

ÍNDICE DE EROSIVIDADE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DO LOBO SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Gabriela Leite Neves¹; Phelipe da Silva Anjinho²; Mariana Abibi Guimarães Araujo Barbosa³; Allita Rezende dos Santos⁴; Denise Parizotto⁵; Thiago Alves dos Santos⁶, & Frederico Fabio Mauad⁷

ABSTRACT – Soil conservation is fundamental for water, food and energy security, however this resource is under pressure due to anthropic activities. Soil loss by water erosion can be indirectly quantified by calculating the Factor R, annual erosivity. Since rainfall directly affects the process, this study aims to assess erosivity in the Lobo Stream River Basin under different climate change scenarios, until the year 2100. The Factor R estimate is the sum of the monthly erosivities (Elm), which are calculated from historical rainfall data referring to the basin. Rainfall scenarios are +10%, -10% and historical trend, from 5 station's data series. For Elm values of each station, in the current period, the results encompass a range between 173.27 and 1063.97 MJ.mm/ano.ha.h, respectively in August and January, pointing to a more expressive occurrence in rainy months. There is a variation in the Elm's scenarios result, however, the trend scenario shows the most significant impact, with a maximum variation of up to +468%. The Factor R results, in the current period, encompass a range between 6262.48 and 7074.24 MJ.mm/year.h.h, with an average of 6629.67 MJ.mm/ano.ha.h, being classified as moderate to strong erosivity. The scenarios result of Factor R also evidence the impact of trend scenario, in which there is an increase of up to 58%. The spatialized result highlights a gradual increase in the Factor R over the simulated periods and the most significant effect of trend scenario. More, the interpolated values show the most extreme impact in the southern region, where erosivity becomes very strong. This methodology made it possible to assess the effects of climatic changes in water erosion and showed how the increase in precipitation, in +10% and trend scenarios, may impact the monthly and annual erosivity rates and consequent soil loss in the basin, compromising this resource.

Palavras-Chave – erosão; PGECLIMA_R; cenários futuros.

1) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: gabriela.leiteneves@usp.br, (16) 3371 – 8255

2) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: phelipe.anjinho@usp.br, (16) 3371 – 8255

3) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: mariana.abibi@usp.br, (16) 3371 – 8255

4) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: allita@usp.br, (16) 3371 – 8255

5) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: deniseparizotto@usp.br, (16) 3371 – 8255

6) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: thiagokado@hotmail.com, (16) 3371 – 8255

7) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: maudffm@sc.usp.br, (16) 3371 – 8255

1 - INTRODUÇÃO

Os serviços e produtos oferecidos pelo recurso natural solo são fundamentais para a vida e para a manutenção dos ecossistemas. No entanto, devido ao aumento da população e das atividades humanas e, conseqüentemente, da demanda desse recurso, os solos vêm apresentando condições críticas, o que coloca em risco a segurança alimentar, hídrica e energética (FAO, 2015).

Uma das principais causas da degradação do solo é a erosão hídrica, que ocorre pela ação do escoamento superficial proveniente da água da chuva, que pode provocar a desagregação, transporte e deposição de partículas do solo (Dechen *et al.*, 2015).

Nesse sentido, métodos indiretos são utilizados para quantificar a ação dos fatores que atuam na perda de solo por erosão hídrica. A capacidade da precipitação pluvial (PREC) em provocar erosão é dada como erosividade. Esta é representada pelo Fator R, que juntamente com Fator K (erodibilidade), Fator LS (fator topográfico), Fator C (cobertura vegetal) e Fator P (práticas conservacionistas), compõe a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) ou Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier; Smith, 1978), a qual foi ajustada ao cenário brasileiro por Bertoni e Lombardi Neto (1999).

A PREC e qualquer alteração no seu comportamento tem influência direta nos processos erosivos, assim, as mudanças climáticas e seus efeitos sobre os padrões no regime pluviométrico poderão impactar diretamente a erosividade, podendo aumentar a erosão hídrica e as taxas de perdas de solo (Mondal *et al.*, 2016). Alterações na erosividade causadas pelas mudanças climáticas no Brasil foram analisadas para cenários futuros (Lelis *et al.*, 2011; Netto *et al.*, 2018).

