

AValiação DA SUSCETIBILIDADE À PERDA DE SOLO EM MARCOS GEODÉSICOS PARA O PASSADO E CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇA CLIMÁTICA

Leonard Niero da Silveira ¹, Víctor Fernandez Nascimento ², Fernanda Casagrande ³, Sergio Florêncio de Souza ⁴ e Jean Pierre Henry Balbaud Ometto ⁵

¹ UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Campus do Vale – Porto Alegre – RS – CEP: 91501-970, leonard.silveira@ufrgs.br; ² UFABC – Universidade Federal do ABC, Avenida dos Estados, 5001 - Bairro Bangu - Santo André, SP, CEP: 09210-580, victor.fernandez@ufabc.edu.br; ³ INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rod. Presidente Dutra km 40, Cachoeira Paulista, SP, 12630-000, fenc10@hotmail.com; ⁴ UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Campus do Vale – Porto Alegre – RS – CEP: 91501-970, sergio.florencio@ufrgs.br e ⁵ INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja - São José dos Campos, SP, 12227-010, jean.ometto@inpe.br.

RESUMO

Os marcos geodésicos (MGs) são essenciais para desenvolver projetos e obras, porém, estão sujeitos à erosão. Neste estudo, foram estimadas a perda de solo nos MGs na região sul do estado de Santa Catarina considerando dados históricos e cenários futuros de mudanças climáticas. Os resultados mostraram que a perda de solo diminuiu de 1985 a 2020, porém, houve um aumento de MGs na classe de perda de solo nula, causado pelo crescimento urbano. Para a maioria dos cenários futuros houve aumento na perda de solo de 2020 a 2100, embora com valores inferiores ao passado. Estes cenários consideraram apenas alterações de precipitação, sendo que a modelagem da mudança da cobertura do solo para o futuro poderia trazer melhorias na análise. Portanto, estudos como este podem ser usados para entender os efeitos das mudanças climáticas nos processos erosivos e apoiar a tomada de decisão para manter e aumentar a rede geodésica.

Palavras-chave — Chuva, Erosão, Solo, Clima, CMIP.

ABSTRACT

Geodetic landmarks (GLs) are essential to develop projects and works, but they are subject to erosion. In this study, soil loss in GLs in the southern region of Santa Catarina state was estimated considering historical data and future climate change scenarios. The results showed that soil loss decreased from 1985 to 2020, however, there was an increase of GLs in the zero soil loss class, caused by urban growth. For most future scenarios there was an increase in soil loss from 2020 to 2100, although with lower values than in the past. These scenarios considered only precipitation changes, and modeling land cover change for the future could bring improvements in the analysis. Therefore, studies like this can be used to understand the effects of climate change on erosion processes and support decision making to maintain and increase the geodetic network.

Key words — Rainfall, Erosion, Soil, Climate, CMIP.

1. INTRODUÇÃO

Marcos Geodésicos (MGs) são importantes para referenciar espacialmente qualquer pesquisa e obra de engenharia, requerendo locais seguros para a sua instalação.

Uma rede geodésica preservada disponibiliza dados de qualidade para o mapeamento de áreas de risco de inundação por exemplo, possibilitando a confecção de mapas mais precisos para criar estratégias mais eficazes de gerenciamento de risco, minimizando os impactos de eventos climáticos extremos sobre a população.

No entanto, vários MGs são antigos e podem não existir mais devido a vários fatores, dentre eles a perda de solo no local onde se encontravam. E para se estimar a perda de solo há vários métodos consagrados na literatura, por exemplo, a *Universal Soil Loss Equation* (USLE) [1] e sua atualização, a *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) [2]. Esta última, considera a energia do impacto das gotas de chuva e a erodibilidade do solo, inclinação do terreno e comprimento da rampa, as classes de uso e cobertura da terra e práticas de conservação [3].

