

## **Erosividade da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS): tendências e espacialização**

*Erosivity of the Santa Maria river basin (RS): trends and spatialization*

**Carina Petsch**

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

[carinapetsch@gmail.com](mailto:carinapetsch@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1079-0080>

**Fábio de Oliveira Sanches**

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

[fsanches.73@gmail.com](mailto:fsanches.73@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-8350>

**Anderson Augusto Volpato Scoti**

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

[ascoti2@gmail.com](mailto:ascoti2@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8667-0432>

**Romario Trentin**

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

[romario.trentin@gmail.com](mailto:romario.trentin@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0615-2801>

**Luís Eduardo de Souza Robaina**

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

[lesrobaina@yahoo.com.br](mailto:lesrobaina@yahoo.com.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2390-6417>

**Eduardo Cunha do Amaral**

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

[eamaral783@gmail.com](mailto:eamaral783@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2293-3544>

### **RESUMO**

A erosividade da chuva é um dos principais fatores desencadeadores da erosão. Diante disso, os objetivos desta pesquisa são calcular, espacializar, estimar o tempo de retorno e encontrar tendências de aumento da erosividade anual e mensal na bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS) - BHRSM. A análise da erosividade foi realizada com base em dados pluviométricos diários, no período de 1986-2019, de sete estações meteorológicas (EM). Foi utilizada uma equação de regressão de Bazzano *et al.* (2007) para Quaraí (RS) para transformação da precipitação diária em escalas de segundos para cálculo da erosividade. A espacialização dos dados foi realizada pelo método de interpolação IDW do SIG QGIS 3.4. A erosividade média anual da BHRSM (fator R da EUPS) é de  $\sim 11.979 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , sendo classificada como “muito forte” e se concentrando no período de outubro-maio (73%), justamente o período em que acontece o plantio, desenvolvimento e colheita das culturas temporárias. O mês de abril é o de maior potencial erosivo, com  $1.650 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$ . A maior taxa de erosividade anual, de  $24.868,89 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , apresentou tempo de retorno estimado de 35 anos, com probabilidade de ocorrência de 2,85%. Os valores de tendências de erosividade mais elevados foram encontrados entre os anos de 2010 e 2019 em 6 das 7 EM. Por fim, salienta-se que a erosão linear com formação de voçorocas já foi identificada por vários autores na BHRSM, principalmente em sua porção norte, e a estação com maiores valores erosivos se localiza justamente nessa área.

**Palavras-chave:** EUPS, Mudanças climáticas, Culturas temporárias, Erosão.

## ABSTRACT

Rain erosivity is one of the main triggering factors for erosion. Therefore, the objective of this research is to calculate, spatialize, estimate the return time and find trends of increase in the annual and monthly erosivity of the Santa Maria river basin (RS) - BHRSM. The erosivity analysis was carried out based on pluviometric data, in the period 1986-2019, for seven meteorological stations (MS). A nearby area regression equation was used to transform 24-hour rainfall into smaller time scales to calculate erosivity. Data spatialization was performed in QGIS 3.4. The average annual erosivity of BHRSM (EUPS R factor) is  $\sim 11979 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , being classified as "very strong" and it is concentrated in the October-May period (73%), precisely the period in which the planting, development and harvesting of temporary crops takes place. The month of April is the month with the highest erosive potential, with  $1650 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ month}^{-1}$ . The highest annual erosivity rate,  $24868.89 \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , presents estimated return of 35 years with probability of occurrence of 2.85%. The highest erosivity trend values were found for the last decade, in 6 of the 7 MS. Finally, it is noteworthy that linear erosion with formation of gullies has already been identified by several authors in the BHRSM, mainly in its northern portion and the station with the highest erosive values is located precisely in this area.

**Keywords:** USLE, Climate Change, Temporary crops, Erosion.

## 1. INTRODUÇÃO

O índice de erosividade - fator R - é um dos mais utilizados para estudos de perda de solo sendo um dos parâmetros mais importantes a ser inserido em modelos de previsão de erosão de solo, especialmente nos mais conhecidos como a *RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)* ou a *USLE (Universal Soil Loss Equation)*, além de ser um dos fatores climáticos que mais condiciona a erosão hídrica (GUPTA; KUMAR, 2017; PANAGOS *et al.*, 2017). A erosividade das chuvas é definida como a soma anual média dos valores individuais do índice de erosão dos eventos extremos -  $EI_{30}$  -, onde E é a energia cinética total da chuva e  $I_{30}$  é a intensidade máxima de chuva de 30 minutos (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Destaca-se que a equação USLE necessita de registros pluviométricos e de análise da precipitação por um período de 20 a 30 anos para determinar o fator R (CASSOL *et al.*, 2008). Contudo, para o Brasil os dados de precipitação possuem lacunas temporais. Oliveira *et al.* (2013), ao realizarem uma pesquisa de revisão sobre a erosividade da chuva no Brasil, observaram que 85% dos artigos analisados foram desenvolvidos com séries temporais menores do que 20 anos, o que não é adequado para a aplicação dos modelos USLE e *RUSLE*, por exemplo.

Outro empecilho para a estimativa dos valores de erosividade está na coleta dos dados de precipitação, que para o Brasil, geralmente, estão disponíveis por dia no portal da Hidroweb. Devido à escassez de registros pluviométricos, diversos estudos vêm utilizando coeficientes que transformam a chuva diária em escalas de tempo menores, como por minuto (RUFINO *et al.*, 1993; BAZZANO *et al.*, 2007; BACK *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2014; BEYENE *et al.*, 2018; SANTOS NETO; CHRISTOFARO, 2020). Ressalta-se que os registros pluviométricos diários estão geralmente disponíveis com satisfatória cobertura espacial e temporal para a maioria dos locais, possibilitando o cálculo do índice de erosividade em regiões que não possuem dados em escala de tempo menor, como por minuto (RENARD; FREIMUND, 1994; SILVA, 2004; ANGULO-MARTÍNEZ; BEGUERÍA, 2009).

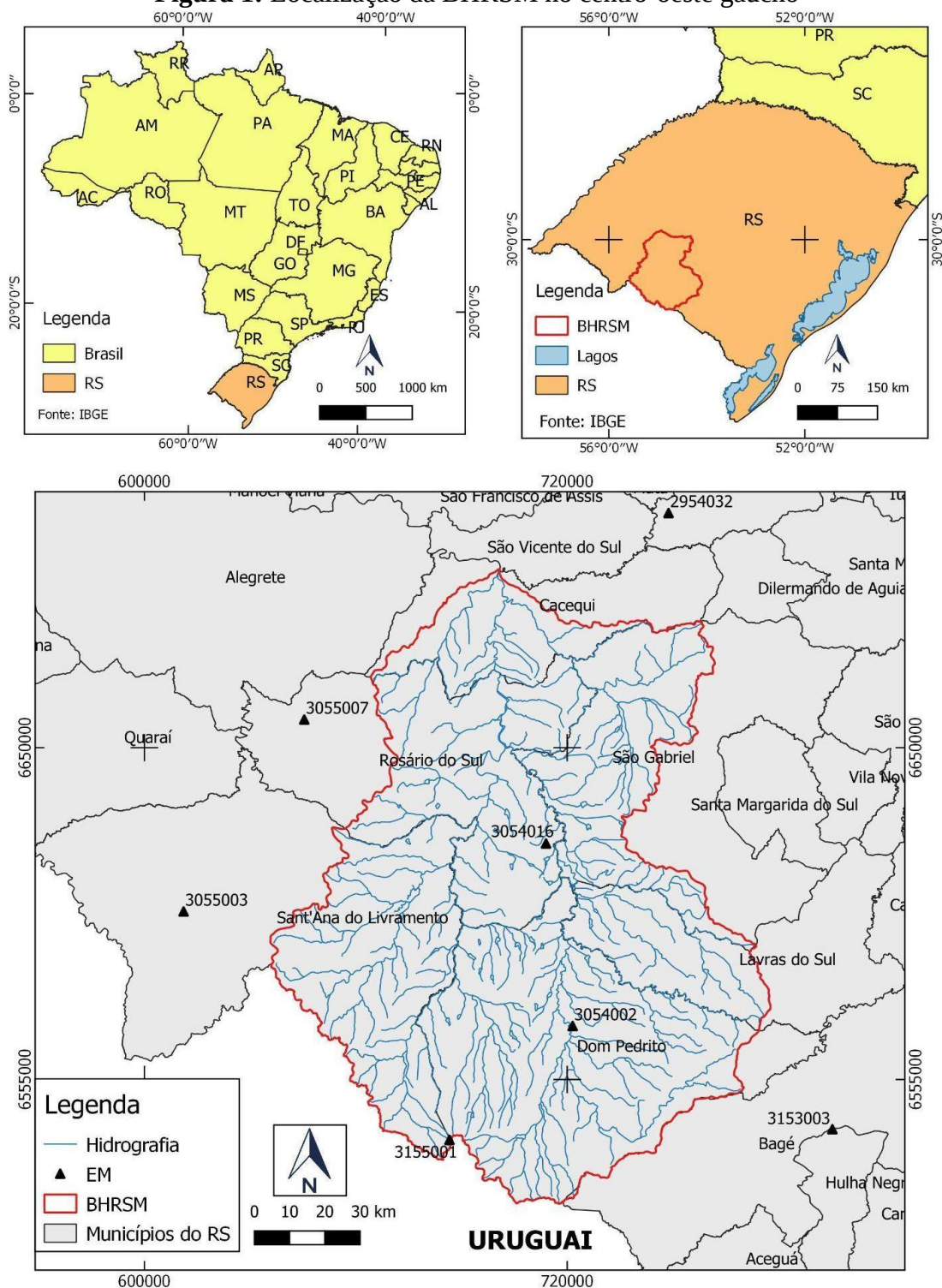
Além disso, recentemente há uma preocupação em relacionar a erosividade com mudanças no padrão de precipitação. Neste viés, o índice de erosividade pode ser definido como uma função da frequência e da intensidade das chuvas, ambas influenciadas pelas mudanças climáticas (SEGURA *et al.*, 2014). Nesse sentido, várias pesquisas calcularam o fator R e o relacionaram com mudanças climáticas: em escala global (WILLIAMS *et al.*, 1996; PRUSKI; NEARING, 2002; BORRELLI *et al.*, 2017); para a Ásia (ZHANG *et al.*, 2007; MA *et al.*, 2010; ZHANG *et al.*, 2010; SHIONO *et al.*, 2013; PLANGOEN; BABEL, 2014; ZHANG *et al.*, 2015; MONDAL *et al.*, 2016; ZHU *et al.*, 2019a); para a Europa (KLIK e EITZINGER, 2010; MULLAN, 2013; PANAGOS *et al.*, 2017); para os Estados Unidos da América (NEARING, 2001; NEARING *et al.*, 2005; ZHANG; NEARING, 2005; BIASUTTI; SEAGER, 2015; HOOMEHR *et al.*, 2016); para a Austrália (ZHU *et al.*, 2019b); e, finalmente, para o Brasil (FAVIS-MORTLOCK; GUERRA, 1999; ALMAGRO *et al.*, 2017; ANACHE *et al.*, 2018; COLMAN *et al.*, 2019).