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Lobo (BHRL) é importante para a região centro-leste do estado de São Paulo, principalmente por ter em sua formação o reservatório do Lobo (Broa) que, além de fornecer energia elétrica, é utilizado pela população para recreação, turismo e pesca. Com as alterações na PREC previstas para o futuro, o cenário de degradação do solo da BHRL poderá se tornar crítico e comprometer os serviços oferecidos pelo mesmo. Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a erosividade da BHRL sob cenários de mudanças climáticas, considerando alterações na PREC até o ano de 2100.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Área de estudo

A BHRL possui área total de aproximadamente 227,7 km² e está localizada entre os municípios de Brotas, Itirapina e São Carlos, no estado de São Paulo (Figura 1). O clima da área de estudo, baseado na classificação de Köppen, é o Cwa, que é caracterizado por um clima subtropical úmido,

com inverno seco e verão quente. A PREC acumulada média anual varia de 1300 a 1500 mm, com maior frequência e volume ocorrendo durante a temporada de verão (Alvares *et al.*, 2013).

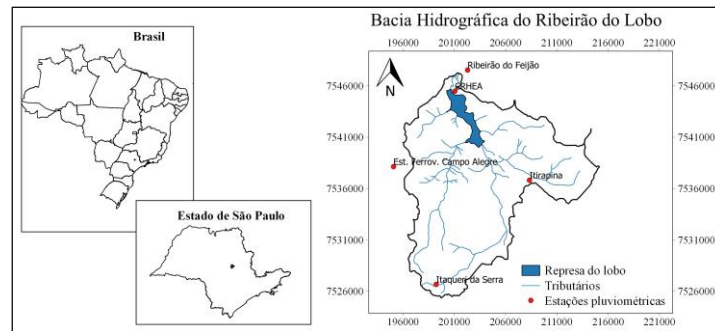


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do ribeirão do Lobo. Fonte: elaborado pelo autor.

2.2 - Estimativa da Erosividade da chuva – Fator R

Para o cálculo do fator R foram utilizados dados diários de PREC obtidos pelo Sistema de Informações HidroWeb, da Agência Nacional das Águas- ANA e, também, pela Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais da Universidade de São Paulo (CRHEA/USP) (Figura 1).

A estimativa da erosividade mensal pode ser feita indiretamente por meio de equações de regressões que correlacionam o índice mensal de erosão (Elm) aos dados pluviométricos. Assim, nesse estudo, utilizou-se a equação de regressão ajustada por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) para região de Campinas (Equação 1).

$$Elm = 68,730 * \left(\frac{p^2}{P}\right)^{0,841} \quad (1)$$

Onde: Elm = Índice mensal de erosividade (MJ mm / ano ha h); p = PREC média mensal (mm); P = PREC média anual (mm).

O fator de erosividade anual, Fator R, foi calculado através da soma dos valores mensais do índice de erosividade, conforme a equação 2.

$$R = \sum_{j=1}^n Elm \quad (2)$$

2.3 - Cenários futuros

Para a simulação dos dados climáticos, utilizou-se o gerador estocástico PGeCLIMA_R (Virgens Filho *et al.*, 2013), que por meio do downscaling estatístico, é capaz de produzir séries sintéticas de dados com base nos padrões estatísticos de séries de dados históricos. A metodologia utilizada, nesse estudo considerou o período de 1988 a 2017 como período base para a parametrização mensal das distribuições estatísticas da série, utilizando a distribuição gama para os dados de PREC.

Para a simulação da PREC, utilizou-se as cinco séries de estações pluviométricas e considerou-se três cenários. No primeiro cenário, projetou-se um aumento de 10% na PREC histórica; no

segundo cenário, uma redução de 10% na PREC histórica e no terceiro cenário, levou-se em consideração a tendência histórica na variável PREC. O período simulado foi de 2018 a 2100, sendo que para melhor análise, o mesmo foi separado em três subperíodos: 2018 a 2045, 2046 a 2075 e 2076 a 2100. A magnitude das tendências foi obtida por meio da técnica de regressão linear aplicada aos dados históricos (Neves et al., 2020), na qual o coeficiente angular obtido para cada mês foi multiplicado por 83, representando a alteração projetada para 83 anos.

