling of kinetic energy and erosivity of rainfall and throughfall in a tropical semiarid region. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 644, p. 132088, 2024.
- BRASIL, José Bandeira *et al.* Uncertainty in Kinetic Energy Models for Rainfall Erosivity Estimation in Semi-Arid Regions. **Hydrology**, Basel, v. 12, n. 7, p. 181, 2025.
- BRASIL, José Bandeira. **Potencial energético da chuva e da precipitação interna em floresta tropical seca**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- BROWN, L. C.; FOSTER, G. R. Storm erosivity using idealized intensity distributions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 2, p. 379-0386, 1987.
- CARNEVSKIS, Elizabeth Lima. **Medição de intensidade de precipitação e estimativa de uniformidade de aplicação de água na irrigação por aspersão por meio do princípio**

piezoelétrico. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

CIRILO, José Almir. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos avançados**, [s. I.], v. 22, p. 61-82, 2008.

COSTA, Julio César Calixto *et al.* Potencial erosivo das chuvas do município de Cacimbinhas-AL obtido por modelos matemáticos. **Diversitas Journal**, Arapiraca, v. 8, n. 3, p. 2922-2935, 2023.

DIAS, A. S.; SILVA, J. R. C. A erosividade das chuvas em Fortaleza (CE): I-Distribuição, probabilidade de ocorrência e período de retorno-1ª aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 335-345, 2003.

DUARTE, Sergio Nascimento *et al.* **Hidrologia**: conceitos e exercícios com aplicações práticas. 1. ed. Piracicaba: Fealq, 2024.

DUNKERLEY, David. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. **Hydrological processes: An international journal**, [s. I.], v. 22, n. 22, p. 4415-4435, 2008.

FIGUEIREDO, José Vidal *et al.* Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, [s. I.], v. 30, n. 13, p. 2390-2400, 2016.

FRANÇA, Luciano Cavalcante de Jesus *et al.* Áreas prioritárias a conservação em função da declividade em núcleo de desertificação no Semiárido brasileiro. **Acta Geográfica**, [s. I.], v. 14, n. 34, p. 74-96, 2020.

GUNN, Ross; KINZER, Gilbert D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. **Journal of Atmospheric Sciences**, Boston, v. 6, n. 4, p. 243-248, 1949.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**. 1. ed. Cambridge: Elsevier, 1994.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**, v. 1: mecânica. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016..

JOSS, Jürg; WALDVOGEL, Albert. Ein spektrograph für niederschlagstropfen mit automatischer auswertung. **Pure and applied Geophysics**, [s. I.], v. 68, p. 240-246, 1967.

LIMA, Cleene Agostinho *et al.* Uso de coberturas alternativas do solo para o controle das perdas de solo em regiões semiáridas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 531-542, 2020.

LOMBARDI NETO, Francisco; MOLDENHAUER, William Calvin. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 51, p. 189-196, 1992.

LOPES, José Wellington Batista; NETO, José Ribeiro Araújo; PINHEIRO, Everton Alves Rodrigues. Produção de sedimentos e assoreamento em reservatório no semiárido: o caso do açude Marengo, Ceará. **Geoambiente on-line**, [s. I.], n. 24, 2015.

MACÊDO, R. J. A.; SANTOS, Janaina C.; SURYA, Leandro. Modelagem da erosão hídrica potencial no Parque Nacional Serra da Capivara, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 794, 2021.

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 129, n. 3, p. 1189-1200, 2017.

MASON, B. J. **The physics of clouds**. London: Oxford University Press, 1957..

MEDEIROS, Pedro Henrique Augusto; ARAÚJO, José Carlos. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 14, p. 1216-1223, 2014.

MELLO, CR de *et al.* Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, [s. l.], v. 202, p. 88-102, 2013.

MOURA, Matheus Magalhães Silva *et al.* Capítulo XII-Vulnerabilidade dos solos à erosão em uma bacia hidrográfica no Semiárido brasileiro. *In*: Feitosa, Anny Kariny (Org.). **Gestão, Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Fortaleza: Aliás, 2021. p. 146-150.