Pesquisas estão sendo desenvolvidas na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria – BHRSM - (ROBAINA *et al.*, 2010; ROBAINA *et al.*, 2015, RADEMANN *et al.*, 2017; RADEMANN *et al.*, 2018; CABRAL, 2020), onde ocorrem significativos processos erosivos lineares profundos, formadores de voçorocas em áreas de cabeceira. Apesar disso, não foram desenvolvidos estudos considerando a erosividade, que representa um fator essencial para a aplicação das equações USLE e *RUSLE*. Sendo assim, os objetivos deste artigo são: (i) realizar o cálculo da erosividade para o período entre 1986 e 2019 nas escalas temporais anual e mensal; (ii) mapear os valores de erosividade; (iii) analisar tendências de aumento e diminuição dos valores de erosividade; (iv) calcular a frequência de retorno dos eventos extremos para a BHRSM.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

Localizada no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 29°47' a 31°36' de latitude Sul e 54°00' a 55°32' de longitude Oeste, a BHRSM abrange uma área de 15.740 km<sup>2</sup> (**Figura 1**). O rio Santa Maria tem seu canal principal com uma orientação Sul-Norte e é um importante tributário da margem esquerda do rio Ibicuí, que está inserida na região hidrográfica do Uruguai.

**Figura 1:** Localização da BHRSM no centro-oeste gaúcho



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2021).

A BHRSM drena áreas em três regiões geomorfológicas (IBGE, 1986), sendo elas: Planalto da Campanha, com destaque para as áreas festonadas do Front da Cuesta do Haedo; Depressão do Ibicuí, com litotipos sedimentares de idade Fanerozóica, onde encontra-se o canal principal do Rio Santa Maria; e, por fim, o Planalto rebaixado sobre rochas do Arqueano e Proterozóico (SCCOTI, 2017).

Em termos climáticos, segundo Rossato (2011) a área que compreende a BHRSM caracteriza-se por apresentar duas tipologias climáticas, representadas por “Subtropical I - pouco úmido”, com precipitações por volta de 1.200 - 1.500 mm/ano e temperatura média anual de 17 a 20°C, e “Subtropical II - medianamente úmido com variação longitudinal das temperaturas médias”, com precipitações de 1.500 - 1.700 mm/ano e temperatura média anual de 17 a 20°C.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Banco de dados - período de 1986 a 2019

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dados pluviométricos diários obtidos através do endereço eletrônico Hidroweb, da Agência Nacional das Águas<sup>1</sup>, sendo selecionadas informações de sete estações meteorológicas (EM). Salientamos que EM fora do limite da BHRSM foram inseridas nesta pesquisa (**Tabela 1**), visto que suas presenças são fundamentais para fazer a interpolação dos dados de erosividade e garantir a qualidade dos dados nas porções limítrofes da área de estudo, conforme recomendado por Renard *et al.* (1997).

**Tabela 1:** Informações sobre as sete estações meteorológicas consideradas para o estudo

| Código  | Nome            | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|---------|-----------------|----------|-----------|--------------|
| 3155001 | Três Vendas     | -31,28   | -55,04    | 210          |
| 2954032 | Ponte Toropi II | -29,65   | -54,43    | 128          |
| 3054002 | Dom Pedrito     | -30,98   | -54,68    | 136          |
| 3054016 | Granja Umbu     | -30,51   | -54,77    | 115          |
| 3055003 | Fazenda Encerra | -30,70   | -55,84    | 268          |
| 3055007 | São Carlos      | -30,20   | -55,49    | 141          |
| 3153003 | Paraíso         | -31,23   | -53,90    | 331          |

Fonte: Hidroweb, 2020.

Para setorizar a BHRSM e facilitar a análise dos dados denominamos que a EM Ponte Toropi II (2954032) pertence à porção norte; as EM São Carlos (3055007), Granja Umbu (3054016) e Fazenda Encerra (3055003) localizam-se na porção central; e Dom Pedrito (3054002), Três Vendas (3155001) e Paraíso (3153003) são pertencentes ao sul da BHRSM.

Para realizar o preenchimento das falhas na série de dados de precipitação foram calculados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e as equações de regressão entre a EM com menor ausência de dados e as demais EM. Após estimarem-se os valores para as falhas, foram calculados os coeficientes de Pearson obtidos a partir da correlação de dados entre as estações meteorológicas.

#### 3.2. Cálculo da erosividade e espacialização dos dados

Não foram encontrados dados pluviométricos para a BHRSM com registros em escalas de tempo menores do que diárias, sendo necessário o uso de uma equação de regressão de uma área próxima, Quaraí (RS). À vista disso, Oliveira *et al.* (2013), ao realizarem um estudo de revisão sobre

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>

a erosividade no Brasil, apontam que algumas equações de regressão são amplamente utilizadas para obter os valores locais de erosividade a partir de dados pluviométricos. Dessa forma, foi realizado o cálculo do coeficiente de Pearson entre os dados pluviométricos mensais adotados na pesquisa de Bazzano *et al.* (2007) para Quaraí (RS) e os dados para a BHRSM, conforme método de Silva *et al.* (2017) para validação do uso da equação de regressão. A **equação 1** é a de Bazzano *et al.* (2007).

$$EI_{30} = -754,37 + 13,50 p \quad (1)$$

Em que (p) é a precipitação média mensal.

Os valores dos índices  $EI_{30}$  obtidos para cada mês foram somados e utilizados para o cálculo de cada um dos anos da série temporal de dados e para cada uma das estações meteorológicas. Esses dados foram utilizados para o cálculo da distribuição média anual e mensal da erosividade (ANDRADE *et al.*, 2020) para a BHRSM. A avaliação qualitativa dos dados anuais e mensais (**Tabela 2**) foi realizada a partir da classificação de Santos (2008).

**Tabela 2:** Classificação qualitativa de Santos (2008) para a erosividade mensal e anual

| Erosividade<br>(MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> ) | Erosividade<br>(MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> .mês <sup>-1</sup> ) | Classe de erosividade |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| $R \leq 2500$                                                                | $R \leq 250$                                                                 | Baixa                 |
| $2500 < R \leq 5000$                                                         | $250 < R \leq 500$                                                           | Média                 |
| $5000 < R \leq 7000$                                                         | $500 < R \leq 700$                                                           | Média-forte           |
| $7000 < R \leq 10000$                                                        | $700 < R \leq 1000$                                                          | Forte                 |
| $R > 10000$                                                                  | $R > 1000$                                                                   | Muito forte           |

Fonte: Santos (2008).

Para a interpolação dos dados de erosividade, visando a espacialização das informações, foi utilizado o IDW (*Inverse Distance Weighting*), disponível no Sistema de Informação Geográfica QGIS 3.4. O IDW baseia-se na suposição de que o valor em um ponto não amostrado é uma média ponderada de distância dos valores em pontos de amostragem próximos, formando círculos de influência, ou seja, um raio de ação definido em todas as direções (ANGULO-MARTINEZ, 2009; RIGHI, 2016). Para a interpolação da precipitação e erosividade da chuva no Brasil, alguns autores (SILVA, 2004; GONÇALVES, 2006; DA SILVA, 2020; SANTOS NETO; CHRISTOFARO, 2020; SILVA NETO, 2020; FLORENTIM, 2021) utilizaram com sucesso esse método de interpolação. Nesse sentido, considerando que a BHRSM possui grande parte de sua área na classe de altitude abaixo de 150 m, assume-se que não houve interferências do relevo na precipitação, configurando os resultados obtidos com o interpolador IDW como válidos.

O *software* Excel foi utilizado para a elaboração dos gráficos. A caracterização dos dados sob a atuação das fases positiva (El Niño) e negativa (La Niña) do fenômeno El Niño Oscilação-Sul (ENOS) foi realizada com base nos dados do CPTEC/INPE<sup>2</sup>.