Modelos climáticos também são ferramentas poderosas para avaliar a variabilidade futura da precipitação, apesar de suas limitações. Seus dados podem ser utilizados para estimar a erosão do solo. Portanto, o principal objetivo do estudo é avaliar a perda de solo usando RUSLE para monitorar a suscetibilidade dos MGs à erosão ao longo do tempo. Este estudo foi realizado na região sul do estado de Santa Catarina considerando um período histórico de mais de 30 anos e cenários futuros projetados até o final do século.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O experimento foi conduzido na região sul do estado de Santa Catarina. A região possui um clima mesotérmico úmido com um histórico de inundações catastróficas ao longo dos anos.

As localizações dos MGs da região foram adquiridas da base geodésica nacional do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), totalizando 896 MGs (Figura 1).

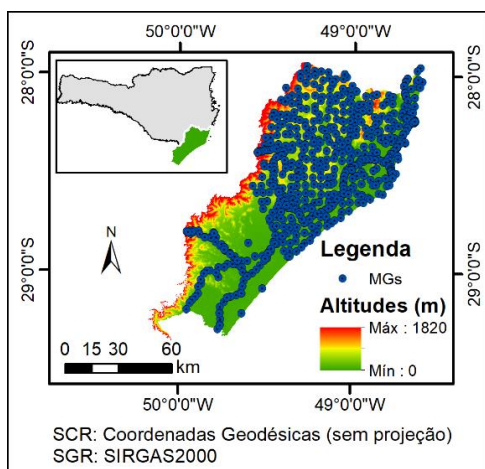


Figura 1. Área de estudo e distribuição dos MGs

2.2. Perda de solo

Para a estimativa de perda de solo (A) nos MGs foi utilizada a equação da RUSLE (1), a qual encontra-se brevemente explicada a seguir. Para informações mais detalhadas sobre os procedimentos e os dados utilizados em cada um dos fatores da equação a seguir consultar o artigo completo deste trabalho em [4].

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

O fator de erosividade da chuva (R) quantifica a energia do impacto das gotas com o solo [1] e é medido em $Mj.mm/ha/hora/ano$. Neste estudo foram utilizados dados de 47 estações pluviométricas, obtidos no portal Hidroweb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>) da Agência Nacional de Águas (ANA).

Vale destacar que o fator R foi estimado tanto para o passado quanto para os cenários futuros. Para o passado foram utilizados os dados de precipitação de 1985 a 2020 para os períodos em torno dos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2020 (R_{per}) e para a média entre 1985 e 2020 ($R_{méd}$). Para o futuro a erosividade da chuva (R_{fut}) foi estimada utilizando projeções climáticas de 32 modelos do CMIP versão 6. Estes dados foram adquiridos junto ao atlas interativo do grupo de trabalho I do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) [5], considerando quatro cenários de forçamento antropogênico (ssp126, ssp245, ssp370 e ssp585) simulados para os períodos 2021-2040, 2041-2060 e 2081-2100. Os ssp consideraram o crescimento populacional e o aumento da temperatura global como resposta à forçante radiativa antropogênica [6].

O fator de erodibilidade do solo (K), dado em $t.hora/Mj/mm$, foi calculado usando os dados de composição do solo presentes no SoilGrids (resolução espacial de 250 m, reamostrado para 30 m), disponíveis no *International Soil Reference and Information Center – World Soil Information (ISRIC/WSI)* [7] de acordo com o estudo de [8].

O fator de comprimento de rampa (L) medido em metros, e o fator de inclinação (S) medido em %, representam a influência do relevo no processo de erosão [9]. Neste estudo os fatores L e S foram calculados usando o Modelo Digital de Elevação (MDE) obtidos a partir da *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, adquirido junto ao *United States Geological Survey Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov>), com resolução espacial de 30 m.

O fator da influência do uso e cobertura da terra no processo erosivo (C) e práticas conservacionistas (P), foi obtido de acordo com as classes disponíveis nos mapas do MapBiomas (<https://brasil.mapbiomas.org>). Sendo que os valores atribuídos de CP para cada classe foram obtidos de diversas referências bibliográficas [10], principalmente os fatores de uso e cobertura do solo, já que não foram identificadas práticas conservacionistas na área de estudo.