OLIVEIRA, M. K. T. *et al.* Ação antrópica na erosão de solo em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro. **HOLOS**, Natal, v. 8, n. 39, 2023.

OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches; WENDLAND, Edson; NEARING, Mark A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, [s. l.], v. 100, p. 139-147, 2013.

PETSCH, C. *et al.* Erosividade da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS): tendências e espacialização. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 39, p. 348- 368, e61231, 24 fev. 2022.

Pruppacher, H. R., Klett, J. D., & Wang, P. K. (1998). Microphysics of Clouds and Precipitation. **Aerosol Science and Technology**, País de Gales, 28(4), 381–382.

QUEIROZ, Amanda Carolina da Silva. **Assinaturas de radar polarimétrico de sistemas precipitantes atuantes no Leste do Nordeste do Brasil**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

RENARD, K. G. *et al.* **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: USDA, 1997. (Agriculture Handbook, 703).

RIGHETTO, Antonio Marozzi. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998.

RIQUETTI, Nelva B. *et al.* Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 724, p. 138315, 2020.

RODRIGUES, Joseilson O. *et al.* Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 452-465, 2009.

SANTOS, Ana Célia Fidelis *et al.* Morfodinâmica e risco de erosão no alto curso do Rio Curimataú (PB): uma análise a partir de técnicas de monitoramento da perda de solo. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó v. 10, n. 1, p. 138-151, 2024.

SANTOS, Julio Cesar Neves *et al.* Effect of rainfall characteristics on runoff and water erosion for different land uses in a tropical semiarid region. **Water Resources Management**, [s. I.], v. 31, n. 1, p. 173-185, 2017.

SETTI, Sridhara *et al.* Investigating the impact of calibration timescales on streamflow simulation, parameter sensitivity and model performance for Indian catchments. **Hydrological Sciences Journal**, [s. I.], v. 67, n. 5, p. 661-675, 2022.

SILVA JR, Valdemir P. *et al.* Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v. 15, p. 1073-1081, 2011.

SILVA, Alexandre Marco. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, [s. I.], v. 57, n. 3, p. 251-259, 2004.

SILVA, Ana Beatriz; CARVALHO, Andreza Tacyana Felix. Chuvas máximas e a erosividade do período chuvoso (2011-2020) no município de Pau dos Ferros, semiárido potiguar, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 43, p. e209822-e209822, 2023.

SILVA, Cássio Kaique *et al.* Impact of precipitation variability on erosivity, runoff, and soil erosion in a semiarid basin: a case study from Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. I.], v. 156, n. 11, p. 1-21, 2025.

SILVA, Tássio Jordan Rodrigues Dantas *et al.* Análise Estatística da Precipitação e da Erosividade das Chuvas no Semiárido Paraibano, Nordeste do Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, Coyoacán, p. 941-956, 2022.

SOARES, Nazaré Suziane *et al.* Method for identification of hydrological seasons in the semi-arid Caatinga biome, Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, País de Gales 2024, 69:3, 309-320.

SOUSA, Marcos Makeison Moreira de *et al.* Determinant pluviometric characteristics of sediment transport in a catchment with thinned vegetation in the tropical semiarid. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 3, p. 785-793, 2020.

SOUZA, Melina da Silva; CAMPOS, Kilmer Coelho; BRAGA, Francisco Laercio Pereira; LOPES, Fernando Bezerra. Determinantes do regime pluviométrico no Semiárido Cearense (1990 - 2019). **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 34, p. 533-556, 2024.

SOUZA, S. D. G.; SOUZA, A. C. N.; SOUSA, M. L. M. Geodiversidade, Geoparques e Semiárido brasileiro: a valorização do ambiente para o desenvolvimento territorial. **PerCursos**, Florianópolis, v. 23, n.52, p. 251 - 281, maio/ago. 2022.