A partir dos dados simulados, os valores do Eim e do Fator R foram estimados para os futuros cenários, levando em consideração as alterações na PREC, e espacializados para a BHRL por meio da técnica de interpolação IDW, realizada no software ArcGIS 10.3.1.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de Elm(s) estimados para cada estação pluviométrica e período estão apresentados na figura 2. Observa-se que em geral, para o período atual, o Elm variou de 173,27 MJ mm/ano ha h para a estação CRHEA no mês de agosto a 1063,97 MJ mm/ano ha h para a estação de Itaqueri da Serra no mês de janeiro. Os menores valores do Elm ocorrem entre os meses de junho a agosto, onde a PREC é menor e os maiores valores do Elm ocorrem nos meses de novembro a fevereiro, onde a PREC é maior.

Verifica-se que, em média, para todas as estações pluviométricas, os meses chuvosos, entre outubro a março são responsáveis por aproximadamente 70% do índice anual de erosividade, sendo que os meses correspondentes ao período seco, abril a setembro, são responsáveis por 36% do índice anual de erosividade da BHRL. Resultados semelhantes foram observados em outras localidades do estado de São Paulo por pesquisadores que também identificaram que há maior perda de solo por erosão entre os meses de outubro e março (Michette, 2015; Silva et al., 2017).

Analisando os cenários futuros, observa-se que os valores simulados de PREC foram responsáveis tanto pelo aumento quanto pela redução nos Elm(s). Considerando todas as estações pluviométricas, observa-se que, no cenário de aumento de 10%, as alterações nos Elm(s) variaram de -47% a 87% em relação ao período histórico (1988 a 2017). No cenário de redução de 10%, as alterações variaram de -57% a 103% e no cenário de tendência, as alterações variaram de -100% a 468%.

É importante destacar que, apesar de ocorrer reduções nos Elm(s), o cenário de aumento de 10% na PREC apresentou aumentos nos Elm(s) para a maioria dos meses, sendo que os meses de janeiro, fevereiro e dezembro, os quais colaboram de forma efetiva para erosão, sofreram aumentos em todas as estações pluviométricas e na maioria dos períodos simulados.

No cenário de tendência, nota-se que os aumentos nos Elm(s) ocorreram de forma acentuada nos meses de maio e junho em todas as estações pluviométricas e em todos os períodos simulados.

Tal fato é consequência da alteração mensal encontrada na tendência dos dados históricos, em que esses meses apresentaram tendência de aumento na PREC (Neves et al., 2020). No entanto, observa-se também que houve aumentos nos meses de dezembro e janeiro. De qualquer maneira, o cenário de tendência é o mais preocupante já que causou maiores aumentos dos Elm(s) em comparação ao cenário de aumento de 10%. Os aumentos dos Elm(s) ficam evidentes em todas as estações, sendo mais drásticos no último período simulado, de 2076 a 2100.



Figura 2 – Valores dos Elm(s) estimados para o período atual e para os cenários futuros.

Considerando o fator R, que representa o índice anual de erosividade, nota-se que para o período atual, os valores variaram de 6262.48 MJ mm/ano ha h para a estação CRHEA a 7074.24 MJ mm/ano ha h para a estação Fer. Campo Alegre (Tabela 1). A BHRL apresentou em média um fator R de 6629.67 MJ mm/ano ha h, valor menor do que o obtido por Michette (2015) na BHRL para o período de 1979 a 1999, que foi de 7930.90 MJ mm/ano ha h. Os valores encontrados nesse estudo também tiveram abaixo dos valores obtidos, para a BHRL, pelo programa Neterosividade, que indica 7685 MJ mm/ano ha h para o município de Itirapina e 7497 MJ mm/ano ha h para o município de Brotas, pertencentes a BHRL. De acordo com a classificação proposta por Carvalho (2008), a BHRL apresenta para o período atual, uma erosividade moderada a forte.

O cenário de aumento de 10% foi responsável por alterações no fator R que variaram de -2% no primeiro período simulado, de 2018 a 2045, a um aumento de 12% no último período simulado, de 2076 a 2100, em relação ao período histórico. O cenário de redução de 10% foi responsável por alterações que variaram de -9% nos períodos de 2046 a 2075 e 2076 a 2100 a um aumento de 4% no primeiro período simulado. Já o cenário de tendência foi responsável por alterações de -10% no segundo período, 2046 a 2075, a 58% no último período simulado. Em relação ao último período simulado, nota-se o aumento do fator R em todas as estações pluviométricas, sendo que o cenário de tendência foi responsável pelos maiores aumentos, com exceção das estações Itirapina e Ribeirão do Feijão, onde o cenário de aumento de 10% causou maiores aumentos do fator R (Tabela 1).

