



Proposta metodológica de mapeamento da vulnerabilidade à erosão: aplicação na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS

Methodological proposal for mapping vulnerability to erosion: application in the Santa Maria River hydrographic basin, RS

Carina Petsch*  , Anderson Augusto Volpato Scoti  , Romario Trentin  ,
Luís Eduardo de Souza Robaina  

Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.
E-mail: ascoti2@gmail.com (AAVS); romario.trentin@gmail.com (RT); lesrobaina@gmail.com (LESR).

Recebido (Received): 14/05/2022
Aceito (Accepted): 05/04/2023

*E-mail para correspondência: carinapetsch@gmail.com

Resumo: A espacialização de informações físico-naturais e antrópicas em bacias hidrográficas propicia um entendimento sistêmico da unidade e o desenvolvimento de estratégias de planejamento frente a processos erosivos. Sendo assim, o objetivo desta pesquisa é propor um método de mapeamento da vulnerabilidade à erosão para a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (BHRSM), localizada no sudoeste gaúcho. A área de estudo foi escolhida por apresentar o desenvolvimento de feições erosivas documentadas por outros autores. A metodologia envolveu a atribuição de pesos para as variáveis de geologia, solos, uso da terra, erosividade da chuva e elementos de Geomorphons com posterior cruzamento em ambiente SIG. O modelo demonstrou que a BHRSM apresenta uma vulnerabilidade natural à erosão decorrente da presença de rochas sedimentares friáveis, embora o sobrepastoreio na porção ocupada pelo gado venha aumentado a degradação do solo e fomentando o transporte de sedimentos. Ademais, a introdução da soja propicia a exposição do solo em determinados períodos do ano, ocasionando a erosão. O modelo indicou, de forma inédita, a associação das porções com maior presença de feições erosivas à maior erosividade média anual da chuva na BHRSM. O modelo também apresentou como vantagem a possibilidade de mudança de classe de vulnerabilidade em decorrência da variação da erosividade e uso da terra, dados que apresentam mudanças anuais na BHRSM. Tendo em vista a situação de vulnerabilidade à erosão, é necessário desenvolver estratégias de manejo, sobretudo para a formação campestre e culturas temporárias, a fim de minimizar os danos dos processos erosivos.

Palavras-chave: Elementos de geomorphons; Erosividade; SIG.

Abstract: The spatialization of natural and anthropic physical information in hydrographic basins provides a systemic understanding of the unit and the development of planning strategies in the face of erosive processes. Therefore, the objective of this research is to propose a method of mapping the vulnerability to erosion for the Santa Maria River Basin (BHRSM), located in southwestern Rio Grande do Sul. The study area was chosen because it presents the development of erosive features documented by other authors. The methodology involved assigning weights to the data variables of geology, soils, land use, rainfall erosivity and Geomorphons elements and subsequent crossing in a GIS environment. The model demonstrated that the BHRSM has a natural vulnerability to erosion due to the presence of friable sedimentary rocks. However, overgrazing in the portion occupied by cattle has increased soil degradation and fostered sediment transport. In addition, the introduction of soybeans provides soil exposure at certain times of the year, causing erosion. The model indicated, in an unprecedented way, the association of the portions with the highest presence of erosive features to the highest average annual rainfall erosivity in the BHRSM. The model also had the advantage of the possibility of changing the vulnerability class due to the variation in erosivity and land use, data that show annual changes in the BHRSM. Bearing in mind the situation of vulnerability to erosion, it is necessary to develop management strategies, especially for grassland formation and temporary crops, in order to minimize the damage caused by erosion.

Keywords: Elements of geomorphons; Erosivity; GIS.

1. Introdução

A erosão é um processo natural de transporte do solo pelas forças do vento e/ou da água que ocorre a uma taxa mais rápida do que os vários processos de formação do solo (KOURGIALAS *et al.* 2016; ARABAMERI *et al.* 2021). Dependendo de sua proporção e magnitude, pode constituir um dos maiores problemas ambientais atuais, na medida em que é responsável pela diminuição da fertilidade dos solos, causando redução na produtividade e aumento nos custos, além de provocar o assoreamento de rios e a diminuição da qualidade da água (NHU *et al.* 2020; MAURYA *et al.* 2021). Dessa forma, a erosão pode levar à degradação irreversível de solos, alterando todo o ecossistema e provocando a perda da função econômica (WEI *et al.* 2017), gerando prejuízos. Nessa perspectiva, Sartori *et al.* (2019) estimou o valor econômico da erosão hídrica do solo na economia mundial em um custo anual de 8 bilhões de dólares para o PIB global.

Muitos fatores devem ser levados em conta ao se avaliar o processo erosivo, como o tipo de agente erosivo, o tipo de erosão, uso e cobertura da terra e dados do relevo (PANAGOS *et al.* 2016), sendo que são as interações entre estes fatores que ditam a perda de solo (ZHU *et al.* 2019). Sprol e Ross (2004, p. 45) destacam que a “estabilidade ou vulnerabilidade, a resistência ao processo natural de erosão das unidades de paisagem natural é definida pela análise integrada do conjunto rocha, solo, relevo, vegetação e clima”. Dentro deste conjunto de fatores, a erosividade da chuva e o uso e cobertura da terra são apontados como os mais dinâmicos durante o ano, assim como os de maior variabilidade devido às diferentes características do clima de cada área de estudo (LI e FANG, 2016; BALLABIO *et al.* 2017). A erosividade das chuvas é determinante para o desenvolvimento de processos erosivos (BERTONI e LOMBARDI NETO 2012; OLIVEIRA *et al.* 2013), sendo 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 e SMITH, 1978).

Nessa conjuntura, destaca-se que as geotecnologias são fundamentais para o monitoramento dos processos ambientais (FAROQI e SADEGHI-NIARAKI 2016; RAZAVI-TERMEH *et al.* 2020), já que possuem como suas principais vantagens a capacidade de processar e analisar um grande volume de dados (DROOGERS e KITE, 2002). Salienta-se que o zoneamento é uma das ferramentas essenciais para o controle da erosão (DUBE *et al.* 2014; RAZAVI-TERMEH *et al.* 2020). Sendo assim, a integração de imagens de satélite e ferramentas de modelagem de dados é empregada para mapear porções mais suscetíveis à erosão, sobretudo no contexto da gestão de bacias hidrográficas (GHORBANZADEH *et al.* 2020; ARABAMERI *et al.* 2021).