SREEKANTH, T. S. *et al.* Microphysical features of rain and rain events during different seasons over a tropical mountain location using an optical disdrometer. **Scientific Reports**, [s. I.], v. 9, n. 1, p. 19083, 2019.

WISCHMEIER, Walter H.; SMITH, Dwight David. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington, D.C.: Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.

ANEXO A – CÓDIGO EM LINGUAGEM DE PYTHON PARA LEITURA DOS DADOS DO DISDRÔMETRO

```
import pandas as pd

import os

import numpy as np

import shutil

from openpyxl import load_workbook

import zipfile

import tarfile

import glob

import openpyxl

from datetime import timedelta

# Caminho do arquivo ZIP

input_zip_path = "./Dados disdrômetro.zip"

# Criar pastas

output_dir = "./tmp"

os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)

# Função para extrair arquivos ZIP ou TAR.GZ

def extract_archive(archive_path, extract_to):

    try:

        if archive_path.endswith(".zip"):

            with zipfile.ZipFile(archive_path, 'r') as zip_ref:

                zip_ref.extractall(extract_to)
```

```

elif archive_path.endswith(".tar.gz") or archive_path.endswith(".tar"):
    if tarfile.is_tarfile(archive_path):
        with tarfile.open(archive_path, 'r') as tar_ref:
            tar_ref.extractall(extract_to)
    else:
        print(f'Arquivo inválido (não é .tar/.tar.gz válido): {archive_path}')
else:
    print(f'Formato não suportado: {archive_path}')
except Exception as e:
    print(f'Erro ao extrair {archive_path}: {e}')

# Função para ler .txt e converter em DataFrame
def txt_to_dataframe(file_path):
    try:
        df = pd.read_csv(file_path, delimiter=';', header=None, on_bad_lines='skip')
        colunas = df.columns.tolist()

        if len(colunas) >= 7:
            df[[colunas[5], colunas[6]]] = df[[colunas[0], colunas[1]]] # Preserva data/hora
            df = df.iloc[:, 3:]
            return df
        else:
            print(f'Arquivo com colunas insuficientes ({len(colunas)}): {file_path}')
            return None
    except Exception as e:
        print(f'Erro ao ler {file_path}: {e}')
        return None

```

```

# Extrair o ZIP principal
extract_archive(input_zip_path, output_dir)

# DataFrame acumulador
dfs_combinados = pd.DataFrame()

# Percorrer diretório extraído
for year in os.listdir(output_dir):
    year_path = os.path.join(output_dir, year)

    if os.path.isdir(year_path) and year.isdigit():
        for month_archive in os.listdir(year_path):
            month_path = os.path.join(year_path, month_archive)

            if month_archive.endswith(".zip") or month_archive.endswith(".tar.gz") or
            month_archive.endswith(".tar"):
                month_extract_path = os.path.join(year_path, month_archive[:-4])
                os.makedirs(month_extract_path, exist_ok=True)
                extract_archive(month_path, month_extract_path)

            base_dados_path = os.path.join(month_extract_path, "home", "pi", "dados_thies",
            year)

            if os.path.exists(base_dados_path):
                for month in os.listdir(base_dados_path):
                    month_folder_path = os.path.join(base_dados_path, month)

```

```

if os.path.isdir(month_folder_path) and month.isdigit():
    for day in os.listdir(month_folder_path):
        day_path = os.path.join(month_folder_path, day)

        if os.path.isdir(day_path):
            for file_name in os.listdir(day_path):
                file_path = os.path.join(day_path, file_name)

                if file_path.endswith(".txt"):
                    print(f" Lendo: {file_path}")
                    dataframe = txt_to_dataframe(file_path)

                    if dataframe is not None and not dataframe.empty:
                        print(f"Sucesso: {dataframe.shape} linhas")
                        dfs_combinados = pd.concat([dfs_combinados, dataframe],
axis=0)
                    else:
                        print(f"Ignorado: vazio ou inválido")

# Verificação final
if dfs_combinados.empty:
    print("Nenhum dado carregado. DataFrame final está vazio.")
else:
    try:
        dfs_combinados["data_temp"] = pd.to_datetime(
            dfs_combinados.iloc[:, 2], format="%d.%m.%y", errors="coerce"
        )
        dfs_combinados["hora_temp"] = pd.to_datetime(