Tabela 1: Valores estimados do Fator R para as estações, períodos e cenários simulados.

	CRHEA	ESTAÇÃO FER. CAMPO ALEGRE	ITAQUERI DA SERRA	ITIRAPINA	RIBEIRÃO DO FEIJÃO	
Atual	6262.48	7074.24	6908.68	6481.18	6421.78	
2018 - 2045	10%	6553.39	6898.57	7102.83	6764.10	6807.01
	-10%	6367.15	6848.93	7145.17	6771.31	6526.07
	Tendência	6697.39	6683.78	6951.72	6385.77	6174.13
2046 - 2075	10%	6680.68	7180.50	7501.93	7034.93	6857.84
	-10%	6203.71	6459.35	6857.74	6286.60	6348.07
	Tendência	8013.36	7052.04	8512.66	6124.45	5748.82
2076 - 2100	10%	6832.29	7700.03	7496.56	7281.80	6921.60
	-10%	5906.72	6434.96	6629.57	6477.47	6205.19
	Tendência	9521.06	8436.93	10908.72	6780.16	6057.92

Os resultados da interpolação do Fator R são mostrados na figura 3. Nota-se que para o período atual, os índices variam de 6262,49 MJ mm/ano ha h a 7035,66 MJ mm/ano ha h, sendo que a região norte da BHRL, próxima ao reservatório do Lobo, apresenta índices menores e a região ao sul, adjacente a Serra de Itaqueri, índices maiores. Segundo Carvalho (2008), os valores obtidos ainda representam uma erosividade moderada a forte.

As alterações na PREC ocorrem de forma gradual ao longo dos períodos simulados, atingindo os valores máximos projetados (aumento de 10%, redução de 10% e tendência) no final do ano de 2100, onde as alterações no fator R são mais extremas.

Observa-se que para o cenário de aumento de 10% na PREC, os índices variam de 6553,4 MJ mm/ano ha h a 7659,16 MJ mm/ano ha h. Nota-se que os índices aumentaram para toda a BHRL, no entanto, os valores da região sul da bacia, para os dois últimos períodos simulados indicam uma Erosividade forte.

No cenário de redução de 10%, os índices variaram de 5906,74 MJ mm/ano ha h a 7145,17 MJ mm/ano ha h. A redução na PREC foi responsável pela redução do fator R em toda a bacia, sendo que a redução mais evidente ocorreu na região norte da bacia, onde observa-se valores em torno de 5900. Ressalta-se que apesar da redução de 10% na PREC, a Erosividade na BHRL ainda é considerada moderada a forte.

O cenário de tendência gerou índices que variaram de 6124,45 MJ mm/ano ha h a 10908,70 MJ mm/ano ha h. As alterações na PREC nesse cenário foram responsáveis pelo aumento dos índices em toda a BHRL, sendo que os aumentos mais extremos ocorreram também na região sul da bacia. O cenário de tendência foi o cenário mais crítico, gerando valores bem acima dos valores no período histórico. Nos períodos de 2018 a 2045 e de 2046 a 2075 já é possível observar uma Erosividade forte e no último período simulado, de 2076 a 2100, uma Erosividade muito forte, já que os índices atingem valores acima de 9810 MJ mm/ano ha h.