### 3.3. Período de retorno e probabilidade de ocorrência de extremos de erosividade anual

O período de retorno (T) e a probabilidade de ocorrência (Pr) da erosividade anual e mensal foram obtidos conforme Schwab *et al.* (1981), utilizando as **Equações 2 e 3**, respectivamente.

$$T = \frac{N+1}{m} \quad (2)$$

<sup>2</sup> Disponível em <http://enos.cptec.inpe.br/>.

Sendo que: N = número total de anos dentro do período de estudo; m = número de ordem do índice de erosividade, isso quando colocados em ordem decrescente de magnitude.

$$Pr = \frac{100}{T} \quad (3)$$

Em que Pr é a probabilidade de ocorrência do índice de erosividade.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Organização do banco de dados: preenchimento das falhas e validação da equação de erosividade

No que tange à validação da equação utilizada, o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) obtido por regressão linear entre a média pluviométrica mensal da BHRSM e os dados utilizados por Bazzano *et al.* (2007) foi de 0.5. O valor se justifica pelo fato de que as EM mais próximas a Quaraí tiveram um  $R^2$  maior, entre 0,4 e 0,7 (estações Granja Umbu (3054016), Fazenda Encerra [3055003], São Carlos [3055007] e Dom Pedrito [3054002]), enquanto as EM mais à leste da BHRSM apresentaram valores inferiores.

Para o preenchimento das falhas na série histórica, a estação de Dom Pedrito foi utilizada diante de sua menor ausência de dados. Os valores de  $R^2$  obtidos foram 0.70, 0.38, 0.68, 0.58, 0.56 e 0.59, respectivamente, para as estações de Três Vendas (3155001), Ponte Toropi II (2954032), Granja Umbu (3054016), Fazenda Encerra (3055003), São Carlos (3055007) e Paraíso (3153003). Quanto aos valores do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre a EM Dom Pedrito e Três Vendas, Ponte Toropi II, Granja Umbu, Fazenda Encerra, São Carlos e Paraíso, foram, respectivamente, 0.84, 0.62, 0.83, 0.76, 0.75 e 0.77.

### 4.2. Índice de erosividade anual

Considerando os valores totais anuais de erosividade nas diferentes EM e anos analisados, obtém-se uma variação considerável. O maior valor anual de erosividade (**Figura 2**) ocorreu na estação Três Vendas (3155001), ao sul da BHRSM, com  $29.981 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  (ano de 2002), enquanto o menor valor ocorreu em São Carlos (3055007) - central, com  $3.338 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  (ano de 1999).

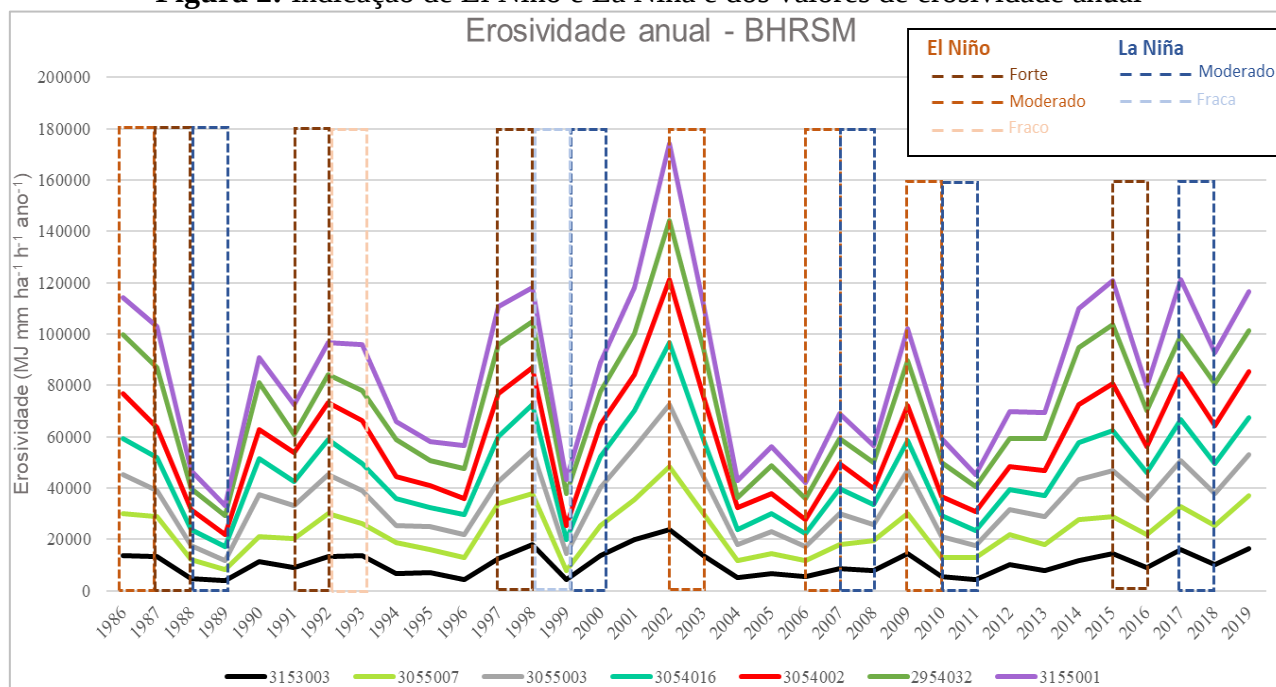
Quanto à variação entre os dados, a estação Granja Umbu (3054016) - porção central da BHRSM, apresentou a menor variação de erosividade anual no período, sendo de  $4.808 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  em 2006, e o maior valor,  $24.142 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , em 2002. A estação Três Vendas (3155001) apresentou a maior variação, entre  $3.686 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  e  $29.981 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  para os anos de 1989 e 2002, respectivamente. Destaca-se que o ano de 2002 teve os maiores valores de erosividade (**Figura 2**) registrados em 6 das 7 EM analisadas, período de El Niño moderado.

Somente a estação Ponte Toropi II (2954032) apresentou seu maior valor anual de erosividade ( $23.420 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ) em 1987, também ano de El Niño, com transição de moderado a forte. Observa-se que os maiores valores de erosividade anual foram registrados em anos de presença de El Niño (**Figura 2**), com exceção de 2017 e 2018, quando foi registrada La Niña. Ademais, no ano de 1989 havia o registro de uma La Niña moderada, sendo que esse foi o ano em que o menor valor de erosividade anual foi registrado, de  $4.080,31$  na EM Paraíso (3153003).

Comparando qualitativamente os valores anuais totais de erosividade por EM, verificou-se que os valores classificados como “muito forte” prevalecem em todas as EM (**Figura 3**). A EM do

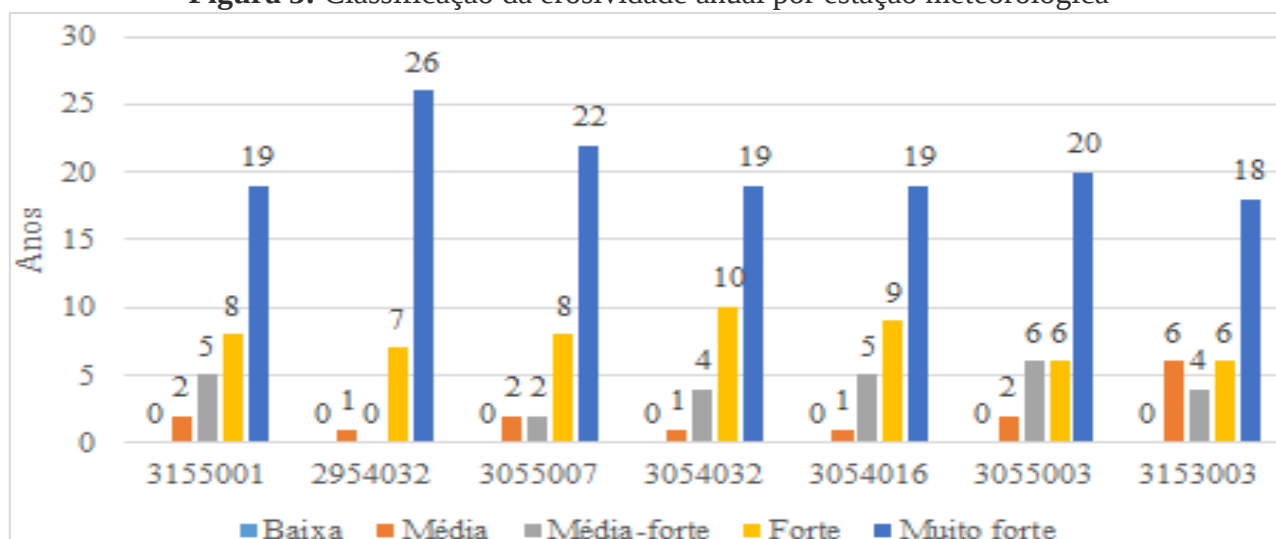
Norte, Ponte Toropi II (2954032), apresenta 26 anos com valores de “muito forte”, correspondendo a 74% da série histórica. A EM 2954032 se destaca por ter apresentado somente 1 ano (~3%) classificado na classe de “média” e outros 7 anos (~20%) na classe “forte”. A EM Paraíso (3153003), localizada ao sul da BHRSM, destacou-se por apresentar maior número de anos (17%) com classificação de erosividade na classe “média” e também por apresentar o menor número de anos, 18 (~52%), na classe “muito forte”.

**Figura 2:** Indicação de El Niño e La Niña e dos valores de erosividade anual



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2021).