```

```
dfs_combinados.iloc[:, 3], format="%H:%M:%S", errors="coerce"
).dt.time

# Remove linhas inválidas
dfs_combinados.dropna(subset=["data_temp", "hora_temp"], inplace=True)

# Ordena e salva
df_ordenado = dfs_combinados.sort_values(by=["data_temp", "hora_temp"])
df_ordenado = df_ordenado.drop(columns=["data_temp", "hora_temp"])

output_csv_path = "./dados_combinados_final.csv"
df_ordenado.to_csv(output_csv_path, index=False)
print(f"Arquivo final salvo com sucesso: {output_csv_path}")

except Exception as e:
    print(f"Erro ao processar datas e salvar: {e}")

#dicionários
synop_map = {
    -1: "Sensor error",
    41: "Light / moderate unknown precipitation",
    42: "Heavy unknown precipitation",
    0: "No precipitation",
    51: "Light drizzle",
    52: "Moderate drizzle",
    53: "Heavy drizzle",
    57: "Light drizzle with rain",
```

```

58: "Moderate / heavy drizzle with rain",
61: "Light rain",
62: "Moderate rain",
63: "Heavy rain",
67: "Light rain and / or drizzle with snow",
68: "Moderate / heavy rain and / or drizzle with snow",
77: "Snow grains",
71: "Light snow fall",
72: "Moderate snow fall",
73: "Heavy snow fall",
74: "Light soft hail / ice grains",
75: "Moderate soft hail / ice grains",
76: "Heavy soft hail / ice grains",
89: "Hail"
}

diameter_dic = {
    '1': 0.1875, '2': 0.3125, '3': 0.4375, '4': 0.6250, '5': 0.8750, '6': 1.1250,
    '7': 1.3750, '8': 1.6250, '9': 1.8750, '10': 2.2500, '11': 2.7500, '12': 3.2500,
    '13': 3.7500, '14': 4.2500, '15': 4.7500, '16': 5.2500, '17': 5.7500, '18': 6.2500,
    '19': 6.7500, '20': 7.2500, '21': 7.7500, '22': 8.25
}

speed_dic = {
    '1': 0.652, '2': 1.212, '3': 1.779, '4': 2.595, '5': 3.567, '6': 4.394,
    '7': 5.101, '8': 5.718, '9': 6.267, '10': 6.986, '11': 7.759, '12': 8.318,
    '13': 8.693, '14': 8.930, '15': 9.061, '16': 9.123, '17': 9.170, '18': 9.212,
    '19': 9.249, '20': 10.032
}