Portanto a estimativa anual de perda de solo (A) nos MGs é calculada em $t/ha/ano$ variando apenas os fatores R e CP, usando R_{per} , R_{aver} . Sendo que para os cenários futuros de perdas de solo, apenas as chuvas R_{fut} variavam. A suscetibilidade a perda de solo foram classificadas em cinco classes (Tabela 1) de acordo com o [11].

Intervalo de valores de perda de solo (t/ha/ano) nos MGs	Suscetibilidade
0	Nulo
0 – 10	Baixo
10 – 50	Moderado
50 – 200	Severo
> 200	Muito Severo

Tabela 1. Classificação de perda de solo

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Precipitação e erosividade

A precipitação é um dos fatores que mais contribuem para a perda de solo e normalmente este fator não é levado em consideração ao se instalar os MGs. Os resultados demonstraram que a média histórica pluviométrica para a área de estudo é de 1566 mm/ano, resultando em um fator de erosividade da chuva (R) médio de 7399 $Mj.mm/ha/ano$ (Figura 2a).

Como pode ser observado, uma maior precipitação anual não significa necessariamente uma maior erosividade. Nossos resultados demonstraram que a maior precipitação aconteceu em 2015, enquanto a maior erosividade (R) ocorreu em 2011, isso acontece porque os valores anuais dependem muito da distribuição e intensidade da chuva ao longo do ano. Portanto, para a suscetibilidade à perda de solo a intensidade da chuva é mais relevante do que seu valor total, contudo, neste estudo 82,6% das variações pluviométricas explicaram a erosividade (R), apresentando uma correlação muito forte de 90,9% (Figura 2b).

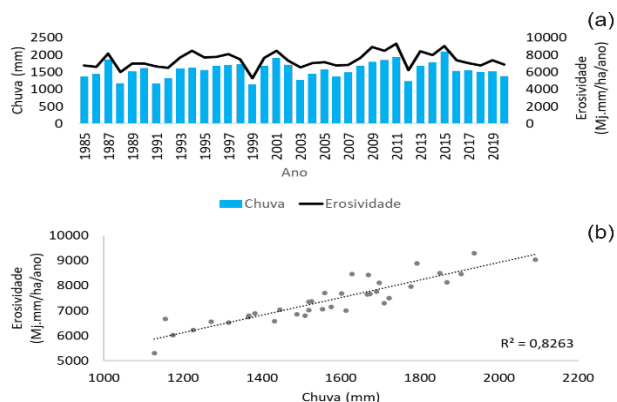


Figura 2. (a) Relação entre a Erosividade (R) e a precipitação. (b) Gráfico de dispersão e coeficiente de correlação entre as duas variáveis.

3.2. Erodibilidade do solo

O fator da erodibilidade do solo (K) é determinado a partir da sua estrutura. Normalmente MGs devem evitar solos arenosos e com muita matéria orgânica porque eles são mais suscetíveis à erosão. No entanto, solos argilosos e siltosos são menos propensos a este fenômeno, ou seja, apresentam valor mais baixos de (K). Na área de estudo valores máximos de 59% de argila, 51% de silte, 47% de areia, e 14% de matéria orgânica foram encontrados para os solos, resultando em valores de (K) entre 0,021 e 0,043 t.h/Mj/mm ao longo dos anos. Portanto, este não foi um dos fatores que mais contribuíram para a suscetibilidade à erosão na área de estudo, visto que nenhum dos MGs estão localizados em áreas mais suscetíveis à erodibilidade.

3.3. Topografia

O fator topográfico (LS) mostrou uma significativa variabilidade para a área de estudo. O relevo varia desde áreas planas costeiras até áreas escarpadas da serra do mar, variando de 0 a 1820 metros de altitude (Figura 1). Cerca de 66% da área de estudo está em regiões planas com rampas entre 0-3%, 17% entre 3-8%, 11% entre 8-20%, 4% entre 20-45%, e apenas 2% acima de 45%. Portanto, o fator topográfico (LS) é considerado um dos mais importantes na área de estudo e variaram de zero em regiões planas a 23640 em regiões mais acidentadas. No entanto, os MGs não são normalmente instalados em áreas muito acidentadas, porém, muitos deles podem ser atingidos por erosões. Ou seja, não são afetados diretamente pelo fator (LS), mas pelas suas consequências.