**Figura 3:** Classificação da erosividade anual por estação meteorológica



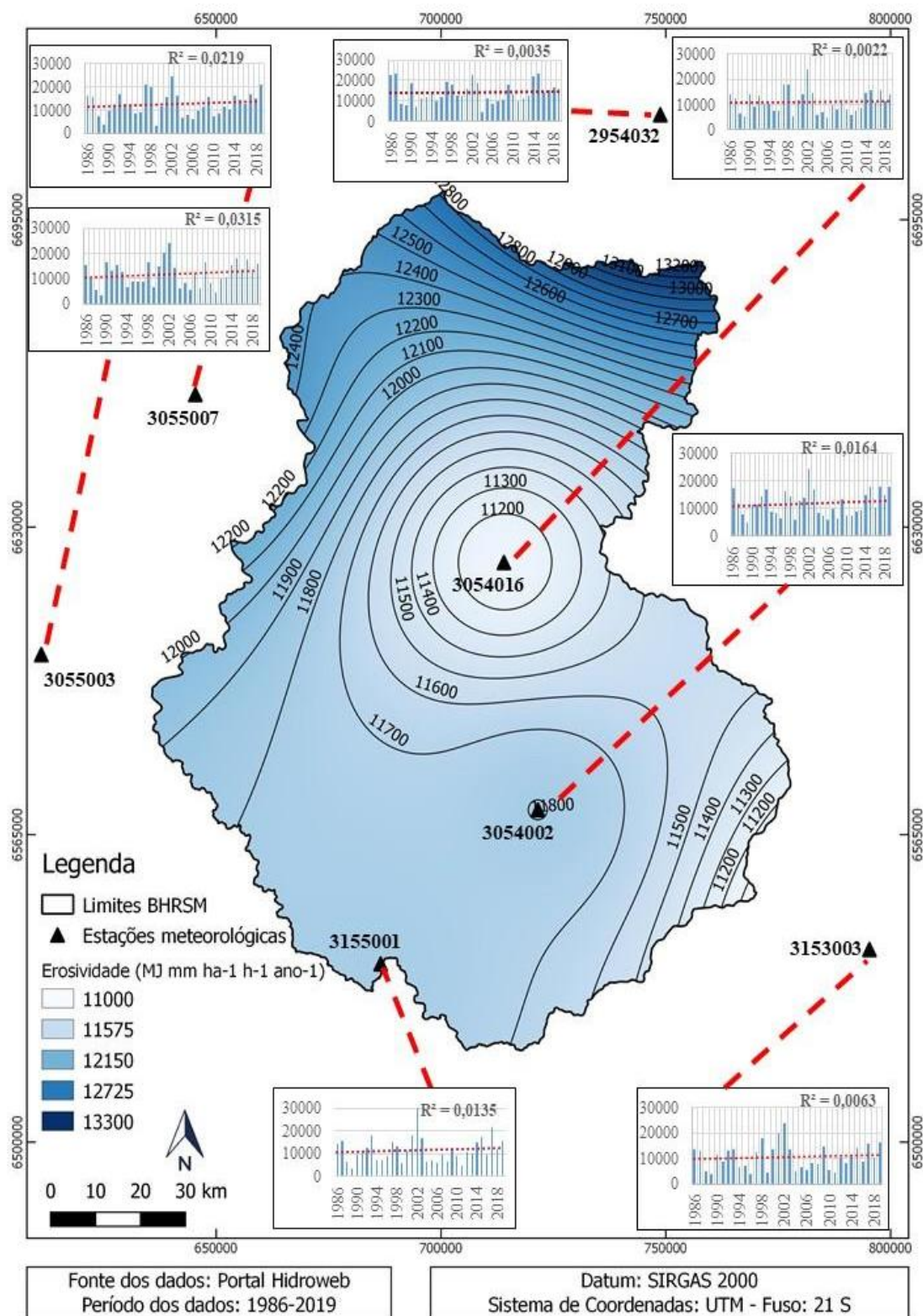
Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2021).

#### 4.3. Erosividade média anual por EM

O maior índice de erosividade média anual ocorreu na estação Ponte Toropi II (2954032), com 14.077 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, e na estação São Carlos (3055007), com 12.585 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.

$1.\text{ano}^{-1}$ , configurando as porções norte e noroeste da BHRSM como as de maior erosividade (**Figura 4**). Os menores índices de erosividade média anual foram de  $11.119 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  e  $10.582 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  para as EM Granja Umbu (3054016) e Paraíso (3153003), respectivamente, configurando espacialmente as porções centrais e sul da BHRSM.

**Figura 4:** Erosividade média anual da BHRSM com destaque para os maiores valores na porção norte



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2021).

Avaliando as tendências de aumento de erosividade, verifica-se que, ao considerar toda a série histórica de dados (1986-2019), o maior valor de  $R^2$  foi de 0.03 na EM Fazenda Encerra (3055003) (**Figura 4**). Divididos por períodos, os resultados apontam algumas tendências de aumento dos valores, apresentadas a seguir. Com exceção da EM Ponte Toropi (2954032), todas as demais tiveram seu maior valor de tendência de aumento no período entre 2008 e 2019.

A EM do norte da BHRSM, a 2954032, apresentou os valores de  $R^2 = 0.22$ , 0.31 e 0.13 para os períodos entre 1986 a 1996, 1997 a 2007, 2008 a 2019, respectivamente, considerando os valores de índice médio anual de erosividade.

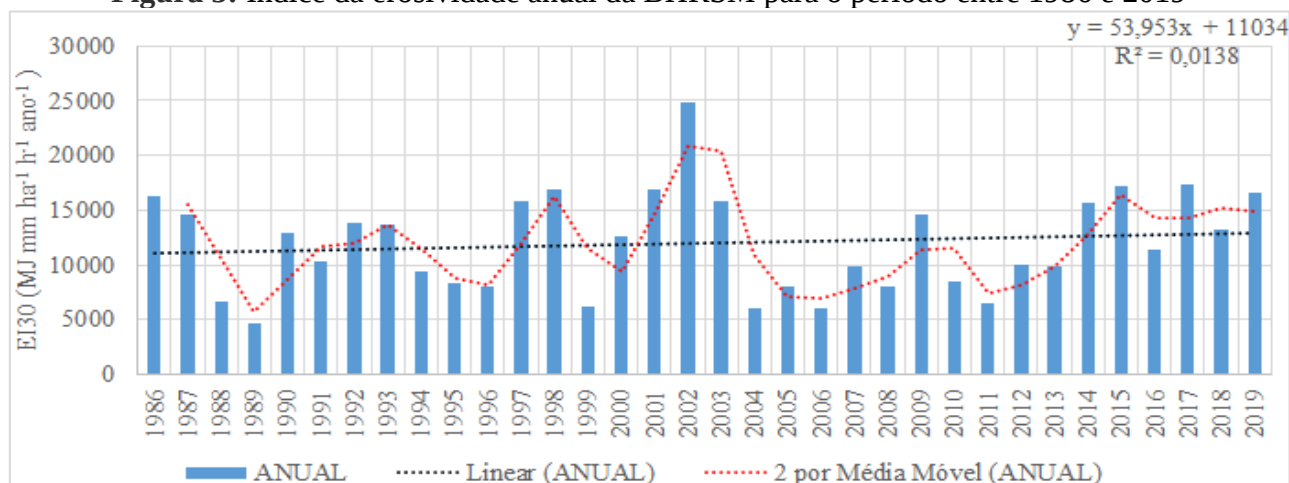
Para as estações da porção central da BHRSM, a EM São Carlos (3055007) apresentou maiores tendências de aumento, sendo de  $R^2 = 0.21$  e 0.43 para os períodos de 1997 a 2007 e 2008 a 2019, respectivamente; a 3055003 apresentou o valor de  $R^2 = 0.34$  no período de 2008 a 2019; e a estação Granja Umbu (3054016) apresentou valores de  $R^2 = 0.22$  e  $R^2 = 0.40$  para os períodos de 1997 a 2007 e 2008 a 2019, respectivamente.

Para a porção sul, a estação Dom Pedrito (3054002) apresentou os valores de  $R^2 = 0.13$  e 0.54 para os períodos de 1997 a 2007 e 2008 a 2019, respectivamente; a EM Três Vendas (3155001) teve um valor de  $R^2 = 0.37$  no período entre 2008 e 2019; e a EM Paraíso (3153003) apresentou os valores de  $R^2 = 0.11$ , 0.16 e 0.27 para os períodos de 1986 a 1996, 1997 a 2007 e 2008 a 2019, respectivamente.

#### 4.4. Erosividade média anual para a BHRSM

O índice de erosividade média anual (fator R da EUPS) para a BHRSM é de 11.979 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo classificada como “muito forte”. Destaca-se o ano de 2002 como o de maior valor de erosividade média anual, atingindo 24.868,89 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> (**Figura 5**). Os anos de 2015 e 2017 também se destacam pelos valores altos, sendo de 17.284 mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e 17.288 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Avaliando qualitativamente os valores médios anuais de erosividade, somente o ano de 1989 é de erosividade “média”; 5 anos são classificados como sendo de “média a forte”; 9 anos na classe “forte”; e 19 anos na classe “muito forte”. Sendo assim, tem-se uma tendência de ocorrência de valores extremos para a BHRSM.

**Figura 5:** Índice da erosividade anual da BHRSM para o período entre 1986 e 2019



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2021).