Mapeamentos sobre vulnerabilidade à erosão comumente são baseados na metodologia proposta por Crepani *et al.* (2001), sendo possível encontrar diversos exemplos de aplicação para áreas de estudo no Brasil (SPROL e ROSS, 2004; ROVANI *et al.* 2016; CUNHA *et al.* 2018; CARVALHO *et al.* 2020). Nesse viés, o objetivo desta pesquisa é propor um método de mapeamento da vulnerabilidade à erosão para a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (BHRSM) adaptado da metodologia de Crepani (2001).

2. Materiais e métodos

2.1. Banco de dados

Para o cálculo da erosividade foram utilizados dados pluviométricos diários da Agência Nacional das Águas, entre 1986 e 2020, sendo selecionadas informações de sete estações meteorológicas (EM): Três Vendas (código 3155001), Ponte Toropi II (2954032), Dom Pedrito (3054002), Granja Umbu (3054016), Fazenda Encerra (3055003), São Carlos (3055007) e Paraíso (3153003). Para o cálculo da erosividade foi utilizada a equação de Bazzano *et al.* (2007) referente ao município de Quaraí, visto que a BHRSM não possui EM com registro de chuvas no período temporal de menos de 24 horas. Os valores foram espacializados utilizando o interpolador Inverse Distance Kriging (IDW) no SIG QGIS 3.4. Para retratar cenários distintos da BHRSM, o método proposto foi aplicado considerando os anos de maior e menor erosividade e a média anual do período. Os planos de informação (PI) sobre a geologia, solos e uso e cobertura da terra (LULC, em inglês) foram obtidos em fontes oficiais e em outros trabalhos (**Tabela 1**).

Tabela 1: As informações utilizadas para a análise estão dispostas da seguinte forma: dados, fontes, escala e provedor.

Dados	Fonte	Escala	Provedor
Precipitação	Hidroweb	-	https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas
Substrato geológico	CPRM	1:750.000	http://geosgb.cprm.gov.br
Solos	Streck <i>et al.</i> (2008)	1:250.000	Solos do Rio Grande do Sul
Geomorphons	SRTM e curvas de nível	30 metros	http://sil.uc.edu/geom/app
LULC	Souza <i>et al.</i> (2020)	30 metros	https://mapbiomas.org/ferramentas

Organizado pelos autores.

2.2. Atribuição dos pesos

Crepani (2001) destaca que os planos de informação (PI) devem ser classificados com valores que variem entre 1 e 3, de acordo com o grau de vulnerabilidade baseado nos processos de pedogênese e morfogênese. Sendo assim, os pesos foram atribuídos e validados de acordo com evidências de trabalhos de campo realizados em 2020 e 2021, trabalhos prévios (ROBAINA *et al.* 2015; RADEMANN *et al.* 2018; CABRAL *et al.* 2020) e valores do método original de Crepani *et al.* (2001).

No que se refere à Geologia, Crepani *et al.* (2001) salienta que o fator principal a ser considerado é a coesão das rochas. Foram atribuídos os seguintes pesos: 1 para as rochas ígneas e 1.5 para os depósitos inconsolidados; as rochas da Formação (Fm.) Pirambóia e Sanga do Cabral foram classificadas com peso 3, por serem friáveis e oferecem fácil intemperização; às demais rochas sedimentares foi atribuído peso 2. Crepani (2001) destaca que, para o PI de solos, a principal característica a ser considerada é o grau de desenvolvimento ou maturidade do solo. Contudo, para a BHRSM é fundamental considerar também a degradação dos solos ocasionada pela presença do gado (**Figura 5**), conforme observado em campo. Ao gleissolo, por ser altamente orgânico e localizado em situação topográfica plana, foi atribuído o peso 1; aos neossolos, luvisolos e planossolos, o valor 2; aos chernossolos e argissolos, peso 3.

Quanto à erosividade, Crepani *et al.* (2001) destaca que a alta pluviosidade anual e a curta duração do período chuvoso aumentam o *runoff* e a capacidade de erosão. Nesse sentido, foram inseridos diretamente os valores de erosividade no novo método, já que, assim, considera-se somente as chuvas que são causadoras da erosão. Os pesos atribuídos de acordo com os valores encontrados para a BHRSM foram de 1 para valores até 5.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹; peso 1,5 para valores entre 5.000 e 10.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹; entre 10.000 e 15.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, o valor de 2; o peso 2,5 para valores entre 15.000 e 20.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹; e peso 3 para valores acima de 20.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

Para o PI de LULC, Crepani *et al.* (2001) salientou que a cobertura vegetal está diretamente ligada à capacidade de proteção do solo. A BHRSM possui onze diferentes LULC, sendo estes os pesos atribuídos: rios, lagos e a área urbanizada, peso 0; campo alagado e área pantanosa, formação florestal e afloramento rochoso, peso 1; arroz, peso 1,2; silvicultura e mosaico de agricultura e pastagem, peso 2; soja e outras lavouras temporárias, peso 2,4; formação campestre, peso 2,8; outras áreas não vegetadas, peso 3. Os PI de LULC referem-se aos anos de 1989, 2002 e 2020, sendo os dois primeiros os anos de menor e maior erosividade, respectivamente, e 2020 o dado mais atual do projeto MapBiomias.

