



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CÁLCULO DO ÍNDICE DE EROSIVIDADE DA CHUVA PARA A PARAÍBA

ABNER LINS SILVA

JOÃO PESSOA-PB
NOVEMBRO – 2022

CÁLCULO DO ÍNDICE DE EROSIVIDADE DA CHUVA PARA A PARAÍBA

ABNER LINS SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba, como pré-
requisito obrigatório à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida

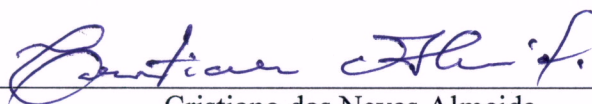
JOÃO PESSOA-PB
NOVEMBRO - 2022

FOLHA DE APROVAÇÃO

ABNER LINS SILVA

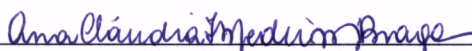
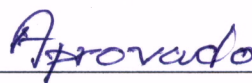
CÁLCULO DO ÍNDICE DE EROSIVIDADE DA CHUVA PARA A PARAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso em 05/12/2022 perante a seguinte Comissão Julgadora:



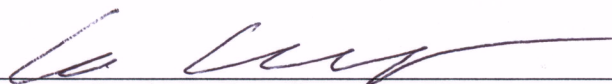
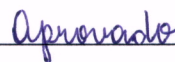
Cristiano das Neves Almeida

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



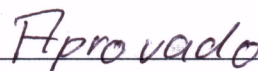
Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



Gerald Norbert Souza Da Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



Profª. Andrea Brasiliano Silva

Matrícula Siape: 1549557

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

EPIÍGRAFE

“Prefiro ter questionamentos que não podem ser respondidos a ter respostas que não podem ser questionadas.”

“Eu penso que quando nós sabemos que realmente vivemos na incerteza, então devemos admiti-lo; é de grande valor perceber que não sabemos as respostas a diferentes perguntas. Esta disposição mental - esta atitude de incerteza - é vital para o cientista, e é essa atitude mental que o aluno deve primeiro adquirir.”

(Richard P. Feynman, Nobel da física de 1965).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, Pierre Normando e Eunice Simões, que me ensinaram, desde pequeno, o valor inestimável do conhecimento. Deram-me grandes incentivos e total apoio nos estudos. Mostraram-me o prazer da leitura e o poderoso impacto do saber eternizado na escrita. Como professores universitários sempre me encheram de orgulho. Sempre me deram amor e apoio em todos os momentos e me ensinaram a ver a vida com clareza pela ótica do pensamento científico e do pensamento crítico.

A todos os professores que passaram por mim e marcaram a minha vida não só pelo ensino de suas disciplinas, mas por me fazerem enxergar a beleza e a complexidade da natureza e dos fenômenos naturais aos quais fazemos parte.

Em especial ao professor Cristiano das Neves Almeida, pela dedicação e disponibilidade. Inseriu-me no mundo acadêmico, forneceu as ferramentas e me direcionou sempre dando autonomia. Tornou-se um grande exemplo de engenheiro pesquisador interessado em fazer ciência e, particularmente ligado às ciências ambientais e aos recursos hídricos, mostrou como contribuir com a produção científica com grande impacto para a sociedade a fim de construir um mundo melhor.

Agradeço a meus amigos de graduação que tornaram a jornada muito mais divertida e leve em especial Raul Muniz que sempre se interessou por ciência e tecnologia e sempre me indicou as melhores oportunidades de aprendizagem ao longo do curso.

RESUMO

O estudo dos processos erosivos é de fundamental importância para a compreensão da dinâmica dos movimentos de massa, planejamento de obras de infraestrutura, políticas de ocupação do solo e agricultura. Considerando os problemas causados pelos processos de erosão hídrica, a quantificação das perdas de solo tem grande relevância na área acadêmica e técnica. Para isso, vários modelos para estimar perdas de solo foram desenvolvidos e aprimorados. Dentre esses modelos, a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e sua versão revisada (RUSLE) que utiliza fatores referentes às características da chuva e do solo com valores locais para quantificar erosão do solo. Nesse trabalho de conclusão de curso (TCC) será calculado o índice de erosividade da chuva, que corresponde ao fator R da equação universal USLE, para todo o território da Paraíba a partir dos dados de chuva sub-horários fornecidos pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) no período de 2014 a 2021. Os resultados obtidos pela aplicação do método são locais e, para contemplar todo o território estadual, foi realizada uma interpolação por meio de software de sistema de informação geográfica para geoprocessamento o que proporcionou a construção de mapas ilustrativos e uma posterior classificação dos índices calculados para as mesorregiões paraibanas. Foram calculados os valores de erosividade para as estações paraibanas e, com os dados especializados, foi possível identificar regiões críticas de erodibilidade. Esses resultados podem ser usados para minimizar as taxas de perda de solo.

Palavras-chave: Erosão-hídrica, Erosividade da chuva, Paraíba, USLE.

ABSTRACT

The study of erosion processes is of fundamental importance for understanding the dynamics of mass movements, planning of infrastructure works, land occupation policies and agriculture. Considering the problems caused by water erosion processes, the quantification of soil losses has great relevance in the academic and technical areas. For this, several models to estimate soil losses were developed and improved. Among these models, the Universal Soil Loss Equation (USLE) and its revised version (RUSLE) that use factors related to rainfall and soil characteristics with local values to quantify soil erosion. In this course completion work (TCC) the rainfall erosivity index will be calculated, which corresponds to the R factor of the USLE universal equation, for the entire territory of Paraíba from the sub-hourly rainfall data provided by the National Center for Monitoring and Natural Disaster Alerts (CEMADEN) in the period from 2014 to 2021. The results obtained by applying the method are local and, to cover the entire state territory, an interpolation was performed using geographic information system software for geoprocessing, which provided the construction of illustrative maps and a subsequent classification of the indexes calculated for the mesoregions of Paraíba. Erosivity values were calculated for the stations in Paraíba and, with the specialized data, it was possible to identify critical regions of erodibility. These results can be used to minimize soil loss rates.

Keywords: Water erosion, Rainfall Erosivity, Paraíba, USLE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Gráfico de colunas representando número de estudos publicados em função da escala espacial (Local, estadual, regional e nacional)	17
Figura 2 - Área de estudo.....	18
Figura 3 - Posição dos pluviógrafos utilizados.....	20
Figura 4 - Gráfico de colunas representando precipitação média mensal das estações	21
Figura 5 - Gráficos de dispersão apontando os eventos de chuva do ano	21
Figura 6 - Porcentagens de estações pela quantidade de anos de dados.....	22
Figura 7 - Pluviograma da estação 250030401A para o ano de 2021	23
Figura 8 - Precipitação anual média no período analisado (mm)	29
Figura 9 - Mapa de erosividade da chuva pelo método EI30	30
Figura 10 - Mapa de erosividade da chuva pelo método KE>25	31
Figura 12 - Mapa de densidade de erosividade	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estações pluviográficas utilizadas	19
Tabela 2 - Propriedades do evento 6 da estação 250030401A	24
Tabela 3 - Resultados obtidos para todas as estações analisadas	26
Tabela 4 - Resultados obtidos para todas as estações analisadas.	27

SUMÁRIO

SUMÁRIO	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo geral	13
2.2. Objetivos específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1. No globo	14
3.2. No Brasil	14
3.3. Teorias utilizadas	15
Figura 1- Gráfico de colunas representando número de estudos publicados em função da escala espacial (Local, estadual, regional e nacional)	17
4 MATERIAIS E MÉTODO.....	18
4.1. Área de estudo	18
4.2. Seleção das estações pluviográficas.....	19
4.3. Cálculo da erosividade	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1. Características gerais	26
5.2. Classificação da erosividade por estação	27
5.3. Mapas.....	27
6 CONCLUSÕES.....	33
7 REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos processos erosivos é de fundamental importância para a compreensão da dinâmica dos movimentos de massa, planejamento de obras de infraestrutura, políticas de ocupação do solo e agricultura. A previsão de perda de solo é relevante para avaliar os riscos de erosão do solo e determinar o uso e manejo apropriados do solo como nos assegura (OLIVEIRA et al., 2011)

Considerando os problemas causados pelos processos de erosão hídrica, a quantificação das perdas de solo tem grande relevância na área técnica e acadêmica. Para isso, vários modelos para estimar perdas de solo foram desenvolvidos e aprimorados ao longo do tempo. Dentre esses modelos, a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e sua versão revisada (RUSLE) segundo (RENARD et al., 1997; WISCHMEIER; SMITH, 1978) um dos mais utilizados nos estudos de erosão.