Os dados de análise de tendência da erosividade média anual da BHRSM para toda a série de 1986 a 2019 demonstram um  $R^2 = 0.01$ ; porém, quando analisamos por períodos, verificou-se que o período entre 1986 e 1996 tem o  $R^2 = 0.10$ ; o período entre 1997 e 2007 apresenta  $R^2 = 0.16$ ; e no último período, correspondente aos anos de 2008 a 2019, o  $R^2$  é de 0.40.

#### 4.5. Erosividade mensal

Os valores mensais de erosividade indicam que em todas as EM predominam valores classificados como “muito forte” (**Tabela 3**). A estação Ponte Toropi II (2954032) - norte da BHRSM, apresentou 53% dos meses com chuvas erosivas classificadas na classe “muito forte”, além do menor percentual apresentado para a classe “baixa”, com 12%.

**Tabela 3:** Porcentagem de meses com erosividade classificada de acordo com Santos (2008)

| Classe de erosividade | EM 3155001 | EM 2954032 | EM 3055007 | EM 3054032 | EM 3054016 | EM 3055003 | EM 3153003 |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Baixa                 | 16         | 12         | 15         | 15         | 14         | 14         | 16         |
| Média                 | 13         | 13         | 12         | 17         | 16         | 18         | 14         |
| Média-forte           | 10         | 9          | 11         | 7          | 11         | 9          | 11         |
| Forte                 | 14         | 13         | 16         | 12         | 12         | 14         | 12         |
| Muito forte           | 47         | 53         | 46         | 49         | 47         | 45         | 47         |

**Fonte:** Elaborado pelo(s) autor(es) (2021).

Comparando os valores médios mensais de erosividade por EM, verificou-se que a maior variação ocorreu nos meses de julho e outubro. Em julho, houve uma variação de  $636 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$  em função de a estação Ponte Toropi II (2954032) registrar o valor de  $1.423 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$  e a estação Fazenda Encerra (3055003) registrar o valor de  $786 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$ . O mês de outubro, por sua vez, apresentou variação de  $582 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$ , com o valor de erosividade média mensal de  $1.943 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$  na EM 2954032 e de  $1.361 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$  na EM 3055003. Os meses de outubro e abril concentram os maiores valores de erosividade para a BHRSM (**Figura 6 e 7**).

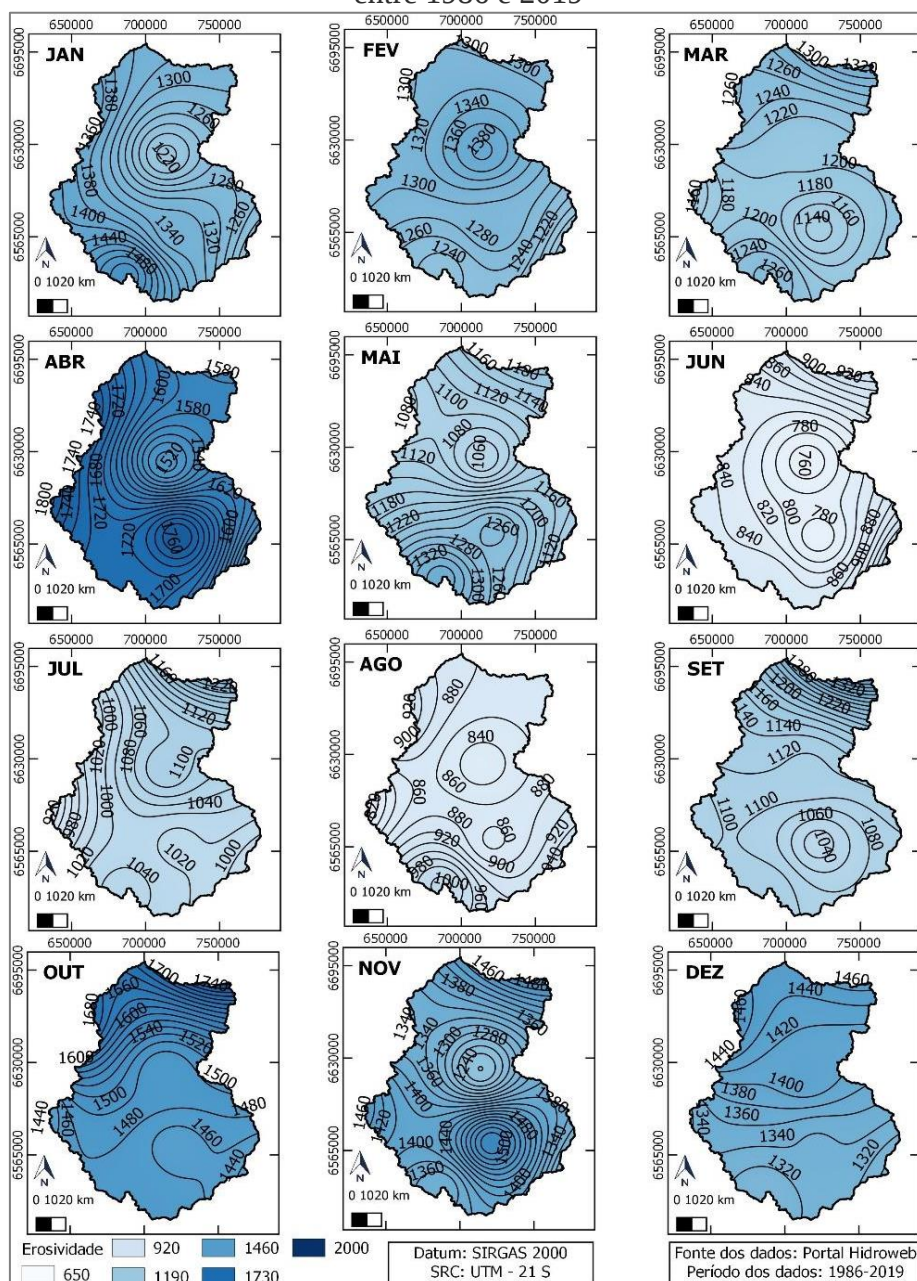
Considerando as tendências de aumento de erosividade mensal (**Figura 8**) em todo o período de análise (1986-2019), o mês de outubro se destacou por apresentar os dois maiores valores de  $R^2$ , sendo de 0.3 para a EM Dom Pedrito (3054002) e o valor de 0.28 para a EM Ponte Toropi II (2954032), sendo que a EM 3054002 se localiza na porção central da BHRSM e a 2954032 se localiza na porção norte.

Considerando o período entre 1986 e 1996, os maiores valores encontrados de  $R^2$  foram de 0.51 para a estação Paraíso (3153003) no mês de julho, 0.45 para a estação 2954032 no mês de março e 0.41 para a estação São Carlos (3055007) no mês de agosto. O mês de março se destacou por apresentar valores de  $R^2$  entre 0.18 e 0.45. A EM 3153003, sul da BHRSM, apresentou os maiores valores de  $R^2$ . No período entre 1997 e 2007, a estação Fazenda Encerra (3055003), porção central da BHRSM, apresentou os maiores valores de  $R^2$ , sendo de 0.91 em agosto e 0.80 em janeiro.

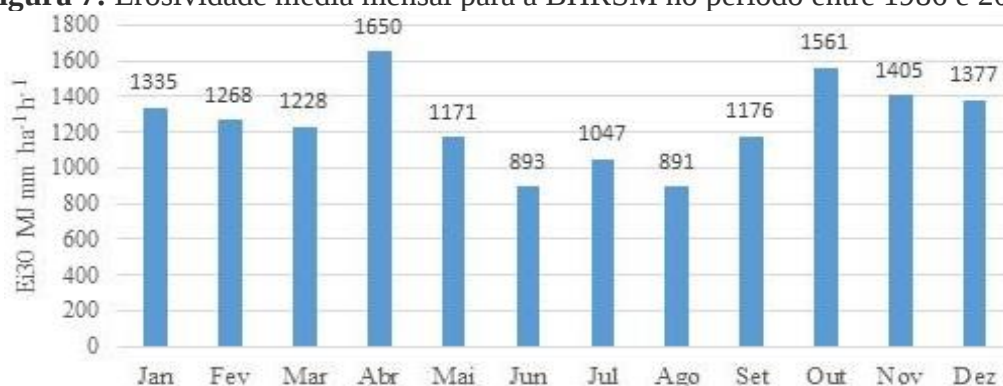
No período entre 2008 e 2019, com exceção dos meses que correspondem ao período de inverno, as tendências de aumento são maiores em relação aos períodos anteriores. O mês de janeiro se destacou por apresentar valores de  $R^2$  entre 0.27 e 0.60 nas estações São Carlos (3055007) e Granja Umbu (3054016), respectivamente, localizadas nas porções norte e central da BHRSM.

O mês de novembro apresentou tendências entre 0.27 e 0.68 para as estações 3055003 e 3054002, respectivamente, localizadas nas porções central e sul da BHRSM. Os meses de março, abril e maio também se destacam por registrarem valores de  $R^2$  que atingiram 0.39, 0.45 e 0.45, respectivamente. As estações com maior registro de tendências positivas foram Paraíso (3153003) e Dom Pedrito (3054002), localizadas na porção sul da BHRSM.