A determinação dos elementos do relevo foi realizada a partir do método de Geomorphons, apresentado por Jasiewicz e Stepinski (2013), utilizado com êxito em outra pesquisa sobre a representação do relevo do Rio Grande do Sul (ROBAINA *et al.* 2016). Os elementos foram definidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM e curvas de nível, sendo que a ferramenta utilizada foi o *r.geomorphons*, disponível no QGIS. A aplicação é baseada na similaridade textural, ou seja, se utiliza da variação de altitude de células vizinhas, por exemplo, se a célula central apresentar uma altitude maior, será atribuído o valor 1, as células de igual valor serão consideradas 0 e as mais baixas topograficamente assumem valor -1. Além do MDE, é necessário informar dois parâmetros básicos: o primeiro é raio de busca (*Outer search radius*), foram utilizadas 15 células (450 metros); o segundo é o nivelamento em graus (*Flatness threshold*), com valor de 2°. As formas de relevo obtidas com uso do método de Geomorphons (Jasiewicz e Stepinski, 2013) são as seguintes: *Flat* – Plano (peso 1); peso 1,5 para *Footslope* – Base da encosta, *Valley* – Vale e *Pit* – Fosso; peso 2 para *Ridge* – Crista; peso de 2,5 para as formas *Peak* – Pico, *Shoulder* – Ressalto, *Spur* – Crista Secundária, *Hallow* – Escavado; e, por fim, *Slope* – Encosta (peso 3).

2.3. Procedimentos no SIG

De acordo com o método original de Crepani *et al.* (2001), o cruzamento dos PI resulta em Unidades Territoriais Básicas (UTB). A manipulação desses dados foi realizada no SIG QGIS 3.4 utilizando a ferramenta *reclass* e a calculadora Raster, resultando no UTB 1, caracterizado por valores entre 0,5 e 1; já o UTB 2 possui valores entre 1 e 1,5; o UTB 3, entre 1,5 e 2; o UTB 4, entre 2 e 2,5; e o UTB 5, valores entre 2,5 e 3. Na equação 1, verifica-se os parâmetros utilizados para a determinação da Vulnerabilidade à Erosão.

$$\text{VEGE} = (\text{G} + \text{GE} + \text{S} + \text{U} + \text{E})/5 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: VEGE = vulnerabilidade à Erosão usando Geomorphons e Erosividade; G = vulnerabilidade para o tema Geologia; GE = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia (usando Geomorphons); S = vulnerabilidade para o tema solos; U = vulnerabilidade para o tema LULC; E = vulnerabilidade para o tema erosividade da precipitação.

3. Resultados

Este item apresenta uma caracterização da BHRSM e os resultados obtidos para indicação da vulnerabilidade erosiva utilizando a metodologia VEGE.

3.1. Caracterização da BHRSM

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 km² (**Figura 1**). A altitude varia entre 57 metros, valor encontrado na foz com o rio Ibicuí, e 455 metros na porção leste da BHRSM.

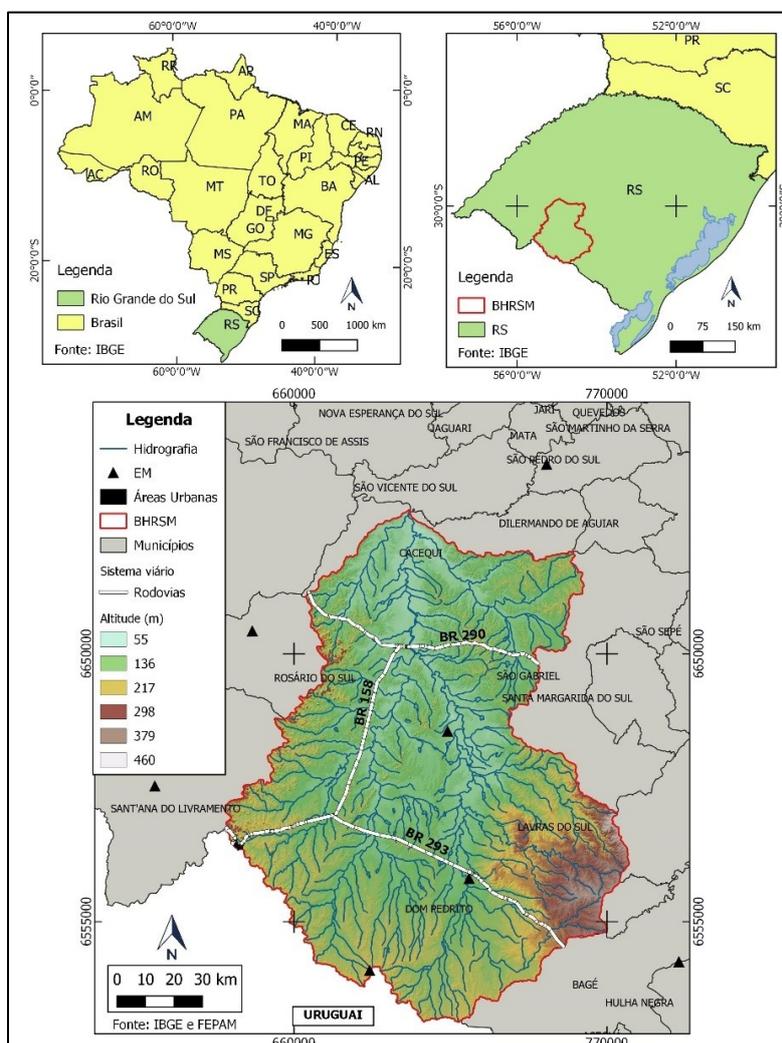


Figura 1: Localização da BHRSM, sudoeste do RS.

As principais litologias aflorantes são compostas por rochas sedimentares (**Figura 2 A**) depositadas durante o Mesozóico, porém as rochas mais antigas da bacia hidrográfica se localizam na porção sudeste, contendo exemplares do Proterozóico (WILDNER *et al.* 2006). Segundo Streck *et al.* (2008), os solos predominantes são argissolos e planossolos, sendo encontrados também neossolos, gleissolos, chernossolos e luvisolos (**Figura 2 B**). Em termos geomorfológicos, segundo a metodologia de Geomorphon (**Figura 2 C**), a BHRSM tem cerca de 64% da sua área total de elemento plano e 13% de encostas, sendo o seu relevo caracterizado como plano a suavemente ondulado.