Assim, os modelos de predição têm se tornado importantes ferramentas no planejamento sendo, para tanto, fundamental a estimativa dos parâmetros que influenciam o processo erosivo. O objetivo deste trabalho foi determinar a erosividade da chuva (fator R) dos modelos citados.

A força erosiva da chuva, expressa como erosividade da chuva, é representada por um índice numérico e é função das características físicas da própria chuva, como sua distribuição, velocidade de queda, intensidade, duração, frequência e energia cinética das gotas de chuva.

Assim, como a chuva é o agente indutor do fenômeno da erosão hídrica, a estimativa da magnitude da erosividade é relevante para entender como os processos erosivos variam no tempo e no espaço. Além disso, essa variável pode ser usada para identificar áreas altamente suscetíveis à erosão.

Segundo Panagos et al. (2017), a América do sul apresenta os maiores valores anuais de erosividade do globo. Além disso, os países localizados em zona de clima tropical enfrentam a magnitudes de erosividade mais expressivas do planeta.

Inserido nesse contexto de alta erosividade, o Brasil se torna um país com mais fragilidades por ter expandido suas áreas agrícolas e ser responsável pela produção de muitas commodities. Junto com isso, as taxas de desmatamento aumentaram nos últimos anos. Esses fatores tornam o solo brasileiro mais vulnerável aos eventos de chuva erosivos. (ARAÚJO et al., 2019; DIAS et al., 2016; SOUZA et al., 2020).

Desta forma, quantificar a erosividade pode potencialmente contribuir para identificar a regiões críticas de erodibilidade do país e minimizar as taxas de perda de solo. Motivo pelo

qual, o concluinte do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba-UEPB e Pesquisador de Iniciação Científica foi instigado à pesquisa sobre esta temática ora selecionada para realização do trabalho final do curso além de relacionada com o plano de trabalho desenvolvido ao longo de três anos de iniciação científica (PIBIC) - “análise espacial da precipitação e suas características em escala sub-horária”.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho foi calcular a erosividade da chuva (fator R) por meio dos métodos EI30 e KE>25 além do cálculo da densidade da erosividade (DE) por meio de dados de chuva em escala sub-horária para o estado da Paraíba.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar as propriedades dos eventos (Precipitação acumulada, intensidade energia cinética, i30);
- Calcular o EI30 e o KE>25 de cada estação para cada ano de dados (em média 6 anos de dados;
- Especializar os resultados pelo método IDW para todo o território estadual.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. No globo

Segundo (WISCHMEIER; SMITH, 1978) A Equação Universal de Perda do Solo (USLE) permite estimar a erosão, sob variadas condições de uso e cobertura do solo, declividade, comprimento de rampa, tipos de solo e chuva. Essa equação tem sido amplamente utilizada para estimar a perda de solo e/ou estimar os valores numéricos dos diferentes componentes do processo erosivo. A equação universal é dada por:

$$A = R.K.L.S.C.P$$

Equação (1)

Onde A é a taxa de perda de solo ($t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), R é o fator anual de erosividade da chuva ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$), K é o fator de erodibilidade do solo ($t\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ m^{-1}$), L é o fator para o comprimento do declive, S é o fator para a inclinação do declive, C é o fator para ocupação da área e P é um fator para praticas de uso de solo. Estes quatro últimos fatores são adimensionais (WISCHMEIER & SMITH, 1978; RENARD & FREIMUND, 1994).

A erosividade se caracteriza por ser a capacidade da chuva de desprender as partículas de solo (característica da chuva) enquanto a erodibilidade é a susceptibilidade do solo de resistir ao impacto da gota de chuva (característica do solo). A erodibilidade, no entanto, representa a suscetibilidade do solo ao processo erosivo e pode ser determinada de forma direta, pela razão entre as perdas de solo e a erosividade das chuvas, sob chuva natural ou chuva simulada, e também por meio de análise de regressão linear simples entre essas duas variáveis (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

3.2. No Brasil

No Brasil, Teixeira et al. (2022) realizou sua pesquisa e apresentou os resultados de uma revisão da literatura científica sobre a avaliação das chuvas erosividade no Brasil, um estudo que proporcionou a publicação em periódicos revisados por pares nas últimas três décadas.

Foi constatado que 69 artigos foram publicados sobre o tema erosividade da chuva após a revisão de Oliveira et al. (2012), o que evidencia o aumento de pesquisas sobre esse

tema na última década. Os autores ressaltam sobre a importância da revisão sistemática e destacam que este tema é muito pesquisado.

3.3. Teorias utilizadas

Para chuvas erosivas, a energia cinética associada (KE) é calculada em função da intensidade da chuva, minuto a minuto. A equação (1), sugerida por Wischmeier e Smith (1958) é reajustada ao Sistema Internacional de Unidades por Foster et al. (1981) que afirmam que o KE adotado quando a intensidade da chuva é superior a 76 mm h⁻¹ corresponde a 0,283 MJ ha⁻¹ mm⁻¹. O KE associado à precipitação de cada dia é calculado somando as energias cinéticas de cada minuto até a duração total da precipitação.

$$KE = 0,119 + 0,0873 \log I$$

Equação (2)

em que KE é a energia cinética (MJ ha⁻¹ mm⁻¹); e I é a intensidade da chuva (mm h⁻¹) que é obtida pela razão da lâmina precipitada (P) pelo passo de tempo do seguimento de chuva (Δt) em horas.

$$I = \frac{P}{\Delta t}$$

Equação (3)

O primeiro índice de erosividade a ser calculado é chamado ‘EI30’, proposto por Wischmeier e Smith (1958), e é a relação entre a energia cinética da chuva e a intensidade máxima por 30 min. Para determinar o EI30, é necessário identificar todas as chuvas consideradas erosivas na série de dados.

O segundo índice a ser calculado é chamado por ‘KE > 25’ (também conhecido como KE > 1), em MJ ha⁻¹, foi proposto por Hudson (1971) a partir de estudos sobre erosividade das chuvas na África. Como era desenvolvido considerando as condições típicas das chuvas africanas, este índice tem sido apontado como o mais adequado para regiões com clima tropical e subtropical, como o Brasil.

O $KE > 25$ é determinado pela soma da energia cinética dos segmentos de chuva cuja intensidade é >1 polegada.h⁻¹ ou 25 mm.h⁻¹ diferentemente do EI30 que soma a energia cinética de todos os seguimentos de chuva.

Podem-se ressaltar várias pesquisas realizadas como, por exemplo: Andrade et al. (2020) que utilizou o índice $KE > 25$ para estimar a erosividade nos municípios de Formosa e Aragarças, respectivamente, ambos no estado de Goiás. Carvalho et al. (2010), Cecílio et al (2013), Moreira et al. (2008) e Moreira et al. (2016), que usaram o Índice $KE > 25$ para analisar a erosividade das chuvas nos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais e Santa Catarina, respectivamente.

Um método que é amplamente utilizado como variável independente para obter modelos de estimativa de erosividade no Brasil relaciona a média mensal de precipitação e a precipitação média anual (LOMBARDI NETO, 1977; MOLDENHAUER, 1992). Esse método é o Índice de Fournier Modificado (IMF), não necessita de dados de chuva com escala sub-horária, tais como os obtidos por pluviógrafos.

A densidade da erosividade (DE) também foi considerada um índice para inferir o potencial erosivo das chuvas no Brasil. DE é expresso pela razão entre erosividade da chuva mensal e precipitação acumulada (FOSTER, 2008), e mostra, portanto, o teor de erosividade por unidade de chuva.

$$DE = \frac{RE}{P}$$

Equação (4)

Em que DE é a densidade de erosividade (MJ ha⁻¹ h⁻¹); e RE é a erosividade média anual da chuva (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹) e P é a precipitação anual média.

No Brasil, esse índice foi estimado apenas por Teixeira et al. (2021) como complemento a análise dos valores de EI30 obtidos para o estado de São Paulo.