```

```
}
```

```
#função para ler os cabeçalhos
```

```
def add_multilevel_header(df, header_excel_path, sheet_name=0, nrows=2):
```

```
    # Ler o cabeçalho do arquivo Excel
```

```
    header = pd.read_excel(header_excel_path, sheet_name=sheet_name, nrows=nrows,
header=None)
```

```
    # Converter o cabeçalho para uma lista de tuplas
```

```
    header_tuples = list(zip(*header.values.tolist()))
```

```
    # Ajustar o tamanho do cabeçalho para corresponder ao número de colunas do DataFrame
```

```
    if len(header_tuples) > df.shape[1]:
```

```
        header_tuples = header_tuples[:df.shape[1]]
```

```
    elif len(header_tuples) < df.shape[1]:
```

```
        for _ in range(df.shape[1] - len(header_tuples)):
```

```
            header_tuples.append(("", ""))
```

```
    # Criar um MultiIndex para o DataFrame
```

```
    df.columns = pd.MultiIndex.from_tuples(header_tuples)
```

```
    return df
```

```
# leitura arquivo
```

```
df_combi = pd.read_csv("./dados_combinados_final.csv")
```

```
# criando colunas
```

```
colunas = df_combi.columns.tolist()
```

```

df = pd.DataFrame(columns=['Date of the sensor', 'Time of the sensor', 'Precipitation
unit', 'Intensidade 30min', 'Erosividade'])

# Calcular a diferença e preencher a nova coluna

df['Date of the sensor'] = pd.to_datetime(df_combi[colunas[2]], format='%d.%m.%y')

df['Time of the sensor'] = pd.to_datetime(df_combi[colunas[3]], format='%H:%M:%S')

df['data_hora'] = pd.to_datetime(df['Date of the sensor'].dt.date.astype(str) + ' ' + df['Time of
the sensor'].dt.time.astype(str))

df['SYNOP'] = df_combi[colunas[9]]

df["Description SYNOP"] = df["SYNOP"].map(synop_map)

df_combi.insert(0, 'New_Column', np.nan)

# Calculo da precipitação diária

df['Precipitation unit'] = df_combi[colunas[14]] - df_combi[colunas[14]].shift(1)

df.loc[0, 'Precipitation unit'] = 0

#excluindo o erro 9999 só nas interações de classes

df_intervalo = df.iloc[:, 79:519].copy() # Seleciona as linhas de 80 a 520 (índices 79 a 519)

df_intervalo.replace(9999, 0, inplace=True) # Substitui 9999 por 0 apenas nesse intervalo

df.iloc[:, 79:519] = df_intervalo #substituição do intervalo no df original

#cabeçalho das clases de d e u

df_class = add_multilevel_header(df_combi, './Variáveis identificadas - Combinada.xlsx',
'Planilha1', 2)

# Função para calcular energia cinética por classe por minuto base newton

def calculate_value(diameter_class, speed_class, cell_value):

```

```

d = diameter_dic[diameter_class]
u = speed_dic[speed_class]
return (2.613E-7 * (d ** 3) * (u ** 2) * cell_value) / 0.00456

result_df = pd.DataFrame()

# Iterar sobre as colunas, ignorando as duas primeiras
for col in df_class.columns[2:]:
    header_parts = str(col[1]).split(' ')
    if len(header_parts) == 7 and 'Diameter' in header_parts and 'Speed' in header_parts:
        diameter_class, speed_class = header_parts[2], header_parts[-1]
        result_col_name = f'Diameter class {diameter_class} - Speed class {speed_class}'
        result_df[result_col_name] = df_class[col].apply(lambda x:
            calculate_value(diameter_class, speed_class, x))

# Criar o novo DataFrame com os resultados da energia cinética
result_df.replace(0, np.nan, inplace=True)
result_df_completo = result_df.copy()
result_df_completo['EC_J/m2'] = result_df_completo.sum(axis=1)
result_df_completo['EC_MJ/ha'] = result_df_completo['EC_J/m2']/100
df['EC_J/m2'] = result_df_completo['EC_J/m2']
df['EC_MJ/ha'] = result_df_completo['EC_MJ/ha']

# Definir o intervalo de 30 minutos
intervalo = timedelta(minutes=30)

# Calcular a intensidade para cada intervalo móvel de 30 minutos
#a intensidade da precipitação nos 30min seguintes