Scoti (2017) salienta que o Rio Santa Maria tem seu canal principal com uma orientação Sul-Norte e apresenta amplas planícies de inundação que são intensamente cultivadas com arroz (**Figura 2 D**), embora haja predominância das porções de campos naturais, com mais de 50% da área total da BHRSM. As tipologias climáticas da área de estudo são subtropical I (pouco úmido) e subtropical II (medianamente úmido), com a temperatura média anual variando de 17 a 20° C e as precipitações ficando em torno de 1.200 a 1.500 mm anuais (ROSSATO, 2011).

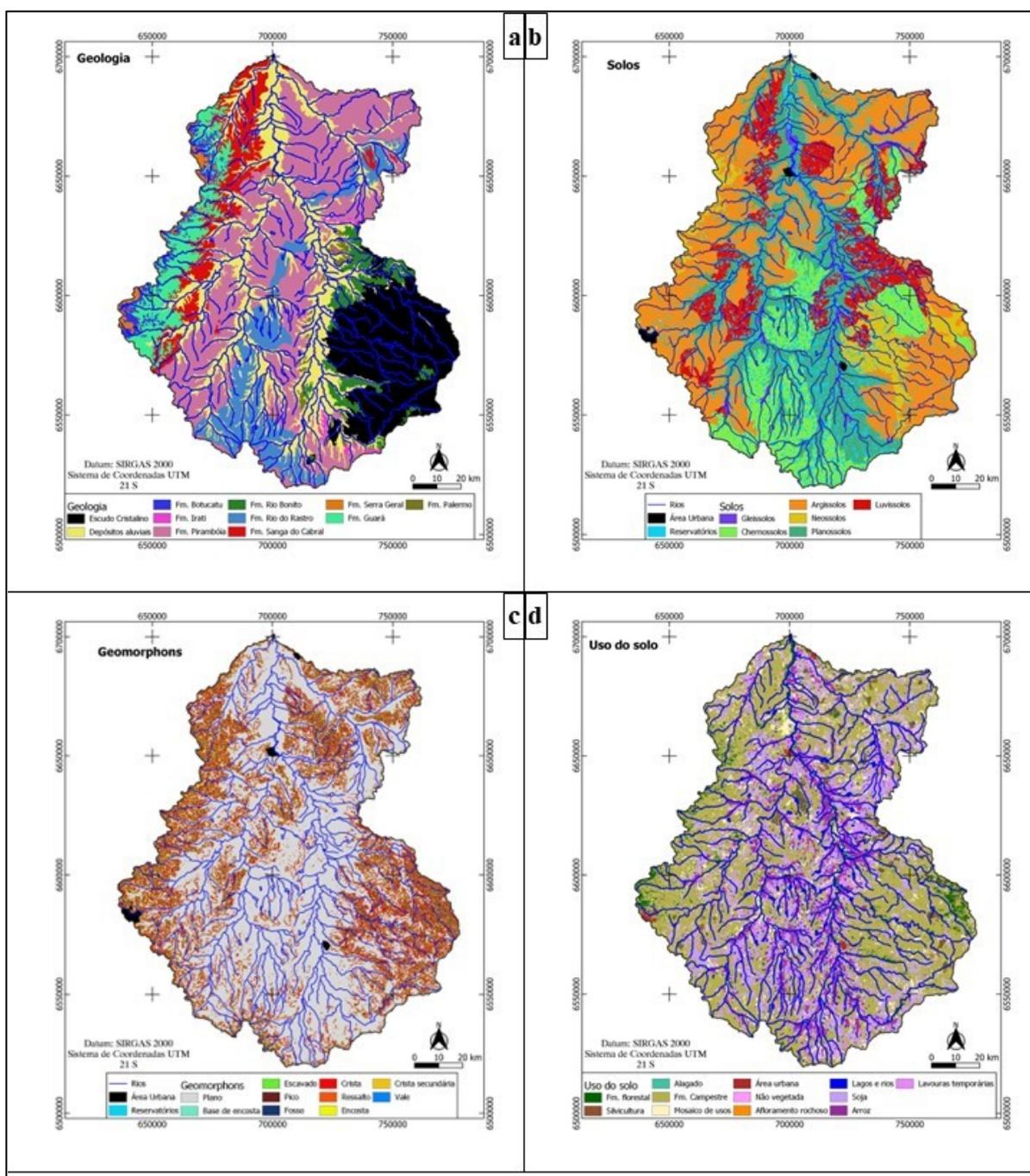


Figura 2: A) representa o mapa de Geologia; B) mapa de solos; C) mapa de Geomorphons; D) mapa de LULC.

3.2 Método VEGE: aplicação na BHRSM

Os mapas obtidos com o método VEGE indicam que, no ano de 1989 (**Figura 4 A**), a UTB 3, medianamente vulnerável, era a predominante, com cerca de 58% da área da BHRSM, ocupando grande parte dos planossolos com cultivo de arroz (**Figura 3 A**) e porções de formação campestre no Escudo Cristalino. A UTB 4, moderadamente vulnerável, ocupava 28% da área de estudo, situada principalmente em porções de encostas no substrato geológico da Fm. Pirambóia, com LULC de formação campestre. A UTB 5, instável, ocupava somente 10% da área e se concentrava nas porções de alta erosividade, nas rochas friáveis do nordeste da BHRSM, ocupadas majoritariamente por formação campestre no elemento de relevo de encosta. A UTB 2, moderadamente estável, ocupava aproximadamente 5% da BHRSM, principalmente nas margens do canal principal, na porção de alto curso. A UTB 1 ocupava menos de 1% da BHRSM.

Para o ano de 2002, o de maior erosividade, há predominância da UTB 5 em mais de 51% da BHRSM (**Figura 4 B**). Ocorre sobre encostas com substrato das Fm. Sanga do Cabral e Pirambóia, ocupadas por formações campestres sujeitas à alta erosividade. Também ocupa as porções de encostas, cristas e cristas secundárias do Escudo Cristalino, além de cristas e picos da Serra do Caverá, oeste da BHRSM. A UTB 4 abrange 39% da BHRSM. Estas porções se caracterizam por Fm. geológicas sedimentares e do Escudo Cristalino em porções planas e ocupadas por formação campestre, sujeitas a menores valores de erosividade. A UTB 3 classifica 8% da BHRSM, ocupando porções de depósitos aluviais dos canais de drenagem e plantadas com arroz (**Figura 3 A**). Nesse ano, a cultura da soja ainda representava pequenas manchas na BHRSM. As UTB 1 e 2 somam, juntas, menos de 2% de áreas da BHRSM.