**Figura 6:** Mapas da erosividade média mensal ( $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$ ) para a BHRSM no período entre 1986 e 2019



**Figura 7:** Erosividade média mensal para a BHRSM no período entre 1986 e 2019



#### 4.6. Probabilidade de ocorrência de chuvas erosivas e tempo de retorno

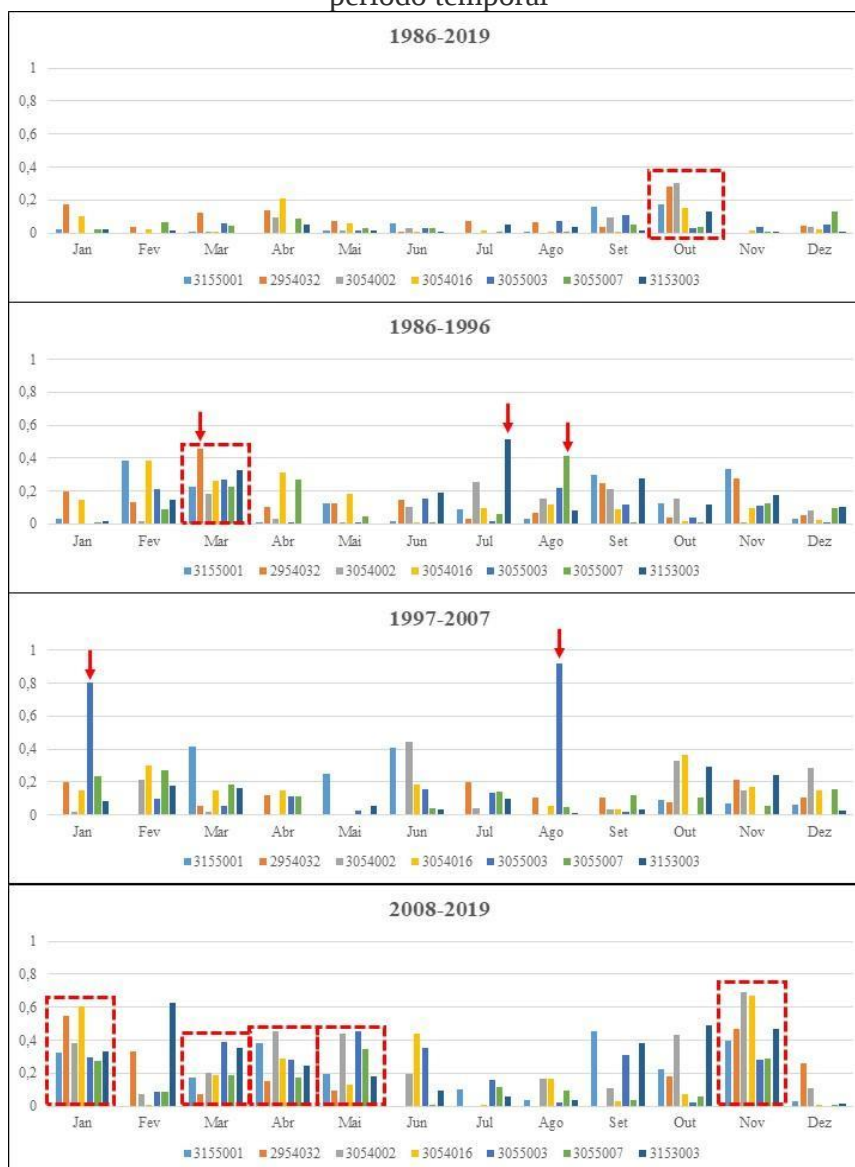
A maior taxa de erosividade, de 24868.89 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, apresenta tempo de retorno estimado de 35 anos, com probabilidade de ocorrência de 2.85%. Considerando os dez maiores valores de erosividade anual, tem-se que a cada 3.5 anos um valor ocorrerá novamente (**Tabela 4**).

**Tabela 4:** Probabilidade de ocorrência e tempo de retorno dos 10 maiores valores de erosividade anual

| Nº de ordem | Erosividade anual <sup>1</sup> | Probabilidade | TR    | Nº de ordem | Erosividade anual <sup>1</sup> | Probabilidade | TR   |
|-------------|--------------------------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|---------------|------|
| 1           | 24868.89                       | 2.86          | 35    | 6           | 16645.51                       | 17.14         | 5.83 |
| 2           | 17287.93                       | 5.71          | 17.50 | 7           | 16330.24                       | 20.00         | 5    |
| 3           | 17284.42                       | 8.57          | 11,67 | 8           | 15902.80                       | 22.86         | 4.38 |
| 4           | 16894.90                       | 11.43         | 8.75  | 9           | 15819.67                       | 25.71         | 3.89 |
| 5           | 16878.11                       | 14.29         | 7.00  | 10          | 15683.94                       | 28.57         | 3.50 |

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2021). TR - Tempo de Retorno.

**Figura 8:** Valores de R<sup>2</sup> referentes à erosividade mensal das EM consideradas no estudo por período temporal



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2021).

## 5. DISCUSSÕES

Os dados das estações Dom Pedrito (3054002) e Ponte Toropi II (2954032) ( $r = 0,62$ ) apresentaram correlação moderada. Os demais valores correlacionados demonstraram uma correlação forte entre os conjuntos de dados. Hinkle *et al.* (2003) consideram uma correlação moderada quando os valores de “ $r$ ” estão entre 0,5 e 0,7, correlação forte com valores de “ $r$ ” entre 0,7 e 0,9 e correlação muito forte com valores de “ $r$ ” superiores a 0,9. Dessa forma, a partir dos parâmetros de correlação observados, consideram-se significativos e consistentes os valores obtidos pela técnica adotada para o preenchimento das falhas nos conjuntos de dados.

A tipologia climática de Quaraí, de acordo com Rossato *et al.* (2011), é a mesma que em uma porção da BHRSM (Subtropical pouco úmido). Além disso, Quaraí teve um registro de precipitação média anual de 1.359 mm (BAZZANO *et al.*, 2007), enquanto a BHRSM possui o valor de 1.498,8 mm. Sendo assim, de acordo com a similaridade de valores pluviométricos e tipologias climáticas das duas áreas, avalia-se que o resultado de erosividade obtido é coerente.

O valor de erosividade média anual na BHRSM é de  $\sim 11.979 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Verifica-se que os valores encontrados nesta pesquisa estão acima daqueles encontrados por outros autores. Oliveira *et al.* (2013) catalogaram 25 estudos sobre a erosividade no Brasil, a partir de dados pluviométricos com valores que variaram de 1.672 a  $22.452 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Mello *et al.* (2015) apontam que a região do sul do Brasil apresentou valores de  $8.000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Trindade *et al.* (2016) demonstram para a porção da BHRSM valores entre 6.000 e  $10.000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Acredita-se que os elevados valores de erosividade observados na pesquisa estejam associados à intensificação dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), descritos por Sanches *et al.* (2019). De acordo com os autores, o aumento na frequência desses sistemas está associado aos efeitos das mudanças ambientais ocorridas na Amazônia, manifestadas na porção sudeste da América do Sul nas últimas três décadas.

Quando comparado a estudos com maior detalhe, ou seja, com municípios do RS, o valor médio de erosividade anual da BHRSM ainda é maior: em relação à Quaraí ( $9.292 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ), estimada por Bazzano *et al.* (2007); para Uruguaiana ( $8.875 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ), por Hickmann *et al.* (2008); Ijuí ( $8.825 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ), estimada por Cassol *et al.* (2007); e para São Borja ( $9.751 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), por Cassol *et al.* (2008). O valor de erosividade encontrado para Santa Rosa ( $11.217 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ) por Mazurana *et al.* (2009) se aproxima do encontrado para a BHRSM.

Houve uma variação de erosividade média anual entre  $4.714 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  (ano de 1989) e  $24.868,89 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  (ano de 2002). Destaca-se a influência de El Niño e La Niña nos valores de precipitação e, conseqüentemente, nos dados erosivos. De Paula *et al.* (2010, p.1317) ressaltam a importância de “associar índices de erosividade das chuvas com o ENOS, o que pode auxiliar na determinação das épocas de preparo e outras práticas de manejo do solo, visando minimizar os impactos negativos da variabilidade climática sobre a conservação do solo”. Observou-se que os anos de El Niño estão ligados à maioria dos valores mais altos de erosividade na BHRSM, com exceção dos anos de 2017 e 2018, embora De Paula *et al.* (2010) destaquem que os anos neutros, sem ocorrência de El Niño e La Niña, por terem o acumulado de precipitação menor, podem apresentar valores extremos superiores aos anos com El Niño.

Novamente, os elevados valores de erosividade observados, sejam aqueles identificados em anos de El Niño ou em anos neutros, podem estar associados à maior participação dos CCM sobre a região de estudo. Os trabalhos de Viana *et al.* (2009), Moraes e Aquino (2018), Lima *et al.* (2018) e Sanches *et al.* (2019) descrevem que tais sistemas são responsáveis por eventos pluviométricos intensos durante as estações da primavera, verão e outono, e que suas ocorrências não dependem diretamente das fases do fenômeno ENOS.

O contexto de tendências observadas de aumento de erosividade anual para a década de 2008 a 2019 - com exceção da EM Ponte Toropi II (2954032) - para a erosividade média mensal

(exceção da estação de inverno) e o fato de toda a área da BHRSM ter o índice de erosividade anual classificado, de acordo com Santos (2008), como muito forte, indica a possibilidade de continuidade ou aumento da erosão hídrica para a área de estudo se o manejo do solo não for eficaz. Para o futuro, Almagro *et al.* (2017), em um estudo em todo o Brasil, estimam um índice de erosividade média anual na região da BHRSM acima de 12.000 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> de acordo com o RCP<sup>3</sup> 8.5, modelo HadGEM2-ES<sup>4</sup>, e acima de 14.000 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> de acordo com o RCP 8.5, modelo MIROC5<sup>5</sup> para os anos de 2071 a 2099.