Para esses autores, a análise DE possibilitou identificar áreas suscetíveis aos impactos dos eventos de chuvas mais extremos mesmo em meses com magnitudes EI30 baixas. Isso ocorre uma vez que as estimativas de alta DE indicam uma maior ocorrência de precipitação de alta intensidade eventos (PANAGOS et al., 2016)

O uso de dados pluviográficos de chuva é o mais recomendado no método de estimação do índice de erosividade na literatura e permite uma caracterização mais realista (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

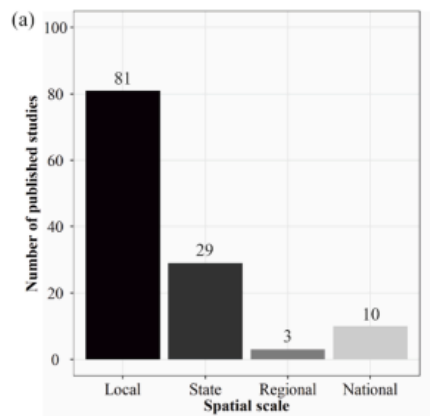
Considerando a baixa disponibilidade de dados pluviográficos, modelos simplificados para prever a erosividade da chuva usando dados anuais de pluviômetros são a alternativa

mais utilizada para estimar a erosividade no Brasil. Várias equações de regressão para obter valores de erosividade foram estabelecidas, para todo o país, com base e a relação desta variável com a IMF (OLIVEIRA et al., 2012b). Porém, como essas equações são modelos empíricos, seu uso é limitado a locais com características climáticas, principalmente pluviométricas, semelhantes às de que foram desenvolvidos.

Uma pesquisa realizada que fundamentou este estudo foi a de Silva (2004) que dividiu o território brasileiro em oito regiões homogêneas em termos de precipitação total anual e identificou regressão equações para estimar a erosividade para cada um. Esta divisão foi usada para obter valores de erosividade em alguns estudos, como os apresentados por Almeida et al. (2017), de Brito et al. (2021), e da Silva et al. (2020).

Outra questão é a espacialização dos dados. Segundo Teixeira et al. (2022), no Brasil, a maioria dos trabalhos publicados estudou a erosividade da chuva em um local com escala (municípios, pequenas bacias hidrográficas e pluviômetros específicos). A maioria dos estudos realizados são em escala local e a quantidade de pesquisas para entender os padrões de erosividade em todo o Brasil ainda é escassa como exemplificado na Figura 1 (TEIXEIRA et al., 2022).

Figura 1- Gráfico de colunas representando número de estudos publicados em função da escala espacial (Local, estadual, regional e nacional)



Fonte: David Bruno (2022)

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1. Área de estudo

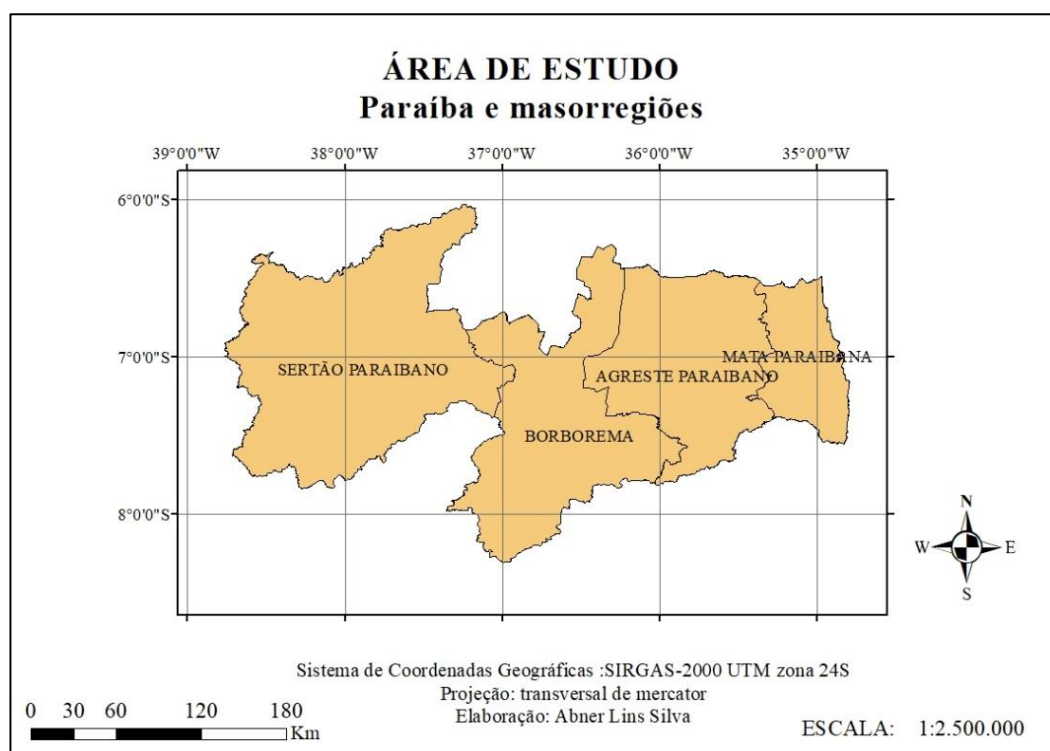
A área de estudo escolhida foi o estado da Paraíba como apresentado no mapa da Figura 2. É um estado brasileiro localizado no Nordeste do país faz divisa com os estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco e Ceará.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o estado possui 223 municípios e quatro regiões geográficas intermediárias, denominadas mesorregiões sendo elas:

- i) Mata Paraibana;
- ii) Agreste Paraibano;
- iii) Borborema;
- iv) Sertão Paraibano.

A Paraíba tem um clima tropical. No litoral do estado, banhado pelo oceano atlântico, predomina o clima subtipo tropical úmido; já no interior, ocorre o subtipo tropical semiárido, marcado pelas elevadas temperaturas e irregularidade das chuvas. Na região do Sertão Paraibano, são registrados os menores volumes de chuva do Brasil.

Figura 2 - Área de estudo



Fonte: IBGE

O IBGE estimou para o ano de 2021 uma população de 4.059.905 pessoas e densidade demográfica de 66,70 hab/km². A área da unidade territorial é de 56.467,242 km².

4.2. Seleção das estações pluviográficas

Visando desenvolver, testar e implementar um sistema de previsão de ocorrência de desastres naturais em áreas suscetíveis de todo o Brasil, foi fundada em 2012 o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) que atualmente dispõe de dados de mais de 4.000 estações distribuídas pelo país. Estações do tipo pluviógrafo com resolução temporal de 10 minutos.

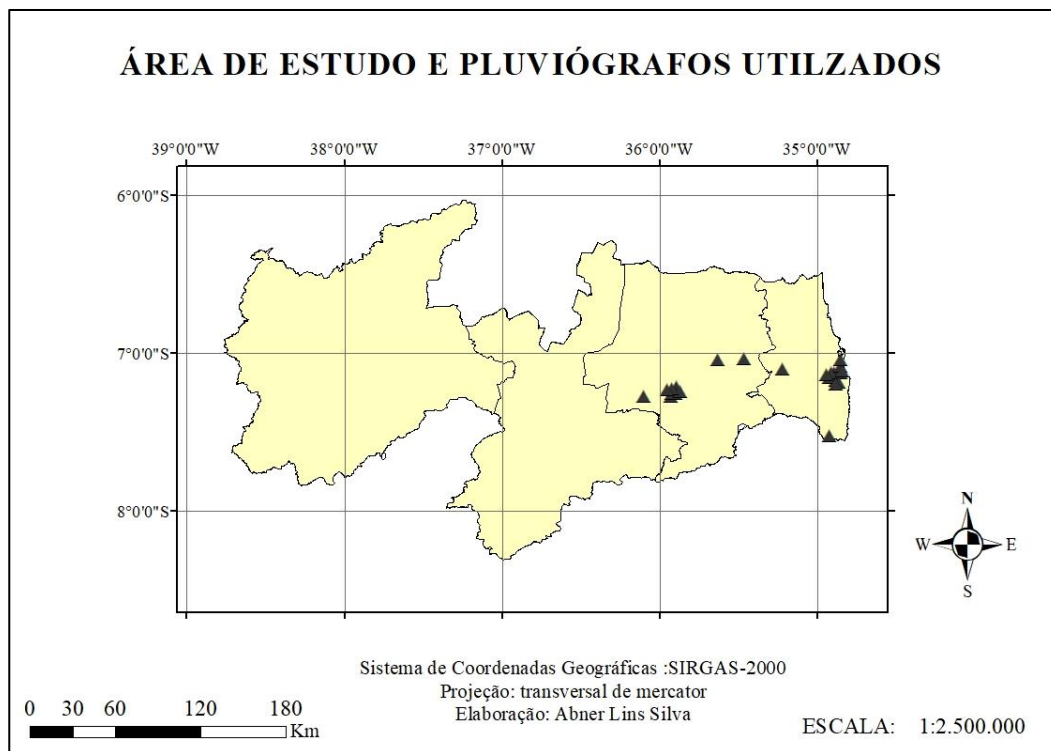
A lista de estações utilizadas está disposta na tabela 1 a seguir contendo as informações geográficas utilizadas para a representação gráfica do mapa da Figura 7.