Para o terceiro mapa gerado, foi utilizado o valor de erosividade média anual da BHRSM para o período de 1986 a 2020, onde têm-se a predominância da UTB 3, com 42% (**Figura 4 C**). Ocupa paisagens planas e vales do Escudo Cristalino, com menor erosividade e ocupadas por formações campestres, além de porções planas às margens dos canais de drenagem, ocupadas por depósitos aluviais e plantações de arroz. A UTB 4 ocupa cerca de 30% da BHRSM em áreas de colinas e transição encosta/plano em todas as formações geológicas, principalmente ocupadas por formações campestres e soja. A UTB 5 ocupa, aproximadamente, 26% e abrange as áreas de maior erosividade nas rochas da Fm. Pirambóia e Sanga do Cabral. Possui ocupação de formação campestre e soja (**Figura 3 B**) em elementos de encostas, cristas, cristas secundárias e picos. As UTB 1 e 2 somam menos de 2% da área ocupada e acompanham depósitos aluviais dos canais principais da BHRSM.

A validação do método em campo demonstrou que na porção nordeste, classificada no método VEGE como instável nos três cenários de erosividade, há alta atividade erosiva, representada por erosão laminar e linear (**Figura 4 E**). Ocorre atividade erosiva associada ao ravinamento e voçorocamento, desenvolvendo-se principalmente em porções de cabeceiras de drenagem em vertentes convergentes (**Figura 4 D**), por haver concentração da água de escoamento superficial. As porções com voçorocas demonstram o desenvolvimento de *piping* (**Figura 5 C**) e degraus de abatimento (**Figura 4 D**) associados à chuva erosiva nessas porções, além de movimentação da água de escoamento de subsuperfície no sistema da vertente. As feições erosivas demonstram associação direta com porções de solo degradado em formação campestre, apresentando sobrepastoreio, ou seja, o gado atuando como agente bioerosivo na compactação do solo ligado ao desenvolvimento de caminhos que atuam na concentração da água das chuvas (**Figura 5 A**) e no desprendimento de blocos das paredes das voçorocas (**Figura 5 B**).



Figura 3: Fotografias registradas com drone demonstram porções de arroz (a) e de soja (b)

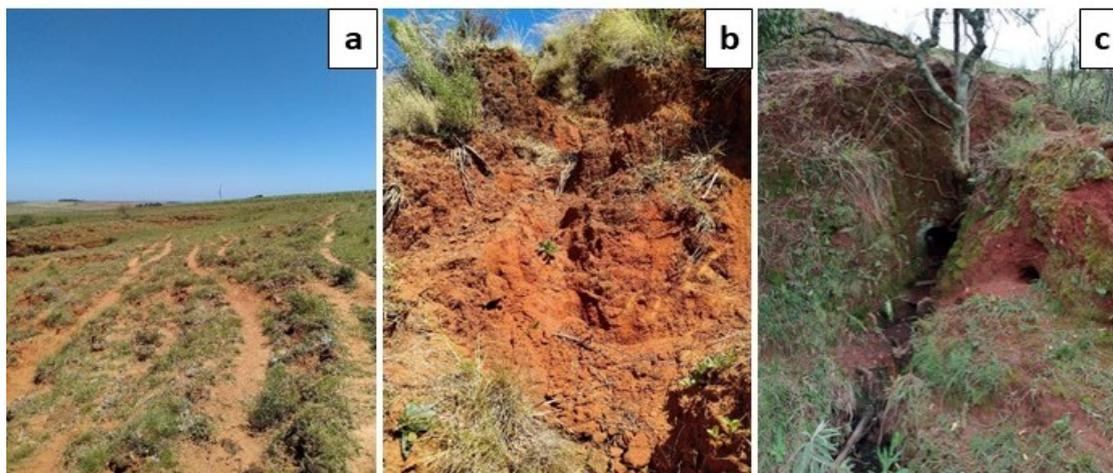


Figura 5: A mostra área de formação campestre degradada pelos caminhos percorridos pelo gado; B demonstra a desagregação de blocos ocasionado pelo gado ao descer as paredes das voçorocas em busca de água para dessedentação; C mostra o efeito do *piping*.

4. Discussões

Destaca-se que o método VEGE teve resultados satisfatórios. Algumas pesquisas que estão sendo desenvolvidas na BHRSM já identificaram as porções nordeste e oeste como as de maior concentração dos processos erosivos (ROBAINA *et al.* 2015; RADEMANN *et al.* 2018; CABRAL *et al.* 2020), e o método proposto coincidiu com estes resultados, somando-se a eles na medida em que automatiza o método de espacialização de UTBs com maior vulnerabilidade. Ademais, o fato de considerar a alteração e variação das classes em função das mudanças de LULC e erosividade confere ao modelo a dinamicidade necessária para retratar uma bacia hidrográfica em desequilíbrio, como a BHRSM.

No que se refere aos LULC, Crepani *et al.* (2001) salienta que os processos morfogenéticos relacionam-se às coberturas vegetais de densidade (cobertura do terreno) mais baixa, demandando a análise desta classe. A BHRSM está em uma porção do Bioma Pampa, que vem sofrendo intensa degradação em função da substituição dos campos nativos pelas lavouras de culturas temporárias (MENGUE *et al.* 2020; RIBEIRO *et al.* 2021). Na BHRSM a soja avança no UTB 4 e 5 dos três mapeamentos, em porções de rochas friáveis, o que, em períodos de preparo do solo, onde não há cobertura vegetal, pode levar a uma fácil e rápida desagregação de material sedimentar. Borelli (2017) destaca que, nas porções de lavouras temporárias, estima-se que a erosão será quatro vezes maior que a taxa geral de erosão de uma determinada área. Sendo assim, a alteração do bioma natural para a implantação da cultura de soja confere um valor alto para essa e outras culturas temporárias na inserção do modelo VEGE. Além disso, Kuplich *et al.* (2018) destaca que o cultivo da soja é o de maior impacto ambiental, devido, principalmente, às altas cargas de agrotóxicos.