```

```
intensidades = []
intervalo = timedelta(minutes=30)

for i in range(len(df)):
    inicio_intervalo = df['data_hora'].iloc[i]
    fim_intervalo = inicio_intervalo + intervalo
    df_intervalo = df[(df['data_hora'] >= inicio_intervalo) & (df['data_hora'] < fim_intervalo)]
    soma_precipitacao = df_intervalo['Precipitation unit'].sum()
    intensidade = soma_precipitacao / 0.5 # 30 minutos em horas
    intensidades.append(intensidade)

# Adicionar a coluna ao DataFrame
df['Intensidade 30min'] = intensidades

# Exibir os i30 com a nova coluna de intensidade
print(df)

#Salvar em excel
df.to_excel('./output_final.xlsx')

# Caminho do arquivo
input_file = "./output_final.xlsx"
output_file = f"./output_eventos_{year}.xlsx"

# Verificar se o arquivo existe
if os.path.isfile(input_file):
    print("O arquivo existe! Carregando dados...")
```

```

df = pd.read_excel(input_file)

# Remove a coluna "Unnamed: 0", se existir
if "Unnamed: 0" in df.columns:
    df = df.drop(columns=["Unnamed: 0"])

# Função para converter tempo (HH:MM:SS) em segundos desde o início do mês
def time_to_seconds_from_month_start(row):
    try:
        # Formata corretamente a data e hora como strings
        data_str = row['Date of the sensor'].strftime('%d.%m.%y')
        hora_str = row['Time of the sensor'].strftime('%H:%M:%S')

        # Concatena e converte para datetime
        timestamp = pd.to_datetime(f"{data_str} {hora_str}", format="%d.%m.%y
%H:%M:%S")

        # Início do mês
        month_start = timestamp.replace(day=1, hour=0, minute=0, second=0)

        # Diferença em segundos
        return int((timestamp - month_start).total_seconds())

    except Exception as e:
        print(f'Erro ao processar linha com valores: {row.get('Date of the sensor')}
{row.get('Time of the sensor')} -> {e}')
        return None

```

```

# Criar a nova coluna com segundos relativos ao início do mês
df['TimeSeconds'] = df.apply(time_to_seconds_from_month_start, axis=1)

# Função para encontrar eventos de chuva considerando soma acumulada de precipitação
def find_rain_events(df):
    groups = []
    n = len(df)
    i = 0
    minPrecipitation = 1.016 # Limite para considerar um evento de chuva

    while i < n:
        if df.loc[i, 'Precipitation unit'] > 0:
            start_index = i
            end_index = i
            total_precipitation = df.loc[i, 'Precipitation unit'] # Inicializa a soma

            while i + 1 < n and df.loc[i + 1, 'Precipitation unit'] > 0:
                i += 1
                total_precipitation += df.loc[i, 'Precipitation unit']
                end_index = i # Atualiza o fim do evento

            # Apenas adiciona se a soma for maior que minPrecipitation
            if total_precipitation >= minPrecipitation:
                groups.append((start_index, end_index))

        i += 1