3.4. Uso e cobertura da terra

O fator da influência do uso e cobertura da terra no processo erosivo (CP) nos MGs é um dos parâmetros de perda de solo na equação da RUSLE que mais precisa atenção. No total,

ocorreram 694 mudanças de classes nos MGs entre 1985 e 2020. Destas, 29% entre 1985-1995, 28% entre 1995-2005, 26% entre 2005-2015, e 17% entre 2015-2020. Dentre elas, a que se destacou foi a mudança dos MGs localizados em outras classes de uso e cobertura do solo para a classe de infraestrutura urbana o que torna nulo a perda de solo nestes locais, quando na realidade elas estão em áreas que podem ser suscetíveis à erosão como em parque e jardins onde não há uma impermeabilização do solo.

3.5. Estimativa de perda de solo

Os valores médios de perda de solo (A) dos MGs na área de estudo variou de zero em áreas planas ou urbanas até 6357 t/ha/ano (Figura 3).

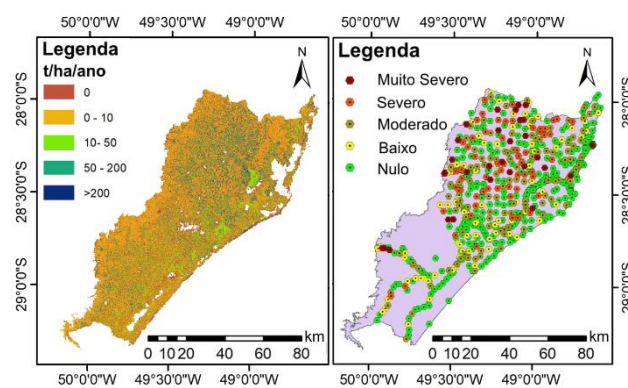


Figura 3. (a) Perda de solo média. (b) Suscetibilidade dos MGs a perda de solo

Também foi observado que houve poucas mudanças de classes de suscetibilidade à perda do solo nos MGs ao longo dos anos e que as diferenças dessa suscetibilidade usando R_{per} and R_{aver} foram pequenas. Portanto, em geral poucos MGs estão localizados nas classes mais altas de suscetibilidade e grande parte se encontra nas classes de suscetibilidade mais baixas. Isso se deve principalmente ao crescimento das áreas urbanas na qual a perda de solo é considerada nula e consequentemente a suscetibilidade dos MGs também.

3.6. Futuros cenários de perda de solo

Para os cenários futuros de perda de solo, apenas as precipitações e consequentemente o fator de Erosividade da chuva (R) foi alterado na equação do RUSLE. A análise dos dados dos modelos climáticos demonstrou que para a região de estudo, a precipitação média diminuiu para o período de 2021-2040 se comparado com o observado de 2001-2020. Porém, a partir de 2040 estes valores começam a aumentar para quase todos os cenários, exceto o ssp585 que se mantém estável. Portanto, a média da precipitação projetada para 2100 é maior do que os dados históricos observados, exceto para o cenário ssp126.

Este aumento na precipitação futura influenciou diretamente a erosividade da chuva futura (R_{fut}). Houve no

início uma diminuição de (R_{fut}) até 2040 e um aumento até 2100. Portanto, a suscetibilidade de perda de solo nos MGs mudaram e diminuíram até 2040 e retornaram a aumentar e se estabilizaram em quase todos os cenários ssp até o fim do século.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisados os fatores de erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), topográficos (LS) e da influência do uso e cobertura da terra e práticas conservativas (CP) para quantificar as perdas de solos (A) na região sul do estado de Santa Catarina e analisar a suscetibilidade dos Marcos Geodésicos (MGs) para o passado e também para cenários futuros de mudanças climáticas.