O valor mais alto atribuído para a formação campestre ocorreu em função da intensa degradação observada para esse LULC natural (Figura 5). Crawshaw *et al.* (2007), em avaliação para os anos de 1970 a 2004, destaca que houve a diminuição das áreas de campo, porém o número de bovinos não acompanhou tal tendência. Nabinger *et al.* (2002) salienta que a pastagem nativa é sensível a essa pressão devido à iminência de desaparecimento de cerca de 49 espécies nativas e ao desenvolvimento do processo de arenização em algumas áreas do RS.

Por exemplo, na porção nordeste da BHRSM, classificada como de morfogênese, o estudo de Rademann *et al.* (2018) destacou que mais de 50% das feições erosivas se desenvolveu nas áreas de campo. Para a formação campestre, a alta densidade animal em algumas porções leva ao sobrepastoreio, o que pode resultar na degradação dos solos que se dá pela perda de matéria orgânica e pela alteração das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, ocasionando riscos de erosão (NABINGER *et al.* 2002; OVERBECK *et al.* 2007; ROESCH *et al.* 2009; RADEMANN *et al.* 2018; VALENTE *et al.* 2021). Além disso, o gado contribui para a compactação do solo pelo pisoteio (THOMAZ e DIAS, 2009; AMBUS *et al.* 2018), já que, com o sobrepastoreio, necessitam percorrer maiores distâncias em busca de alimento (THOMAZ e DIAS, 2009), o que foi identificado no período de seca na BHRSM. O sobrepastoreio também pode ter um caráter sazonal, pois no inverno ocorre a produção limitada de biomassa com grandes perdas de peso do gado sob manejo inapropriado (OVERBECK *et al.* 2009).

Nabinger *et al.* (2002) evidencia a substituição da formação campestre por plantações de *Pinus sp.* em grandes extensões no Rio Grande do Sul, devido ao seu retorno econômico ser maior. Na BHRSM, a inserção da silvicultura também foi observada, ainda que em algumas manchas esparsas. Nas áreas plantadas, os períodos que mais podem ocasionar erosão são a pós-colheita e as fases iniciais do plantio, já que o solo fica descoberto (OLIVEIRA *et al.* 2014) e a plantação ocorre em solos suscetíveis à erosão (REICHERT *et al.* 2016). Valente *et al.* (2021) relata que essas plantações, quando bem geridas, aumentam a infiltração de água no solo, mais do que em pastagens degradadas sob pastoreio intensivo. Devido a essas constatações, no modelo VEGE foi atribuído um valor mais baixo a essa cultura em relação à formação campestre.

Na BHRSM os elementos de Geomorphons permitiram que se diferenciasses as formas de relevo do tipo crista, crista secundária, picos e encostas, destacando as porções de maior energia de relevo que ocasionam a acelerada desagregação e transporte de materiais, principalmente nas vertentes que concentram o escoamento superficial. A curvatura (planta e perfil) - Geomorphon - do terreno influencia a velocidade e o volume do escoamento ao longo da encosta e a taxa de erosão (SENSOY e KARA, 2014). Sendo assim, o método de Geomorphon conferiu uma análise detalhada para essa bacia hidrográfica de grande área.

Apesar da BHRSM ser majoritariamente plana, Rademann *et al.* (2018, p. 43) destaca que o predomínio de processos erosivos nas colinas e colinas suaves ocorre porque “o escoamento superficial é importante e a ocorrência de infiltração permite o avanço do processo em profundidade”. Diante disso, foi possível observar o processo de *piping*. Além disso, o grau de coesão das rochas é fundamental para o desenvolvimento de processos erosivos na bacia hidrográfica (CREPANI *et al.* 2001). Hasenack *et al.* (2019) destaca que os solos da região possuem baixa aptidão para culturas temporárias, já que as rochas friáveis dessa porção do RS originam solos frágeis e sujeitos à erosão (ROESCH *et al.* 2009; ROBAINA *et al.* 2015; RADEMANN *et al.* 2018) Diante deste contexto geológico, verifica-se que a erosão ocorre naturalmente, mas há um aumento acelerado decorrente da intervenção antrópica.

Além de todo o contexto geológico da BHRSM aliado à intervenção antrópica, os valores de erosividade se mostraram altos para a área de estudo. Os impactos da chuva em uma rocha friável com pouca ou nenhuma cobertura vegetal causam a desagregação e o transporte de material. A situação é preocupante, já que Sanches *et al.* (2019) descreve a ocorrência de Complexos Convectivos de Mesoescala para essa região, que são responsáveis por eventos pluviométricos intensos nos meses da primavera, verão e outono, justamente os períodos em que o solo fica descoberto na preparação e colheita da soja. Ademais, Petsch *et al.*, (2022) já verificou a tendência de aumento da erosividade na década de 2008 a 2019.

Nesse viés, destaca-se que os solos da BHRSM estão em condições de degradação, o que demanda urgentemente um plano de manejo adequado para evitar o desenvolvimento da erosão. Sendo assim, Simões *et al.* (1999 p. 4) salienta que “a importância do conhecimento da vulnerabilidade natural é primordial para predição do comportamento dos sistemas naturais frente ao processo de ocupação”. Considerando as mudanças na paisagem da BHRSM, faz-se necessário pensar em um modelo dinâmico que apresente UTB não fixas em relação a sua vulnerabilidade à erosão. Nesse sentido, diante da expansão da cultura de soja e degradação da formação campestre devido ao sobrepastoreio, além das tendências de erosividade serem maiores nos últimos anos (2008-2019), as UTB 4 e 5 possivelmente se tornarão as mais encontradas na BHRSM.