Tabela 1 - Estações pluviográficas utilizadas

Código da estação	Município	Latitude	Longitude
250750701A	João Pessoa	-7,17	-34,88
250180703A	Baieux	-7,15	-34,92
250750707A	João Pessoa	-7,12	-34,89
250400901A	Campina Grande	-7,21	-35,89
251530201A	Sapé	-7,1	-35,22
250400906A	Campina Grande	-7,27	-35,93
250980001A	Mulungu	-7,03	-35,46
250750705A	João Pessoa	-7,12	-34,85
250750702A	João Pessoa	-7,18	-34,86
250400903A	Campina Grande	-7,25	-35,9
250400904A	Campina Grande	-7,25	-35,92
250400902A	Campina Grande	-7,24	-35,87
250030401A	Alagoa Grande	-7,04	-35,63
250180701A	Baieux	-7,12	-34,91
250180702A	Baieux	-7,13	-34,94
250750703A	Baieux	-7,19	-34,88
250400905A	Campina Grande	-7,22	-35,92
250320903A	Cabedelo	-7,08	-34,85
250400907A	Campina Grande	-7,23	-35,95
250300101A	Caaporã	-7,52	-34,92
250750706A	João Pessoa	-7,11	-34,84
250320902A	Cabedelo	-7,04	-34,85
250400901C	Campina Grande	-7,27	-36,1

A posição das estações pluviográficas utilizadas na Paraíba está disposta no mapa da Figura 3 a seguir. Foi utilizado o sistema de coordenadas SIRGAS – 2000 e as coordenadas geográficas em graus decimas como expostas na tabela anterior.

Figura 3 - Posição dos pluviógrafos utilizados



Fonte: autoral

Esses dados monitorados por essas estações são disponibilizados em formato “csv”, que é um tipo de arquivo de texto. Ele pode ser aberto pela ferramenta “Excel”, porém não são disponibilizadas informações gráficas; apenas linhas de texto onde são descritas informações de acumulado de chuva em milímetros de precipitação em intervalos de 10 minutos e em intervalos de uma hora nos períodos sem chuva.

Porém, foi observado que muitas delas apresentavam problemas recorrentes como extensos períodos sem dados, dentre outras eventualidades que causavam dados anormais e não confiáveis.

As estações defeituosas foram identificadas através de uma inspeção visual, dos gráficos de dispersão da precipitação e dos gráficos de barras com o acumulado mensal. Cada estação era comparada com as cinco estações mais próximas a fim de procurar por falhas e anomalias nos dados. Essa etapa foi realizada com a finalidade de garantir valores confiáveis no modelo em desenvolvimento.

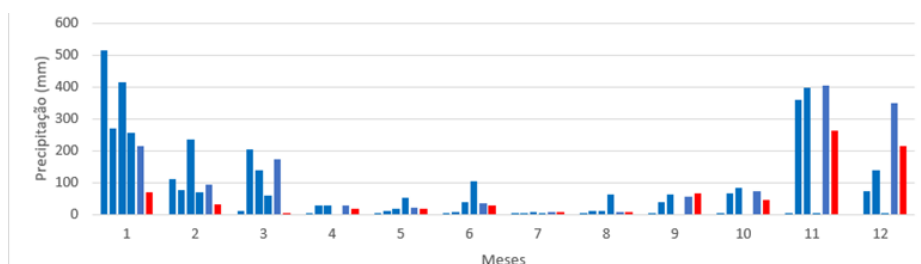
O procedimento foi repetido para os dados dos anos de 2014 a 2021 de todas as estações brasileiras. Além disso, foi feita uma dupla checagem para reduzir erros de operação.

As falhas mais comuns podem ser resumidas em:

- i) Registros de quantidades absurdas;
- ii) Longos períodos sem dados;
- iii) Períodos com intensidade de precipitação constante.

Nas figuras 3 e 4 a seguir, estão apresentados os gráficos de coluna e dispersão, respectivamente, utilizados para a análise visual descrita acima. Percebe-se na figura 5 a seguir a estação analisada (representada em vermelho) não apresenta bem os picos de chuva no início do ano como nas estações vizinhas (representadas em azul).

Figura 4 - Gráfico de colunas representando precipitação média mensal das estações



Fonte: CEMADEN

Figura 5 - Gráficos de dispersão apontando os eventos de chuva do ano

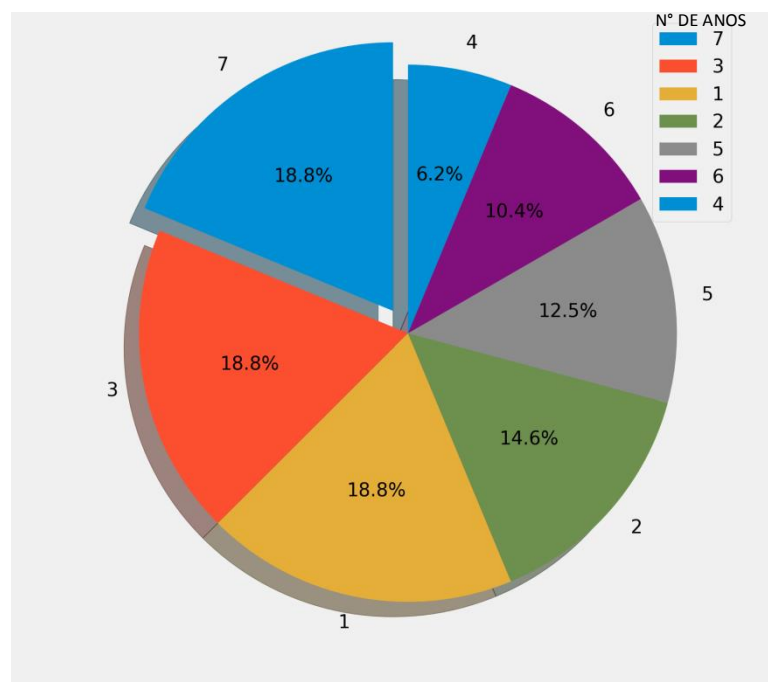


Fonte: CEMADEN

Na área de estudo em questão 48 estações foram consideradas de alta confiabilidade pela análise visual; porém, para o cálculo da erosividade é muito importante que se tenha uma série temporal extensa. Dessa forma foram utilizadas apenas as estações que tinham quatro ou mais anos com dados de chuva no período analisado (2014 a 2021) e assim sobraram apenas 23 estações que puderam ser consideradas no cálculo desta variável.

Constatou-se que das 48 estações, apenas 9 tinham 7 anos completos com dados no período analisado. As porcentagens de estações pela quantidade de anos de dados podem ser representadas no gráfico da figura 5 a seguir onde cada cor representa uma quantidade de anos de dados, variando de um a sete. Vale salientar que nenhuma das estações teve os 8 anos completos, pois a operação dessas estações na Paraíba só foi iniciada em 2015.

Figura 6 - Porcentagens de estações pela quantidade de anos de dados.