Pode-se concluir que os MGs no que diz respeito à suscetibilidade à erosão, encontram-se em locais estáveis, e talvez apenas poucos MGs precisariam ser realocados para locais mais seguros. Vale destacar que o fator CP é o que exige maior cuidado na análise, uma vez que foi o mais significativo para que os MGs classificados como áreas urbanas apresentem perda de solo nula, o que a princípio, parece ser uma situação desejável. Porém, na realidade com o crescimento urbano, existe um risco de destruição destes MGs. Alguns MGs tiveram visita *in loco* em áreas urbanas, porém, muitos não foram encontrados, provavelmente sendo destruídos devido à dinâmica da expansão urbana e não pela ação erosiva do solo.

Para os cenários futuros, projeta-se uma ligeira diminuição das precipitações para o cenário mais otimista e um aumento para o cenário mais pessimista. Entretanto, isto não implica diretamente no aumento dos valores de perda de solo, pois a variável está mais relacionada à quantidade de chuvas do que sua intensidade. Porém, com o aumento de eventos extremos hidrometeorológicos pode-se dizer que a suscetibilidade dos MGs pode ser muito maior do que a que foi encontrada neste artigo. No entanto, a erosividade sozinha para os cenários futuros (R_{fut}) não é o fator mais crítico para a suscetibilidade dos MGs a sofrerem erosão, sendo que outros fatores além destes devem ser levados em consideração, como as mudanças futuras de uso e cobertura da terra e consequentemente de (CP) e a melhora da resolução espacial de todos os dados, o que são desafios para próximos estudos. Por último, os resultados aqui apresentados foram condizentes com a metodologia adotada e podem ser utilizados por tomadores de decisão para manterem os atuais MGs, principalmente aqueles que se encontram em áreas mais suscetíveis à erosão e até mesmo se programar para ampliar a rede geodésica.

5. REFERÊNCIAS

[1] W. H. Wischmeier and D. D. Smith, "Rainfall energy and its relationship to soil loss," *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 39, no. 2, pp. 285–291, 1958, doi: <https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>.

[2] K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, and J. P. Porter, "RUSLE: revised universal soil loss equation," *J. Soil Water Conserv.*, vol. 46, no. 1, 1991.

[3] V. J. Markose and K. S. Jayappa, "Soil loss estimation and prioritization of sub-watersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 188, no. 4, 2016, doi: [10.1007/s10661-016-5218-2](https://doi.org/10.1007/s10661-016-5218-2).

[4] L. N. da Silveira, V. F. Nascimento, F. Casagrande, S. F. de Souza, and J. P. H. B. Ometto, "Geodetic Landmarks Soil Loss Susceptibility Using RUSLE and Climate Change Scenarios," 2021, doi: [10.21203/rs.3.rs-1196845/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1196845/v1).

[5] J. M. Gutiérrez *et al.*, "2021: Atlas. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N.," *Cambridge University Press*, 2021. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/> (accessed May 01, 2022).

[6] J. S. T. Pedersen *et al.*, "An assessment of the performance of scenarios against historical global emissions for IPCC reports," *Glob. Environ. Chang.*, vol. 66, p. 102199, 2021.

[7] L. de Sousa *et al.*, "SoilGrids 2.0: producing quality-assessed soil information for the globe," *SOIL Discuss.*, 2020, doi: [10.5194/soil-2020-65](https://doi.org/10.5194/soil-2020-65).

[8] J. R. Williams, "The EPIC model," *Comput. Model. watershed Hydrol.*, pp. 909–1000, 1995.

[9] P. Tian *et al.*, "Soil erosion assessment by RUSLE with improved P factor and its validation: Case study on mountainous and hilly areas of Hubei Province, China," *Int. Soil Water Conserv. Res.*, vol. 9, no. 3, pp. 433–444, Sep. 2021, doi: [10.1016/j.iswcr.2021.04.007](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.04.007).

[10] L. Gomes, S. J. C. Simões, M. C. Forti, J. P. H. B. Ometto, and E. L. D. Nora, "Using Geotechnology to Estimate Annual Soil Loss Rate in the Brazilian Cerrado," *J. Geogr. Inf. Syst.*, vol. 09, no. 04, 2017, doi: [10.4236/jgis.2017.94026](https://doi.org/10.4236/jgis.2017.94026).

[11] H. M. J. Arnoldus, "An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation," *An Approx. rainfall factor Univers. Soil Loss Equation.*, pp. 127–132, 1980.