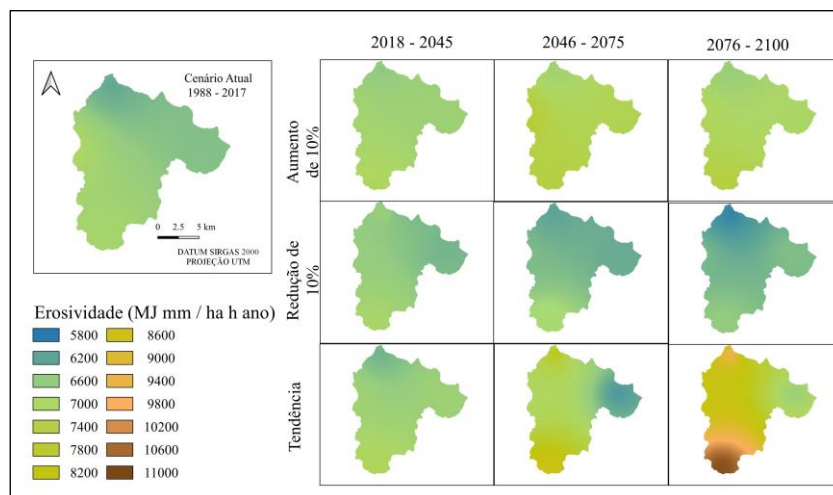


Figura 3 – Valores interpolados do Fator R para o período atual e para os cenários futuros.

4 - CONCLUSÕES

A metodologia utilizada nessa pesquisa possibilitou avaliar os efeitos de diferentes cenários climáticos sobre o potencial erosivo da chuva. Os resultados mostraram que o aumento de 10% na PREC e a alteração baseada na tendência dos dados históricos poderão ser responsáveis pelo aumento dos índices mensais e anuais de erosividade. A BHRL poderá apresentar no futuro uma Erosividade forte, considerando o aumento de 10% na PREC, e até mesmo uma Erosividade muito forte, considerando as alterações locais e mensais na PREC.

As alterações projetadas na erosividade da chuva poderão aumentar a perda de solo até 2100 em toda a área da BHRL, principalmente na região sul, podendo alterar o fornecimento de serviços

ecossistêmicos oriundos do solo. Espera-se que os resultados obtidos nessa pesquisa possam colaborar para o planejamento e uso sustentável dos solos e das águas da BHRL.

AGRADECIMENTOS

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

BIBLIOGRAFIA

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; de MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. (2013). "Köppen's climate classification map for Brazil". *Meteorol Z.* v.22, p. 711–728.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO F. (1999). *Conservação do solo*. São Paulo: Ícone. 4º Ed. 1999. 355p.
- CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrosedimentologia Prática*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 599 p.
- DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARAES, M. de F.; MARIA, I. C. De. (2015). "Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo". *Bragantia*, Campinas, v. 74, n. 2, p. 224-233.
- FAO; ITPS (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 650 p.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; FONSECA, A. S. DA; LIMA, D. C. DE. (2011). "Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários." *Revista Ambiente & Água*, v.6, n.2, p.282-294.
- LOMBARDI NETO, F., MOLDENHAUER, W.C. (1992) "Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP". *Bragantia*, v. 51, p. 189-96.
- MICHETTE, J. F. (2015). "Modelos de previsão de erosão pluvial utilizando SIG: estudo na bacia hidrográfica da Represa do Lobo (Broa), SP". Carlos, 2015. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 275 p.
- MONDAL, A., KHARE, D., KUNDU, S. (2016). "Change in rainfall erosivity in the past and future due to climate change in the central part of India". *Int Soil Water Conserv Res*, v. 4, p.186–194.
- NETTO, C. F.; VIRGENS FILHO, J.S., NEVES, G. L. (2018). "Análise da erosividade da chuva no estado do Paraná e cenários futuros impactados por mudanças climáticas globais". *Revista Brasileira de Climatologia*, v.22, p.404-422.
- NEVES, G. L.; BERUSKI, G. C.; VIRGENS FILHO, J. S.; MAUAD, F. F. (2020). "Variability and Trend of Air Temperature and Rainfall at Ribeirão do Lobo Hydrographic Basin, Brazil". *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, p. 35-48.
- SILVA, L. C. N., LUCHIARI, A., CARVALHO, M. P. (2017). "Potencial erosivo da chuva na bacia hidrográfica do Córrego Baguaçu no Estado de São Paulo". *Geosul*, v. 32, n. 64, p. 152-164.
- VIRGENS FILHO, J. S.; OLIVEIRA, R. B.; LEITE, M. L.; TSUKAHARA, R. Y. (2013). "Desempenho dos modelos CLIGEN, LARS-WG e PGECLIMA_R na simulação de séries diárias de temperatura máxima do ar para localidades do estado do Paraná". *Engenharia Agrícola*, v. 33, n. 3, p. 538-547.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook, 537. USDA, Washington, 58 pp.