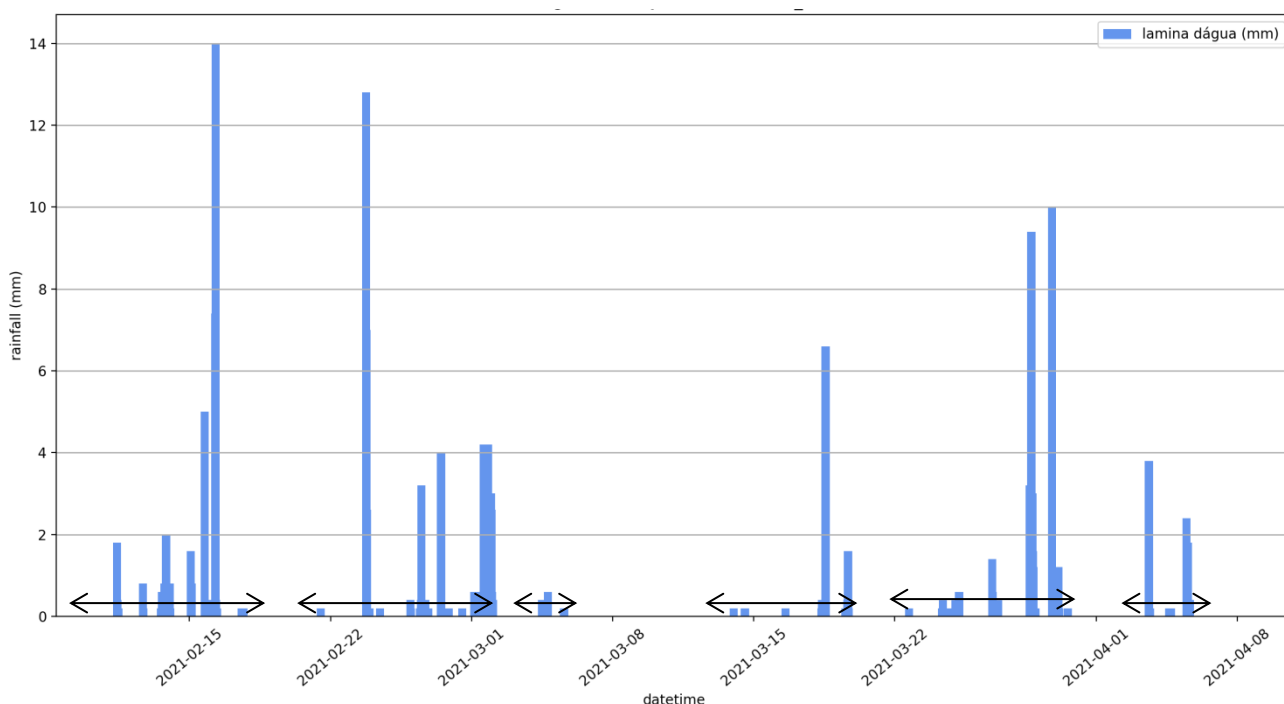
Fonte: autoral

4.3. Cálculo da erosividade

Como já mencionado, a erosividade da chuva (também chamada por fator - R) é um dos parâmetros da equação universal de perda de solo (USLE) e se trata de uma variável que quantifica a capacidade de um evento chuvoso de desprender as partículas de solo. Portanto, é uma característica da chuva e depende das características de cada evento chuvoso.

Assim, para o cálculo dessa variável, primeiramente é necessário dividir os eventos chuvosos que são pacotes de precipitação. A Figura 6 representa a marcações de precipitação de um pluviômetro localizado no município de Alagoa Grande no agreste paraibano durante alguns meses de 2021 e exemplifica a separação dos eventos e o critério dos Mínimos Intervalos de Tempo (MIT).

Figura 7 - Pluviograma da estação 250030401A para o ano de 2021



Fonte: autoral

Percebe-se pela distribuição da precipitação ao longo dos meses em que as chuvas vêm agrupadas em eventos como os agrupados em preto; quando o período que as separa for menor que seis horas, elas pertencem ao mesmo evento chuvoso e ,quando for maior, elas devem ser separadas em dois eventos chuvosos distintos.

O valor de seis horas pode ser alterado a depender do propósito do estudo. No caso do cálculo da erosividade, apenas os eventos extremos capazes de causar erosão são considerados e para isso são utilizados os critérios a seguir:

Intervalo de tempo:

- O MIT deve ser de 6 horas. Esse critério determina que um período maior ou igual que seis horas contínua, sem medições de chuva separa um evento mais longo em dois eventos distintos.

Evento considerado erosivo:

- Para que o evento chuvoso seja considerado erosivo e contribua para o cálculo da erosividade, ele deve ter precipitação acumulada maior ou igual que 12,7 mm de chuva.

Esses critérios de identificação de um evento erosivo foram estabelecidos por Renard et al. (1997). Com a divisão dos eventos é possível então calcular como varia a intensidade de chuva e outras características da precipitação durante o decorrer de um evento. O evento representado pela tabela a seguir é o sexto evento erosivo da estação 250030401A para o ano de 2019, tem duração total de quatro horas e vinte minutos e exemplificará o procedimento para o cálculo da erosividade.

Tabela 2 - Propriedades do evento 6 da estação 250030401A

coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5
Hora	Lâmina (mm)	Intensidade da chuva (mm/h)	Energia cinética (MJ / (ha.mm))	Energia cinética da chuva (MJ /ha)
18:10:00	8,20	49,20	0,27	2,19
18:20:00	12,80	76,80	0,28	3,63
18:30:00	1,40	8,40	0,20	0,28
18:40:00	7,00	42,00	0,26	1,82
18:50:00	4,20	25,20	0,24	1,01
19:00:00	2,00	12,00	0,21	0,43
19:10:00	1,00	6,00	0,19	0,19
19:20:00	2,60	15,60	0,22	0,58
20:00:00	0,00	0,00	0,00	0,00
21:00:00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:00:00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:30:00	0,20	0,40	0,08	0,02

Fonte: Autoral

Com a equação (3) é calculada a intensidade da chuva a cada passo de tempo (coluna 3). Sabemos ainda que a energia cinética é função da intensidade e calculada a partir da equação (2) obtendo-se a coluna quatro. A energia cinética da chuva (coluna 5) então é apenas o produto da energia cinética pela lâmina precipitada (coluna 2 x coluna 4). A quinta coluna é então somada para se obter a energia cinética do evento como um todo.

A erosividade da chuva é calculada multiplicando-se a energia cinética do evento pela intensidade máxima de chuva durante um período de 30 minutos para cada evento erosivo.

Essa intensidade máxima é chamada de 'I30'. No evento chuvoso em questão, o I30 foi de 44,80 mm/h e o EI30 deste evento chuvoso em particular é calculado pelo produto do I30 pelo somatório da coluna 5 que resulta em 454,72 MJ.mm/ha.h.ano. No caso do $KE > 25$, no entanto, o I30 é multiplicado pelo somatório apenas naquelas linhas cuja intensidade da chuva foi igual ou superior a 25 mm/h. Resultando em 387,82 MJ.mm/ha.h.ano.

Esse procedimento é então realizado para todos os eventos que são somados representando assim a erosividade da chuva naquela estação para aquele ano. O EI30 para aquela estação é então a média dos valores obtidos para cada ano da série temporal e de mesmo modo o $KE > 25$. Obtém-se ainda a densidade da erosividade usando a equação (5).

Os dados de chuva fornecidos pela CEMADEN são arquivos de texto. Todo o processamento foi feito utilizando as bibliotecas de programação em Python, tais como o Pandas, que é uma biblioteca que facilita o trabalho com grande quantidade de dados em formato de texto, e o Matplotlib que é especializada para a apresentação dos dados em forma visual como gráficos de linhas, barras, entre outros.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Características gerais

Em geral obteve-se o resultado para erosividade da chuva por meio de dois métodos distintos (EI30 e KE>25) além dos valores de precipitação média anual e a densidade da erosividade para cada uma das estações. Foram analisados 23 postos pluviográficos no Estado da Paraíba distribuídos em oito municípios e os resultados estão dispostos na tabela a seguir:

Tabela 3 - Resultados obtidos para todas as estações analisadas

Código da estação	Município	EI_30 (MJ.mm)/ (ha.h.ano)	KE>25 (MJ.mm)/ (ha.h.ano)	Precipitação anual (mm)	DE (MJ/ha.h)
250750701A	João Pessoa	8062,46	3824,48	1724,71	4,61
250180703A	Baieux	7589,53	3317,31	1654,94	4,57
250750707A	João Pessoa	7915,4	3703,61	1706,89	4,6
250400901A	Camina Grande	1907,43	1052,85	651,14	2,8
251530201A	Sapé	3624,94	1676,54	944,91	3,73
250400906A	Campina Grande	1498,24	926,4	514,46	2,77
250980001A	Mulungu	1610,71	609,44	619,74	2,53
250750705A	João Pessoa	9382,29	4497,5	1860,43	4,91
250750702A	João Pessoa	7763,08	3662,96	1709,97	4,52
250400903A	Campina Grande	1440,77	811,02	544,53	2,46
250400904A	Campina Grande	1260,41	665,5	490,43	2,43
250400902A	Campina Grande	1527,8	845,65	607,13	2,42
250030401A	Alagoa Grande	2354,54	1054,51	745,17	3,23
250180701A	Baieux	8068,29	3842,29	1736,73	4,63
250180702A	Baieux	8242,01	3989,13	1746,64	4,69
250750703A	Baieux	7351,36	3124,97	1692,64	4,36
250400905A	Campina Grande	814,85	310,13	503,28	1,57
250320903A	Cabedelo	9489,81	4667,66	1715,88	5,58
250400907A	Campina Grande	938,91	507,3	453,92	1,93
250300101A	Caaporã	8320,98	4141,59	1692,28	4,94
250750706A	João Pessoa	8904,13	4025,53	1787,25	4,9
250320902A	Cabedelo	11058,25	5651,58	1763,3	6,35
250400901C	Campina Grande	922,44	523,13	315,8	2,8

Fonte: Autoral

Percebe-se da tabela acima que os valores de erosividade pelo método do KE>25 são consideravelmente menores que os obtidos pelo método EI30, inclusive, o valor da média aritmética chega a ser duas vezes menor. Isso se dá, pois o método do KE>25 propõe que o

evento chuvoso só é considerado erosivo quando sua intensidade for maior que 25 mm/h como mencionado anteriormente. Dessa forma, o segundo método subestima a capacidade de erosividade de alguns eventos chuvosos apontando um valor menor para a erosividade anual média do período analisado.