```

```
    return groups

# Identificar eventos de chuva
rain_events = find_rain_events(df)

# Exibir os eventos encontrados
for idx, (start, end) in enumerate(rain_events, start=1):
    print(f'Evento sem merge {idx}: Início em {start}, Fim em {end}')

for idx, (start, end) in enumerate(rain_events, start=1):
    print(f'Evento sem merge {idx}: Início em {start}, Fim em {end}')

#juntar eventos
def merge_close_groups(groups, df, threshold=6):
    if not groups:
        return [], False

    groups.sort()
    merged = False
    new_groups = []
    i = 0

    while i < len(groups):
        start1, end1 = groups[i]

        while i + 1 < len(groups):
            start2, end2 = groups[i + 1]
            time_diff = df.loc[start2, 'TimeSeconds'] - df.loc[end1, 'TimeSeconds']
```

```
print(f"Comparando {start1}-{end1} com {start2}-{end2}, Diferença: {time_diff} segundos")
```

```
if time_diff <= threshold * 60 * 60:
```

```
    end1 = end2
```

```
    merged = True
```

```
    i += 1 # Pula o grupo mesclado
```

```
else:
```

```
    break # Sai do loop se não for possível unir
```

```
new_groups.append((start1, end1))
```

```
i += 1 # Avança para o próximo grupo
```

```
return new_groups, merged
```

```
# Continua unindo até que não seja mais possível
```

```
while True:
```

```
    new_rain_events, merged = merge_close_groups(rain_events, df)
```

```
    if not merged:
```

```
        break
```

```
    rain_events = new_rain_events # Atualiza os eventos mesclados
```

```
# Exibir os eventos de chuva encontrados
```

```
for idx, (start, end) in enumerate(rain_events, start=1):
```

```
    print(f"Evento com merge {idx}: Início em {start}, Fim em {end}")
```

```
print(f'Evento com merge {idx}: Início em {df.loc[start, 'Date of the sensor']} -  
{df.loc[start, 'Time of the sensor']}, Fim em {df.loc[end, 'Date of the sensor']} - {df.loc[end,  
'Time of the sensor']}")
```

```
# Abrir o arquivo Excel para edição
```

```
wb = load_workbook(input_file)
```

```
ws = wb.active
```

```
# Função para criar grupos de linhas no Excel
```

```
def create_excel_groups(ws, groups):
```

```
    for group_num, (start, end) in enumerate(groups, start=1):
```

```
        ws.cell(row=start + 2, column=1).value = f'Grupo {group_num}'
```

```
        ws.row_dimensions[start + 2].outline_level = 1
```

```
        for row in range(start + 3, end + 3):
```

```
            ws.row_dimensions[row].outline_level = 1
```

```
        ws.row_dimensions[end + 3].outline_level = 1
```

```
# Criar grupos de eventos de chuva no Excel
```

```
create_excel_groups(ws, rain_events)
```

```
# Selecionar a planilha
```

```
sheet = wb.active
```

```
# Congelar a primeira linha
```

```
sheet.freeze_panes = "A2"
```

```
# Salvar o arquivo com os eventos de chuva agrupados
```

```
wb.save(output_file)
```

```

print(f'Arquivo '{output_file}' salvo com sucesso com os grupos de chuva.")

# Criar uma lista para armazenar os resultados dos eventos
event_summary = []

# Loop para calcular dados de cada evento
for idx, (start, end) in enumerate(rain_events, start=1):
    event_duration = (end - start + 1)
    total_precipitation = df.loc[start:end, 'Precipitation unit'].sum()

    intensidade_media = total_precipitation / (event_duration / 60)
    sum_ec = df.loc[start:end, 'EC_MJ/ha'].sum() if 'EC_MJ/ha' in df.columns else 0
    max_intensity = df.loc[start:end, 'Intensidade 30min'].max() if 'Intensidade 30min' in
df.columns else 0

    erosivity_calculated = (
        (916 + (331 * (np.log10(intensidade_media / 25.4)))) * (total_precipitation / 25.4) *
        0.1702 * (max_intensity / 25.4)
        if sum_ec > 0 and max_intensity > 0 else 0
    )

    ero_medida = sum_ec * max_intensity

    event_summary.append({
        'Evento': idx,
        'Data Início': df.loc[start, 'Date of the sensor'],
        'Data Fim': df.loc[end, 'Date of the sensor'],
        'Início': df.loc[start, 'Time of the sensor'],

```

```

'Fim': df.loc[end, 'Time of the sensor'],
'Duração (minutos)': event_duration,
'Precipitação (mm)': total_precipitation,
'Energia cinética (MJ/ha)': sum_ec,
'Intensidade 30min': max_intensity,
'Intensidade média': intensidade_media,
'R (WS) ((MJ/ha)(mm/h))': erosivity_calculated,
'R (medida) ((MJ/ha)(mm/h))': ero_medida
})

# Converter a lista para DataFrame
event_summary_df = pd.DataFrame(event_summary)

# Remover a aba existente, se necessário (como vimos antes)
sheet_name = 'Resumo dos Eventos'
if os.path.isfile(output_file):
    wb = openpyxl.load_workbook(output_file)
    if sheet_name in wb.sheetnames:
        del wb[sheet_name]
    wb.save(output_file)

# Exportar tudo de uma vez para o Excel
with pd.ExcelWriter(output_file, engine='openpyxl', mode='a') as writer:
    event_summary_df.to_excel(writer, sheet_name=sheet_name, index=False)

print(f"Resumo dos eventos salvo em '{output_file}' com sucesso.")

```