Nessa perspectiva, enfatiza-se a importância de conhecer o tempo de retorno das chuvas erosivas e de saber se cada vez se tornarão mais recorrentes. Cassol *et al.* (2008) destacam que os dados de período de retorno e probabilidade de ocorrência da erosividade anual das chuvas permitem estimar quando haverá maior perda de solos em uma determinada área. Os resultados encontrados para o tempo de retorno e probabilidade de ocorrência da erosividade média anual são similares aos de municípios próximos da BHRSM. Para São Borja (RS), Cassol *et al.* (2008) indicam que o maior valor anual, que é de 23.088 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, tem um período de retorno de aproximadamente 49 anos e uma probabilidade de ocorrência de 2%. No que se refere à menor erosividade anual do período de estudo (3.166 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), tem-se um período de retorno de um ano e 98% de probabilidade de ocorrência.

O mês de abril concentra a maior erosividade média mensal da BHRSM, período que corresponde à colheita da cultura de soja, momento no qual pode haver maior perda de solos, visto que, sem cobertura vegetal, haverá maior impacto direto das gotas sobre a superfície do solo e maior capacidade de escoamento superficial. Ademais, vários meses que são importantes para o plantio, desenvolvimento e colheita da soja apresentaram tendências significativas de aumento de erosividade na década de 2008 a 2019 (*e.g.* outubro, janeiro, março, abril e maio). Conforme exposto no artigo, a questão da erosão linear e profunda é marcante na BHRSM e possivelmente tem relação com a erosividade. Santana *et al.* (2007), para a bacia hidrográfica do alto rio Araguaia, relacionaram a presença de focos erosivos com diversos fatores, sendo que a erosividade é um dos com maior correlação.

Nesse viés, Cassol *et al.* (2008) destacam que 76% da erosividade anual se concentra nos períodos entre outubro a abril, meses de plantio, crescimento e colheita das culturas de verão em São Borja (RS). Por sua vez, Bazzano *et al.* (2007) destacam que o período de outubro a maio concentra 85,4 % da erosividade anual em Quaraí (RS). Para a BHRSM, verificou-se que 65% da erosividade anual também se concentra entre outubro a abril e 73% no período de outubro a maio. Sendo assim, manifesta-se a necessidade de monitoramento nos próximos anos, principalmente diante da expansão da cultura de soja na região. Nesse viés, Kuplich *et al.* (2018) mostram que a área com cultivo de soja no bioma pampa, entre os anos 2000 e 2015, aumentou 188,5%. Diante dessa transição de culturas que se observa na BHRSM, é fundamental estabelecer estratégias de monitoramento e estabilização dos processos erosivos.

Para o plantio do arroz, a alta erosividade da chuva contribui para a recarga de áreas úmidas e os rios para a irrigação das plantações, principalmente no mês de outubro. Ressalta-se que nas porções de plantio de arroz, em solos hidromórficos, a presença de erosão hídrica não é significativa, por serem áreas de relevo plano. Por outro lado, o aumento da erosividade na BHRSM pode alterar o ciclo hidrológico e de sedimentação, podendo ocorrer degradação nessas porções mais úmidas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como principal resultado do estudo, destaca-se a relação encontrada entre a erosão linear já documentada para os municípios de Rosário do Sul, Cacequi e São Gabriel, porções norte e central

---

<sup>3</sup> Representative Concentration Pathway

<sup>4</sup> Hadley Center Global Environment Model version 2 (HadGEM2-ES)

<sup>5</sup> Model for Interdisciplinary Research On Climate version 5 (MIROC5)

da BHRSM, e os valores de erosividade anual, além da concentração de valores “muito forte”, mais significativos para essas porções. Sobretudo, destaca-se que não somente no norte da BHRSM, mas em toda a sua extensão, há predominância de valores de erosividade classificados como “muito forte”, com um período de retorno de 1,8 anos e 54% de probabilidade de ocorrência, o que certamente contribui para o desenvolvimento da erosão linear.

Neste estudo, foram apresentados os mapas de erosividade média anual e mensal para a BHRSM. Destaca-se que a obtenção dessa espacialização é fundamental para a aplicação de métodos preditivos de perda do solo, tal como a EUPS (Equação Universal de Perda de Solos). Os mapas de erosividade são fundamentais para a adoção de práticas conservacionistas para minimizar a erosão do solo. Diante dos valores de tendência de erosividade mais elevados encontrados para a última década (2008 a 2019) em 6 das 7 EM e do indicativo de continuidade, já que projeções futuras indicam que a erosividade média anual para a porção da BHRSM deve aumentar para  $14.000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , faz-se necessária a continuidade do monitoramento na BHRSM.

Destaca-se que o ambiente possui uma série de interconexões, então a análise de uma bacia hidrográfica deve levar em conta dados ambientais variados, que envolvem aspectos geológicos, geomorfológicos e pedológicos, a interferência antrópica e dados climáticos. Compõem-se, assim, um banco de dados importante para garantir o conhecimento dos padrões de precipitação da área e para se pensar em estratégias de estabilização dos processos erosivos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (processo 19/2551-0001234-9).

## REFERÊNCIAS

ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P.T. S.; NEARING, M. A.; HAGEMANN, S. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Nature - Scientific Reports**, n. 7, p. 1-12, 2017.

ANACHE, J. A. A.; FLANAGAN, D. C.; SRIVASTAVA, A.; WENDLAND, E. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. **Science of The Total Environment**, n. 622–623, p. 140-151, 2018.

ANGULO-MARTÍNEZ, M.; BEGUERÍA, S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). **Journal of Hydrology**, n. 379, p. 111–121, 2009.

ANDRADE, A. F.; MACHADO, R. L.; REZENDE, C. C.; FERREIRA, E. A.; ÁGUAS, M; A; CORRECHEL, V.; CARVALHO, D. F. Precipitation Patterns and Rainfall Erosivity Return Period Under Savanna Conditions in Formosa, Goiás, Brazil. **Journal of Agricultural Studies**, v. 8, n. 4, p. 554-569, 2020.

BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Erosivity, rainfall coefficient and patterns and return period in Quaraí, RS, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 31, p. 1205–1217, 2007.

BACK, A. J.; OLIVEIRA, J. L. R.; HENN, A. Duration-frequency relationships of heavy rainfall in Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 36, p. 1015-1022, 2012.

BEYENE, T. D.; MOGES, M. A.; TILAHUN, S. A. Development of Rainfall Disaggregation Model in the Awash River Basin, Ethiopia. In: ZIMALE, F.; ENKU, N. T.; FANTA, S. (eds). International Conference on Advances of Science and Technology. **Springer Nature Switzerland**, p. 50-64, 2018.

BIASUTTI, M.; SEAGER, R. Projected changes in US rainfall erosivity. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 19, p. 2945-2961, 2015.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; FLEISCHER, L. R.; LUGATO, E.; BALLABIO, C.; ALEWELL, C.; MEUSBURGER, K.; MODUGNO, S.; SCHUTT, B.; FERRO, V.; BAGARELLO, V.; OOST, K.V.; MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nature**, n. 8, p. 1-13, 2017.

CABRAL, T. L.; NUMMER, A. V.; BATEIRA, C. V. de M. Indicadores morfométricos como suporte para a classificação de voçorocas em sub-bacias hidrográficas no município de Cacequi, RS. **Revista Brasileira Geomorfologia**, v.21, n.1, p.139-154, 2020.

CASSOL, E. A.; ELTZ, F. L. F.; MARTIN, D.; LEMOS, A. M.; LIMA, V. S.; BUENO, A. C. Erosivity, hydrological patterns, return period and probability of occurrence of rainfalls at São Borja, RS, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 32, p. 1239–1251, 2008.

CASSOL, E. A.; MARTINS, D.; ELTZ, F. L. F.; LIMA, V. S.; BUENO, A. C. Erosivity and hydrological patterns of Ijuí (RS, Brazil) rainfalls in the period of 1963 to 1993. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, n. 15, p. 220–231, 2007.

COLMAN, C. B.; OLIVEIRA, P. T. S.; ALMAGRO, A.; SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, D. B. B. Effects of Climate and Land-Cover Changes on Soil Erosion in Brazilian Pantanal. **Sustainability**, n. 11, p. 1-16, 2019.

DA SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; DA COSTA SILVA, J. F.C. B.; BRASIL NETO, R. M. Spatial distribution and estimation of rainfall trends and erosivity in the Epitácio Pessoa reservoir catchment, Paraíba, Brazil. **Natural Hazards**, n. 102, p. 829–849, 2020.

DE PAULA, G. M.; STRECK, N. A.; ZANON, A. J.; ELTZ, F. L. F.; HELDWEIN, A. B.; FERRAZ, S. E. T. Influência do fenômeno El Niño na erosividade das chuvas na região de Santa Maria (RS). **Revista Brasileira Ciências do Solo**, n. 34 (4), p. 1315-1323, 2010.

FAVIS-MORTLOCK, D. T.; GUERRA, A. J. T. The implications of general circulation model estimates of rainfall for future erosion: a case study from Brazil. **CATENA**, n. 37, p. 329-354, 1999.

FLORENTIM, E. T. S.; CORREA, H. C. R.; MONTEIRO, F. N.; FALCÃO, K. S.; PANACHUKI, E. Espacialização da erosividade mensal e anual da chuva na bacia hidrográfica do Córrego Fundo, Aquidauana-MS. **Research Society and Development**, n. 10, p. 1, 2021.

GONÇALVES, F. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S. Índices e espacialização da erosividade das chuvas para o Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, n. 10, p. 269-76, 2006.