5.2. Classificação da erosividade por estação

Na classificação da erosividade por estação foi utilizando o a classificação proposta por Foster et al. (1981) em que são consideradas cinco classes de erosividade limitadas por intervalos do valor de erosividade corrigido para as unidades de medida do S.I.

Percebeu-se uma divisão clara das estações em dois grupos, ambos com 10 estações cada, um com classificação de erosividade baixa, e outro com classificação de erosividade forte. Esse fato deve-se a localização dos postos pluviográficos, uma vez que o primeiro grupo está majoritariamente localizado na região do agreste paraibano enquanto o segundo grupo está distribuído na região do litoral paraibano.

Tabela 4 - Resultados obtidos para todas as estações analisadas.

Classificações para interpretação do índice de erosividade anual do Brasil.		
Erosividade (MJ mm)/(ha h ano)	Classe de erosividade	Nº de estações na classe
$R \leq 2452$	Erosividade baixa	10
$2452 < R \leq 4905$	Erosividade média	1
$4905 < R \leq 7357$	Erosividade média-forte	1
$7357 < R \leq 9810$	Erosividade forte	10
$R > 9810$	Erosividade muito forte	1

Fonte: Carvalho (2008), modificado para unidades métricas S.I. de acordo com Foster et al. (1981)

5.3. Mapas

Os mapas de erosividade são propostos para avaliações estaduais da erosão do solo pela água, risco de inundação e prevenção de desastres naturais. O mapa de erosividade pode ser obtido por métodos de interpolação usando valores amostrados para estimar os valores de erosividade em locais onde não há dados de precipitação estão disponíveis (MONTEBELLER et al., 2007).

Até recentemente, técnicas de interpolação como o inverso da distância elevado a um peso, Thiessen (1980) polígonos, ou o método das isoietas foram as técnicas mais populares para a interpolação de dados de chuva (GOOVAERTS, 1999). Nesse trabalho, utilizaremos

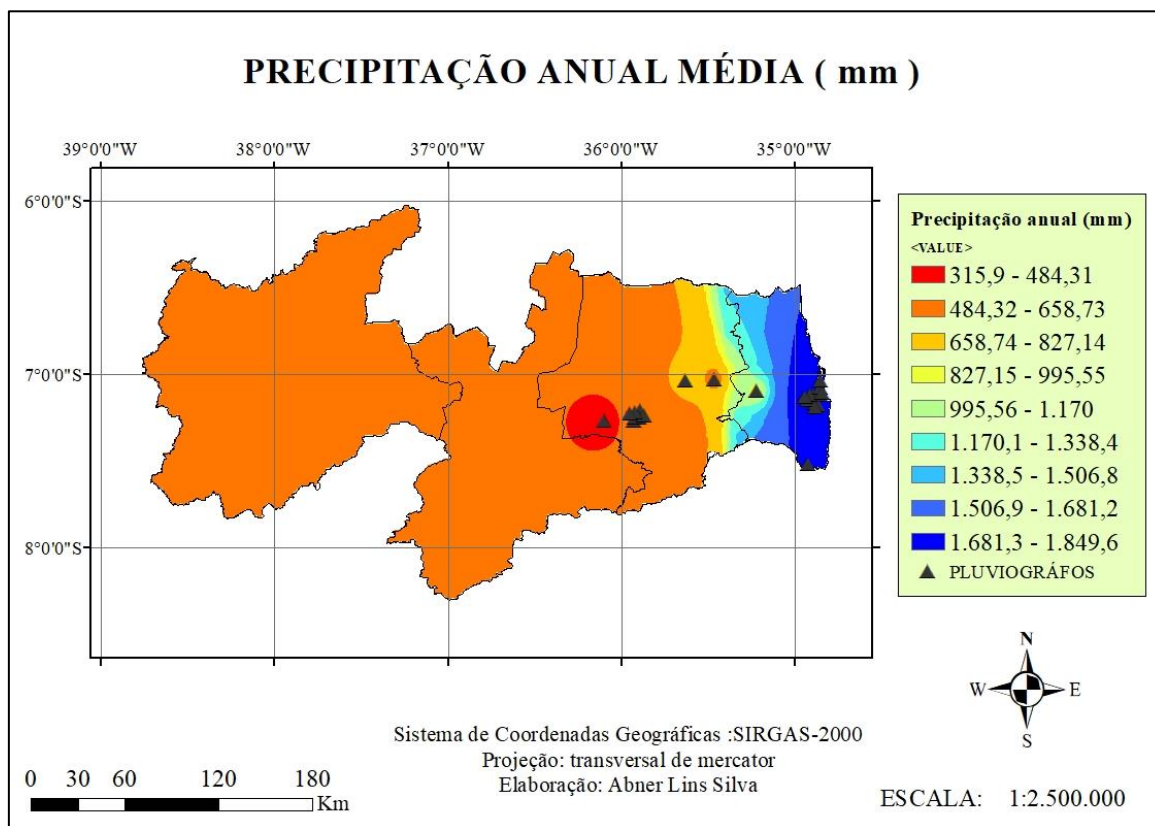
os valores de erosividade dos pontos e o método da ponderação pelo inverso da distância (IDW) para obter um mapa de erosividade do estado da Paraíba. Este estudo forneceu uma compreensão geral da ocorrência de maiores e menores valores de erosividade em todo o estado.

Os mapas aqui apresentados possuem resolução espacial de 30 arc-segundos (aproximadamente 1 km). De acordo com os dois mapas de erosividade (Figuras 9 e 10), os maiores valores estão localizados no litoral, porém é importante ressaltar que as estações utilizadas para a interpolação não estavam muito bem distribuídas pela área estudada. Concentradas na extremidade leste do estado. Sendo assim, os resultados das interpolações só podem ser considerados nas mesorregiões da Mata e do Agreste.

Além disso, vale ressaltar que o resultado obtido pela interpolação são arquivos chamados de “Rasters” em formato “Geotiff” que é um formato de arquivo de imagem que inclui informações espaciais adicionais (georreferenciação) incorporadas no arquivo. No nosso caso, cada pixel da imagem possui um valor de erosividade atrelado.

Os mapas a seguir possuem permitem uma compreensão geral dos resultados, porém, quando interpretados pelo software em formato “Geotiff”, torna-se possível processar os resultados de forma a obter novas informações, como por exemplo, calcular a erosividade média para qualquer região específica como um município ou umas das mesorregiões.