5. Considerações finais

- O modelo VEGE apresenta, de forma inédita, a integração do fator climático em um modelo desenvolvido para o mapeamento de suscetibilidade à erosão para a BHRSM;
- O estudo apontou que a intensidade da erosividade no modelo VEGE altera as classes de vulnerabilidade de acordo com o ano, já que os valores de precipitação sofreram significativas alterações entre 1986 e 2020. Destaca-se a necessidade de dar continuidade ao estudo, aplicando o método para as estações e meses do ano;
- O modelo VEGE apresentou variação em função das mudanças de LULC, o que é fundamental diante do crescimento das lavouras de soja para a BHRSM;
- O modelo indicou o setor nordeste como o de maior vulnerabilidade, tanto no ano de menor erosividade quanto no de maior. Ele já é amplamente documentado por apresentar erosões lineares profundas com voçorocas de tamanho considerável. Isso confirma a validade do método;
- O uso do método de Geomorphons permitiu um maior detalhamento do relevo, sobretudo em uma bacia hidrográfica de grande proporção, demonstrando a associação de encostas, cristas e picos à vulnerabilidade e à erosão;

- O conjunto natural de interações morfológicas e climáticas na BHRSM fornece uma situação de vulnerabilidade natural a essa área de estudo, intensificada, porém, pela degradação dos solos provocada pela ação humana;
- Diante da degradação da formação campestre observada em campo, causada pela inserção das lavouras temporárias e o sobrepastoreio, as técnicas de manejo são as únicas maneiras de proporcionar o controle do processo erosivo.

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. DOI: 10.1038/s41598-017-08298-y
- AMBUS J.V.; REICHERT, J.M; GUBIANI, P.I.; FACCIÓ CARVALHO, P. C. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, n. 330, p. 232-243, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.06.005
- ARABAMERI, A.; PAL, S. C.; COSTACHE, R.; SAHA, A.; REZAIE, F.; DANESH, A. S.; PRADHAN, B.; LEE, S.; HOANG, N. Prediction of gully erosion susceptibility mapping using novel ensemble machine learning algorithms. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, n. 12:1, p. 469-498, 2021. DOI: 10.1080/19475705.2021.1880977
- BALLABIO, C., *et al.* Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. **Science of The Total Environment**, 579, p. 1298-1315, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.123
- 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. DOI: 10.1590/S0100-06832007000500036
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5 eds. Editora Ícone: São Paulo, 355p.; 2012.
- 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. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7
- 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. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1670
- CARVALHO, C. M.; BERNARDI, E. S.; FANTINEL, R. A.; FELDKIRCHER, T.; CRUZ, R. C. Fragilidade Ambiental frente ao Uso do Solo do Alto Camaquã, RS. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 37, n. 1, 2020. DOI: 10.51359/2238-6211.2020.236352.
- CRAWSHAW, D.; DALL'AGNOL, M.; CORDEIRO, J. L. P.; HASENACK, H. Caracterização dos campos sul-rio-grandenses: uma perspectiva da ecologia da paisagem. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 33, p. 233-252, 2007.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. DE; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos, 2001. Disponível em: <http://sap.cst.inpe.br/artigos/CrepaneEtAl.pdf>
- CUNHA, H. N. DA; FILIPPINI ALBA, J. M.; MIURA, A. K.; SALDANHA, D. L. Análise da suscetibilidade à erosão da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã (RS). **Caminhos De Geografia**, n. 19(65), p. 16–28, 2018. DOI: 10.14393/RCG196502
- DROOGERS, P.; KITE G. Remotely sensed data used for modelling at different hydrological scales. **Hydrological Process**, n. 16(8), p. 1543–1556, 2002. DOI: 10.1002/hyp.1019

- DUBE, F.; NHAPI, I.; MURWIRA, A.; GUMINDOGA, W.; GOLDIN, J.; MASHAURI, D. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District–Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, n. 67–69, p. 145–152, 2014. DOI: 10.1016/j.pce.2014.02.002
- FAROQI, H.; SADEGHI-NIARAKI, A. GIS-based ride-sharing and DRT in Tehran city. **Public Transport**, n. 8(2), p. 243–260, 2016. DOI: 10.1007/s12469-016-0130-2
- GHORBANZADEH, O.; SHAHABI, H.; MIRCHOOI, F.; KAMRAN, K. V.; LIM, S.; ARYAL, J.; JARIHANI, B.; BLASCHKE, T. Gully erosion susceptibility mapping (GESM) using machine learning methods optimized by the multi-collinearity analysis and K-fold cross-validation, **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, n. 11:1, p. 1653-1678, 2020. DOI: 10.1080/19475705.2020.1810138
- HASENACK, H.; WEBER, E. J.; VÉLEZ-MARTIN, E.; HOFMANN, G. S.; DEWES, H. **Bioma Pampa: oportunidades e desafios de pesquisa para o desenvolvimento sustentável**. In: Vilela, E. F.; Callegaro, G. M.; Fernandes, G. W. *Biomass e agricultura: oportunidades e desafios*. Rio de Janeiro: Vertente edições, 304 p., p. 123-140, 2019.
- JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, v. 182, p. 147-156, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>.
- KOURGIALAS, N. N.; KOUBOURIS, G. C.; KARATZAS, G. P.; METZIDAKIS, I. Assessing water erosion in Mediterranean tree crops using GIS techniques and field measurements: the effect of climate change. **Natural Hazards**, n. 83, p. 65-81, 2016. DOI: 10.1007/s11069-016-2354-5
- LI, Z.; FANG, H. Impacts of climate change on water erosion: A review. **Earth-Science Reviews**, 163, p. 94-117, 2016. DOI:10.1016/j.earscirev.2016.10.004
- MAURYA, S.; SRIVASTAVA, P. K.; YADUVANSHI, A.; ANAND, A.; PETROPOULOS, G. P.; ZHUO, L.; MALL, R. K. Soil erosion in future scenario using CMIP5 models and earth observation datasets. **Journal of Hydrology**, v. 594, 2021. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125851.
- MENGUE, V. P.; FREITAS, M. W. D. DE; SILVA, T. S.; FONTANA, D. C.; SCOTTÁ, F. C. Land-use and land-cover change processes in Pampa biome and relation with environmental and socioeconomic data. **Applied Geography**, n. 125, p. 1–12, 2020. DOI: 10.1016/j.apgeog.2020.102342
- NABINGER, C.; FERREIRA, E. T.; FREITAS, A. K.; CARVALHO, P. C. DE F.; SANT'ANNA, D. M. Produção Animal com base no campo nativo: aplicação de resultados de pesquisa. In: PILLAR, V. DE P.; MULLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. DE S.; JACQUES, A. V. Á. *Campos Sulinos—conservação e uso sustentável da biodiversidade*, Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2009. p. 175-198.
- NHU, V-H. *et al.* GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison of computational ensemble data mining models. **Applied Sciences**, n. 10(6), p. 2039, 2020.
- OLIVEIRA, L. C; BERTOL, I.; CAMPOS, M. L; MECABÔ JÚNIOR, J. Erosão hídrica em plantio de pinus, em estrada florestal e em campo nativo. **Floresta**, n. 44, p. 239-248, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v44i2.31373>.
- OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **CATENA**, n. 100, p. 139-147, 2013. DOI: 10.1016/j.catena.2012.08.006
- OVERBECK, G. E.; MULLER, S. C.; FIDELIS A.; PFADENHAUER, J.; PILLAR, V. DE P.; BLANCO, C. C.; BOLDRINI, I. I.; BOTH, R.; FORNECK, E. D. Os campos sulinos: um bioma negligenciado. In: PILLAR, V. DE P.; MULLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. DE S.; JACQUES, A. V. Á. *Campos Sulinos—conservação e uso sustentável da biodiversidade*, Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2009. p. 101-121.