GUPTA, S.; KUMAR, S. Simulating climate change impact on soil erosion using RUSLE model– a case study in a watershed of mid-Himalayan landscape. **Journal of Earth System Science**, n. 126, p. 1-20, 2017.

HICKMANN, C.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A.; COGO, C. M. Rainfall erosivity in Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Brazil from 1963 to 1991 determined by the EI30 index. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 32, p. 825–831, 2008.

HINKLE D. E.; WIERSMA W.; JURS S. G. **Applied Statistics for the Behavioral Sciences**. 5 ed. Boston: Houghton Mifflin. 2003.

HOOMEHR, S.; SCHWARTZ, J. S.; YODER, D. C. Potential changes in rainfall erosivity under GCM climate change scenarios for the southern Appalachian region, USA. **CATENA**, n. 136, p. 141-151, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Projeto RADAMBRASIL**. Levantamento de recursos naturais (Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim). 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1986.

KLIK, A.; EITZINGER, J. Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria. **Journal of Agricultural Science**, n. 148, p. 529-541, 2010.

KUPLICH, T. M.; CAPOANE, V.; COSTA, L. F. F. O avanço da soja no Bioma Pampa. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 31, p. 83-100, 2018.

LIMA, K. B.; AQUINO, F.E.; MORAES, F. D. S. Impactos gerados por dois Complexos Convectivos de Mesoescala de diferentes extensões no Sul do Brasil. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 186, 2018.

MA, X.; XU, J.; NOORDWIJK, M. V. Sensitivity of streamflow from a Himalayan catchment to plausible changes in land-cover and climate. **Hydrological processes**, n. 24, 2010.

MAZURANA, J.; CASSOL, E. A.; SANTOS, L. C.; ELTZ, F. L. F.; BUENO, A. C. Erosivity, hydrological patterns and return period of erosive rainfalls at Santa Rosa, RS — Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 13, p. 975–983, 2009.

MELLO, C. R.; ÁVILA, L. F.; VIOLA, M. R.; CURI, N.; NORTON, L. D. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, n. 73, p. 8683–8698, 2015.

MORAES, F. D. S.; AQUINO, F.E. Desastres no Rio Grande do Sul associados a Complexos Convectivos de Mesoescala: estudo de caso do evento que ocorreu entre 22 e 23 de abril de 2011. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 111, 2018.

MORE. Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC: Rexlab, 2013. Disponível em: <http://www.more.ufsc.br/>. Acesso em: 15 jan. 2022.

MONDAL, A.; KHARE, D.; KUNDU, S. Change in rainfall erosivity in the past and future due to climate change in the central part of India. **International Soil and Water Conservation Research**, n. 4, p. 186-194, 2016.

MULLAN, D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. **CATENA**, n. 109, 2013.

NEARING, M. A. Potential changes in rainfall erosivity in the U.S. with climate change during the 21st century. **Journal of Soil and Water Conservation**, n. 56, p. 229-232, 2001.

NEARING, M. A.; JETTEN, V.; BAFFAUT, C.; CERDAN, O.; COUTURIER, A.; HERNANDEZ, M.; LE, Y.; BISSONNAIS, M. H.; NICHOLS, J. P.; NUNES, C. S.; RENSCHLER, V.; SOUCHERE, K. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. **CATENA**, v. 61, p. 131-154, 2005.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **CATENA**, n. 100, p. 139-147, 2013.

PANAGOS, P.; BALLABIO, C.; MEUSBURGER, K.; SPINONI, J.; ALEWELL, C.; BORRELLI, P. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. **Journal of Hydrology**, n. 548, p. 251-262, 2017.

PLANGOEN, P.; BABEL, M. S. Projected Rainfall Erosivity Changes under Future Climate in the Upper Nan Watershed, Thailand. **Journal of Earth Science & Climate Change**, n. 5, p. 1-7, 2014.

PEREIRA, S. B.; NOIA, C. P. Z.; ALMEIDA, R. A.; COELHO, C. D. Methodology adjustment and determination of the intensity, duration and frequency equations of maximum rainfall for the state of Mato Grosso do Sul. **Revista de Engenharia Agrícola**, n. 34, p. 716-726, 2014.

PRUSKI, F. F.; NEARING, M. A. Runoff and soil loss changes expected for changes in precipitation patterns under global climate change. **Journal of Soil and Water Conservation**, n. 57, p. 7-16, 2002.

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. **Revista Georaguaia**, v. 8, n. 2, p. 32-48, 2018.

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. Relação do substrato litológico com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017, p. 6545-49.

RENARD, K. G.; FREIMUND, J. R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. **Journal of Hydrology**, n. 157, p. 287-306, 1994.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **Agriculture Handbook**, 703. USDA, Washington, 1997.

RIGHI, E.; BASSO, L. A. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. **Ambiência Guarapuava (PR)**, v.12, n.1 p. 101-117, 2016.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKZIEGEL, E. W.; VERDUM, R.; de NARDIN, D. Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n.2, p.11-23, 2010.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; LAURENT, F.; SCCOTI, A. A. V. Zoneamento morfolitológico da bacia hidrográfica do rio Ibicuí e sua relação com processos superficiais e o uso do solo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 1, p. 63-77, 2015.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011. 240p.

RUFINO, R. L.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná através da pluviometria: terceira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 17, p. 439–444, 1993.

SANCHES, F.; VERDUM, R.; FISCH, G.; GASS, S. L. B.; ROCHA, V. M. Extreme rainfall events in the Southwest of Rio Grande do Sul (Brazil) and its association with the Sandization process. **American Journal of Climate Change**, v. 08, p. 441-453, 2019.

SANTANA, N. M. P.; CASTRO, S. S. de; STONE, L. F.; SILVA da S. C. Chuvas, erosividade, erodibilidade, uso do solo e suas relações com focos erosivos lineares na alta bacia do rio Araguaia. **Sociedade & Natureza**. v. 19, n. 2, 2007.

SANTOS, C. N. **El Niño, La Niña e a erosividade das chuvas no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, 2008.

SANTOS NETO, J. R. dos; CHRISTOFARO, C. Erosividade da chuva na bacia hidrográfica do rio Araçuaí-MG. **Boletim de Geografia (UEM)**, v. 37, n. 3, p. 40-50, 2020.

SCHWAB, G. O.; FREVERT, R. K.; EDMISTER, T. W.; BARNES, K. K. **Soil and water Conservation Engineering**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1981.

SCCOTI, A. A. V. **Estudo e zoneamento geoambiental com auxílio de sig na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria: sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 153p.

SEGURA, C.; SUN, G.; MCNULTY, S.; ZHANG, Y. Potential impacts of climate change on soil erosion vulnerability across the conterminous United States. **Journal of Soil and Water Conservation**, n. 69, 2014.

SHIONO, T.; OGAWA, S.; MIYAMOTO, T.; KAMEYAMA, K. Expected impacts of climate change on rainfall erosivity of farmlands in Japan. **Ecological Engineering**, n. 61, p. 678-689, 2013.

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

SILVA, L. C. N.; LUCHIARI, A.; PASSOS e CARVALHO, M. Potencial erosivo da chuva na bacia hidrográfica do Córrego Baguaçu no estado de São Paulo. **Geosul**, v. 32, n. 64, p. 152–164, 2017.

SILVA NETO, V. L.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; SILVA, D. D.; GIONGO, M. V. Precipitação máxima provável no estado do Tocantins: primeira aproximação pelo método estatístico de Hershfield. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 660-679, 2020.

TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. R. S.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 51 (12), p. 1918-1928, 2016.

VIANA, D. R.; AQUINO, F. E.; BURGOBRAGA, R.; FERREIRA, N. J. Mesoscale convective complexes in Rio Grande do Sul between October and December of 2003 and associated precipitation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 276-291, 2009.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. **Agriculture Handbook**. No. 537. USDA/Science and Education Administration, U.S. Govt. Printing Office, Washington, 1978.

WILLIAMS, J.; NEARING, M. A.; NICKS, A.; SKIDMORE, E. Using soil erosion models for global change studies. **Journal of Soil and Water Conservation**, n. 51, 1996.

ZHANG, Y. G.; NEARING, M. A.; ZHANG, X. C.; XIE, Y.; WEI, H. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China. **Journal of Hydrology**, n. 384, p. 97-106, 2010.

ZHANG, Y.; SU, F.; HAO, Z.; XU, C.; YU, Z.; WANG, L.; TONG, K. Impact of projected climate change on the hydrology in the headwaters of the Yellow River basin. **Hydrological processes**, n. 29, p. 4379-4397, 2015.

ZHANG, X. C.; NEARING, M. A. Impact of climate change on soil erosion, runoff and wheat productivity in central Oklahoma. **CATENA**, n. 61, 2005.

ZHANG, X. C. A comparison of explicit and implicit spatial downscaling of GCM output for soil erosion and crop production assessments. **Climate Change**, n. 84, p. 185-195, 2007.

ZHU, G.; TANG, Z.; SHANGGUAN, Z.; PENG, C.; DENG, L. Factors affecting the spatial and temporal variations in soil erodibility of China. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, n. 124, p. 737-749, 2019a.

ZHU, Q.; YANG, X.; JI, F.; LIU, D. L.; YU, Q. Extreme rainfall, rainfall erosivity, and hillslope erosion in Australian Alpine region and their future changes. **International Journal of Climatology**, n. 40, p. 1-15, 2019b.



---

#### Informações sobre a Licença

Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.

#### License Information

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which allows for unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, as long as the original work is properly cited.