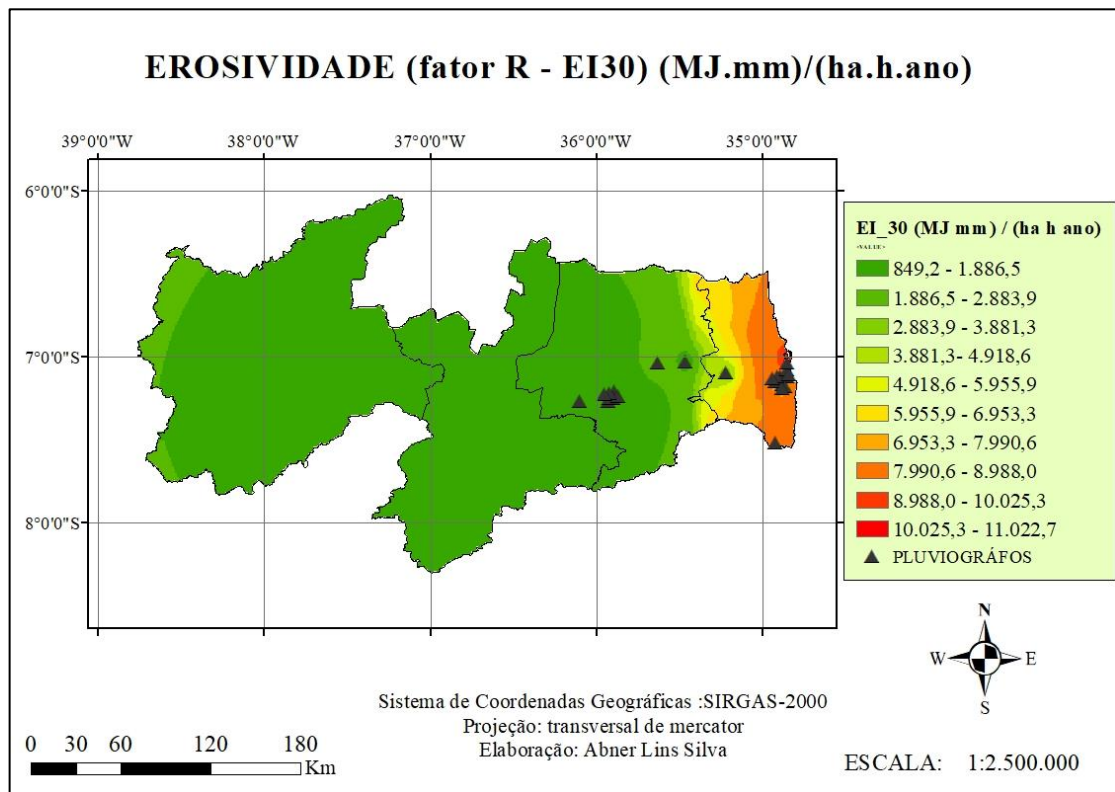
Figura 8 - Precipitação anual média no período analisado (mm)



Fonte: autoral

O mapa da Figura 8 caracteriza a distribuição da precipitação acumulada anual no território paraibano nele é possível verificar eu as áreas correspondentes aos maiores valores de precipitação também são as que correspondem aos maiores valores de erosividade. Isso se dá, pois a energia cinética da chuva é função da lâmina precipitada e também é proporcional ao número de eventos chuvosos erosivos.

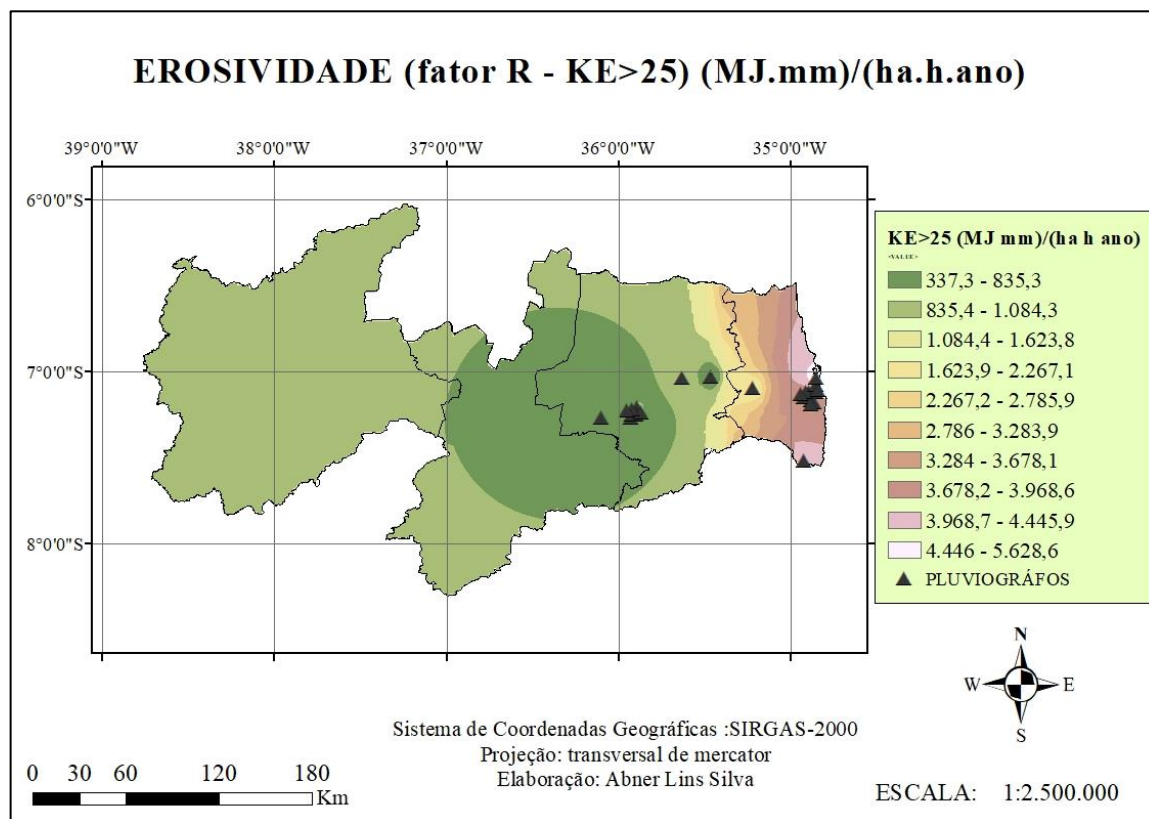
Figura 9 - Mapa de erosividade da chuva pelo método EI30



Fonte: autoral

Percebe-se do mapa de erosividade pelo método EI30 (Figura 9) altos valores de erosividade concentrados no litoral chegando a mais de onze mil. Isso se deve aos altos valores de intensidade de chuva e ao maior número de eventos erosivos nessa região.

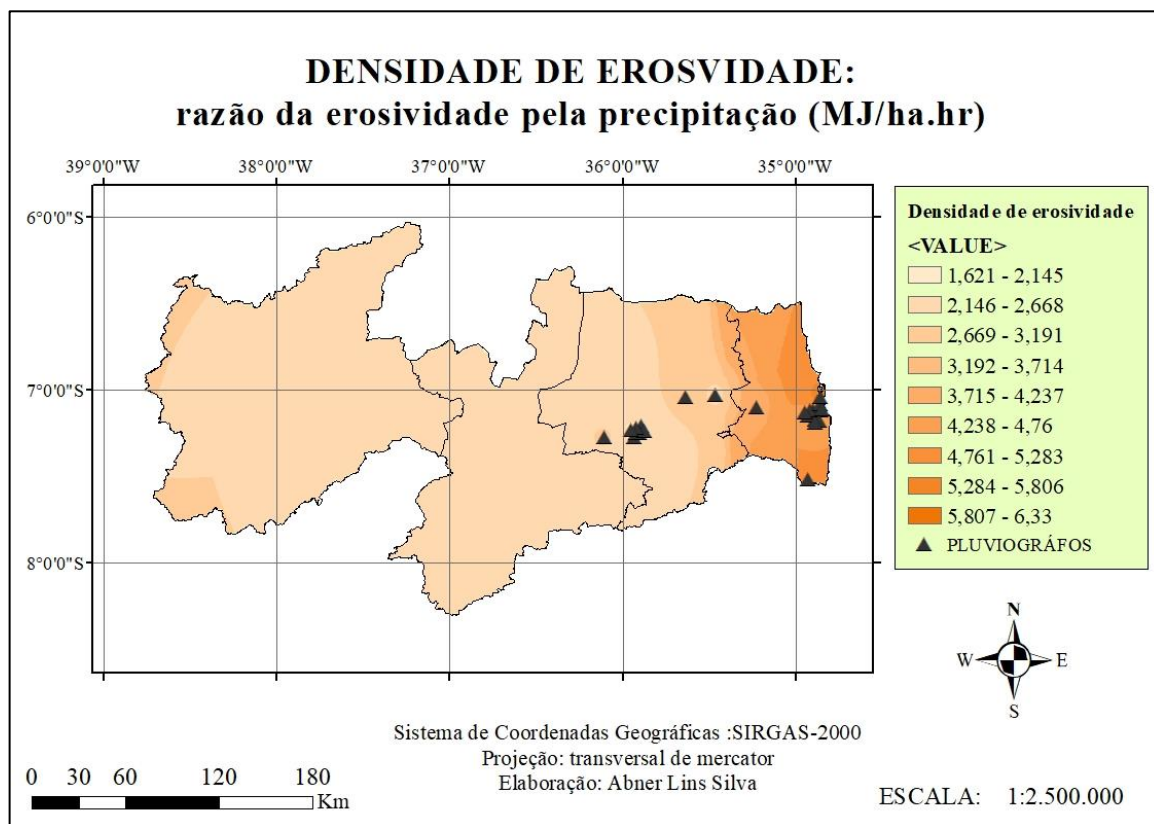
Figura 10 - Mapa de erosividade da chuva pelo método KE>25



Fonte: autoral

Do mapa de erosividade pelo método KE>25 (Figura 10), como esperado, foi constatada uma distribuição de valores semelhante ao mapa da Figura 9. Altos valores de erosividade concentrados no litoral chegando a cinco mil no ponto mais extremo. Como o método KE>25 subestima a capacidade de erosividade de alguns eventos chuvosos, obteve-se um valor menor para a erosividade para todos os pontos do mapa.