- OVERBECK, G. E.; MULLER, S. C.; FIDELIS, A.; PFADENHAUER, J.; PILLAR, V. D.; BLANCO, C. C.; BOLDRINI, I.; BOTH, R.; FORNECK, E. Brazil's neglected biome: The South Brazilian Campos. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 9, n. 2, p. 101-116, 2007.
- PANAGOS, P.; IMESON, A.; MEUSBURGER, K.; BORRELLI, P.; POESEN, J.; ALEWELL, C. Soil conservation in Europe: wish or reality? **Land Degradation & Development**, n. 27, p. 1547-1551, 2016. DOI: 10.1002/ldr.2538.
- PETSCH, C.; SANCHES, F. DE O.; SCCOTI, A. A. V.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. DE S.; AMARAL, E. C. do. Erosividade da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS): tendências e espacialização. **Boletim de Geografia**, v. 39, p. 348-368. 2022. DOI: 10.4025/bolgeogr.v39.a2021.e61231
- 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 Georaguia**. v. 8 n. 2, 2018.
- RAZAVI-TERMEH, S. V.; SADEGHI-NIARAKI, A. CHOI, S. M. Gully erosion susceptibility mapping using artificial intelligence and statistical models. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, n. 11:1, p. 821-844, 2020. DOI: 10.1080/19475705.2020.1753824
- REICHERT, J.M.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J.; RODRIGUES, M.F.; SUZUKI, L.E.A.S. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandzation/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, n. 233, p. 370-380, 2016. DOI: 10.1016/j.agee.2016.09.039
- RIBEIRO, S.; MOREIRA, L. F. B; OVERBECK, G. E.; MALTCHIK, L. Protected Areas of the Pampa biome presented land use incompatible with conservation purposes. **Journal of Land Use Science**, n. 16:3, p. 260-272, 2021. DOI: 10.1080/1747423X.2021.1934134
- 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. DOI: 10.20502/rbg.v16i1.630.
- ROESCH, L. F. W.; VIEIRA, F. C. B.; PEREIRA, V. A.; SCHUNEMANN, A. L.; TEIXEIRA, I. F., SENNA, A. J. T.; STEFENON, V. M. The Brazilian Pampa: A Fragile Biome. **Diversity**. n. 1(2), p. 182-198, 2009. DOI: 10.3390/d1020182.
- ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 2011. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011.
- ROVANI, F. F. M.; VIERA, M. Vulnerabilidade Natural do Solo de Silveira Martins-RS. **Floresta e Ambiente**, v. 23(2), p. 151-160, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.125614.
- 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. 8, p. 441-453, 2019. DOI: 10.4236/ajcc.2019.84024
- SARTORI, M.; PHILIPPIDIS, G.; FERRARI, E.; BORRELLI, P.; LUGATO, E.; MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. **Land Use Policy**, n. 86, p. 299-312, 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.05.014.
- 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**. 2017. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.
- SENSOY, H.; KARA, O. Slope shape effect on runoff and soil erosion under natural rainfall conditions **IForest**, n. 7, p. 110-114, 2014. DOI: 10.3832/ifor0845-007

SIMÕES, M.; BECKER, B.; EGLER, C.; MIRANDA, M.; ORLEANS E BRAGANÇA, P. C.; SANTOS, U. P.. Metodologia para elaboração do Zoneamento Ecológico-Econômico em áreas com grande influência antrópica. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

SOUZA, C. M. JR. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, n. 12(17), p. 2735, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

SPROL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **GEOUSP Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 15, p. 39-49, 2004. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2004.123868

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 222 p., 2008.

THOMAZ, E. L.; DIAS, W. A. Bioerosão - evolução do rebanho bovino brasileiro e implicações nos processos geomorfológicos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, 2009. DOI: 10.20502/rbg.v10i2.125.

VALENTE, M. L.; RECIHERT, J. M.; CAVALCANTE, R. B. L.; MINELLA, J. P. G.; EVRARD, O.; SRINIVASAN, R. Afforestation of degraded grasslands reduces sediment transport and may contribute to streamflow regulation in small catchments in the short-run. **CATENA**, v. 204, 105371, 2021. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105371

WEI, S.C.; ZHANG, X.P.; MCLAUGHLIN, N.B.; CHEN, X.W.; JIA, S.X.; LIANG, A.Z. Impact of soil water erosion processes on catchment export of soil aggregates and associated SOC. **Geoderma**, 294, 63-69, 2017. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.021

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.

WILDNER, W; RAMGRAG, G. E.; LOPES R. C.; IGLESIAS, C. M. F. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750000. CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Porto Alegre, RS. 2006.

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, 2019. DOI: 10.1002/joc.6266



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).