Figura 11 - Mapa de densidade de erosividade



Fonte: autoral

No mapa de densidade de erosividade (Figura 2), Os valores de densidade de erosividade variam de 1,6 a 6,33 MJ.ha⁻¹h⁻¹; Percebeu-se que os valores não variam tanto quanto nos outros mapas. Isso se dá, pois a densidade de erosividade é a razão da erosividade pela precipitação anual e ambos os mapas de precipitação anual média e erosividade possuem distribuição semelhante e a razão desses resulta em valores mais uniformes.

A densidade da erosividade também é um índice para inferir o potencial erosivo das chuvas e tem a vantagem de poder ser calculado com o uso de dados de precipitação com escala temporal diária como pluviômetros.

6 CONCLUSÕES

Foram utilizadas 23 estações do tipo pluviógrafo e calculadas as propriedades de chuva para os eventos chuvosos no período analisado. As propriedades da chuva calculadas foram: precipitação acumulada, intensidade da chuva, energia cinética e o I30. Essas propriedades são essenciais para a compreensão do evento chuvoso e podem ser úteis em vários tipos de estudos. No caso desse trabalho, essas propriedades proporcionaram o cálculo do índice de erosividade da chuva.

Foi calculado a erosividade da chuva (fator R) para o estado da Paraíba por meio de dois métodos. Utilizando o EI30, os valores variam de 849,2 a 11022,7 (MJ.mm)/(ha.h.ano) enquanto que o método do $KE > 25$ é mais rígido ao classificar um evento chuvoso como erosivo e portanto aponta valores menores de erosividade; Variando de 337,3 a 5628,6 (MJ.mm)/(ha.h.ano).

A interpolação foi realizada pelo método IDW e os mapas aqui apresentados fornecem valiosas informações sobre zonas potencialmente mais sujeitas a erosão hídrica. Além disso, quando interpretados por uma ferramenta de geoprocessamento, cada pixel representa um valor de erosividade e traz grandes vantagens principalmente nos estudos sobre áreas não contempladas por estações. Também são úteis para ilustrar como a erosividade das chuvas influencia a erosão do solo e fornecer uma importante fonte de informação para prever erosão no Brasil.

Tendo em vista a importância do tema erosão hídrica e a utilidade da equação universal dos solos USLE, a variável erosividade tem grande relevância no aspecto por ser um dos fatores da equação.

Os resultados de erosividade especializados apontam erosividade forte para a região da mata paraibana; médio-forte para a região agreste e fraca para o sertão e a Borborema. Além disso, o mapa de distribuição da densidade de erosividade pelo estado aponta resultados semelhantes. Porém, não é possível afirmar para as regiões do Sertão e da Borborema pois não existem estações lá.

A erosão hídrica depende ainda de outros fatores como a erodibilidade declividade do terreno entre outros. Porém, com os resultados obtidos para os valores de erosividade já se pode constatar que as áreas mais acentuadas no mapa devem estar sobre cuidado especial uma vez que estão mais susceptíveis a eventos chuvosos extremos.

Segundo da Silva (2004), mais da metade da população brasileira vive em regiões costeiras, e a taxa de urbanização em muitas cidades está aumentando. Esses fatores

antrópicos também podem aumentar o potencial de erosão porque a cobertura da terra torna-se mais vulnerável aos processos erosivos pluviais.

Comparando com trabalhos passados, essa é a primeira vez que é feito um mapa de erosividade para o estado da Paraíba, utilizando como base dados de chuva com escala sub-horária, portanto, trata-se de um estudo inovador.

Em um futuro trabalho, os resultados obtidos para a densidade de erosividade distribuídos pela Paraíba podem ser comparados aos obtidos com o uso de dados de pluviômetros e equações empíricas para aferição do método empírico e as variáveis calculadas para o estado da Paraíba podem ser calculadas para todo o país.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. Q. DE et al. Modelling the spatial dependence of the rainfall erosivity index in the Brazilian semiarid region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 371–379, jun. 2017.
- ARAÚJO, M. L. S. DE et al. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, v. 80, p. 57–67, jan. 2019.
- CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia Prática. **Interciência**, Rio de Janeiro. 2008.
- CECÍLIO, R. A. et al. Database of rainfall erosivity factor for 141 locations in Brazil. **Latin American Data in Science**, v. 1, n. 3, p. 95–101, 20 dez. 2021.
- DIAS, L. C. P. et al. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global Change Biology**, v. 22, n. 8, p. 2887–2903, 12 maio 2016.
- TEIXEIRA, D. B. DE S. et al. Recent advancements in rainfall erosivity assessment in Brazil: A review. **CATENA**, v. 219, p. 106572, dez. 2022.
- FOSTER, G.R., 2008. User's Reference Guide: Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE2). Washington, DC.
- GOOVAERTS, P. Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity. **CATENA**, v. 34, n. 3-4, p. 227–242, fev. 1999.
- BECKETT, P. H. T.; HUDSON, N. Soil Conservation. **The Geographical Journal**, v. 138, n. 2, p. 247, jun. 1972.
- IBGE, 2022. Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1: 250000. **Série Relatórios Metodológicos**, vol. 45. Rio de Janeiro.
- LOMBARDI NETO, F., MOLDENHAUER, W.C., 1992. Rainfall erosivity: its distribution and relationship with soil loss at Campinas, state of Sao Paulo, Brazil. **Bragantia** 189–196.
- MOREIRA, M. C. et al. NetErosividade MG: erosividade da chuva em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1349–1353, jun. 2008.
- MOREIRA, M.C., OLIVEIRA, T.E.C. DE, CECÍLIO, R.A., PINTO, F. DE A. DE C., PRUSKI, F.F. Spatial Interpolation of Rainfall Erosivity Using Artificial Neural Networks for Southern Brazil Conditions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v. 40, n. 0, 2016.
- OLIVEIRA, P.T.S., ALVES SOBRINHO, T. RODRIGUES, D.B.B., PANACHUKI, E. Erosion risk mapping applied to environmental zoning. **Water Resources Management** , v. 25, n. 3, p. 1021–1036, 16 dez. 2010.
- PANAGOS, P., BORRELLI, P., MEUSBURGER, K., YU, B., KLIK, A., LIM, K.J., BALLABIO, C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. **Sci. Rep.** v 7, p. 1–12. 2017.

RENARD, K.G. et al.. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), **Agriculture Handbook**, 703. Washington: DC.

DA SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **CATENA**, v. 57, n. 3, p. 251–259, ago. 2004..

DA SILVA, R.M., Santos, C.A.G., da Costa Silva, J.F.C.B., Silva, A.M., Brasil Neto, R.M. Spatial distribution and estimation of rainfall trends and erosivity in the Epitácio Pessoa reservoir catchment, Paraíba, Brazil. **Nat. Hazards** 102, 829–849. 2020.

SOUSA, F.R.C., DE PAULA, D.P. Analysis of soil loss by erosion in Coreaú river basin (Ceara-Brazil). **Revista Brasileira de Geomorfologia** v. 20, p. 491–507. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i3.1393>.

SOUZA, C.M.P., VELOSO, G.V., DE MELLO, C.R., RIBEIRO, R.P., DA SILVA, L.A.P., LEITE, M.E., FERNANDES FILHO, E.I. Spatiotemporal prediction of rainfall erosivity by machine learning in southeastern Brazil. **Geocarto International**, p. 1–19, 18 abr. 2022.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation planning, **Agriculture Handbook**, p. 537. Washington: DC. 1978.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. Am. **Geophys.** Union 39, 285.1958.