



MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS (AHP) APLICADO A FRAGILIDADE AMBIENTAL DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA ROLANTE, BRASIL

Elisandra Hernandes da Fonseca¹

Angélica Cirolini²

Alexandre Felipe Bruch³

RESUMO

Em razão do aumento significativo no número de desastres ambientais no sul do Brasil e da dificuldade encontrada para determinar as causas desses, faz-se necessário que medidas preventivas sejam adotadas. Neste contexto, a gestão e o planejamento ambiental hoje possuem um importante aliado no geoprocessamento, visto que o uso de geotecnologias e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permitem a integração de diversas informações. Desta forma, os SIG são utilizados, neste trabalho, como recurso no estudo das fragilidades ambientais na sub-bacia hidrográfica do Rio Rolante, no nordeste do estado do Rio grande do Sul, a metodologia empregada basea-se em Ross (1994), desta forma, atribuiu pesos aos diferentes parâmetros (meio físico, biótico e socioeconômico) e os definiu-se através da aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no *software* QGIS. Os resultados obtidos atestam para a dinâmica homem-natureza e mostram a importância da seleção e ponderação dos atributos utilizados no método AHP. O mapa final gerado também permitiu verificar que as áreas mais frágeis ambientalmente, que se localizam a jusante e a montante do Rio Rolante e possuem influências maiores da declividade e do tipo de solo, condicionadas pelo uso do solo e grau de fraturamento dos maciços rochosos.

Palavras chave: Sistema de Informação Geográfica, análise multicritério, gestão de desastres, Fragilidade Ambiental.

ABSTRACT

Hierarchical Process Analysis Method (AHP) Applied to Environmental Fragility of the Rolante River sub-basin, Brazil. Due to the significant increase in the number of environmental disasters in southern Brazil and the difficulty encountered in determining their causes, it is necessary that preventive measures be adopted. In this context, management and environmental planning today have an important ally in geoprocessing, since the use of geotechnologies and Geographic Information Systems (GIS) allow the

1 Graduada em engenharia geológica pela Universidade Federal de Pelotas (2019), mestrado em andamento em Recursos Hídricos-UFPel (2020-2022), atuando nas áreas de Sensoriamento Remoto e geotecnologias. E-mail: <elisandrah.fonseca@gmail.com>.

2 Possui graduação em Geografia Licenciatura Plena pela Universidade Federal de Santa Maria (2004), mestrado em Geografia pela Universidade Federal de Santa Maria (2008) e doutorado em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3 Graduado em Geografia pela UFPEL (2007), Mestre (2009) e Doutor (2015) em Geografia com ênfase em Análise Ambiental pelo PPGGEA/UFRGS e especialista em Informações Espaciais Georreferenciadas com ênfase em Agrimensura pela UNISINOS (2018).

integration of various information. In this way, GIS are used, in this work, as a resource in the study of environmental weaknesses in the Rolante River sub-basin, in the northeast of the state of Rio Grande do Sul, the methodology used is based on Ross (1994), thus weights were assigned to the different parameters (physical, biotic and socioeconomic environment) and defined through the application of the Hierarchical Analysis Process (AHP) in the QGIS software. The results obtained attest to the man-nature dynamics and show the importance of selecting and weighing the attributes used in the AHP method. The final map generated also allowed verifying that the most environmentally fragile areas, which are located downstream and upstream of the Rolante River and have greater influences of the slope and the type of soil, conditioned by the use of the soil and the degree of fracturing of the rock masses.

Keywords: Geographic Information System, multicriteria analysis, disaster management, Environmental Fragility.

INTRODUÇÃO

A adoção de análises geoespaciais como ferramentas de monitoramento e mitigação de desastres ambientais é indispensável (Watson e Agbola, 2013). Comumente ambientada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), essas análises têm sido amplamente utilizadas como ferramentas de decisão que auxiliam na gestão e no planejamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas (Ogato et al., 2020). É vital avaliar o papel do SIG como um recurso potencializador de integração de dados, já que possibilita uma visão mais ampla e multitemporal, proporcionando identificação sinóptica dos fatores responsáveis direta ou indiretamente por esses fenômenos adversos (Wang e Xie, 2018). Aliar abordagens analíticas como o de fragilidade ambiental, tem se mostrado promissor, uma vez que, que integra os aspectos naturais e antrópicos de uma região (Macedo et al., 2018).

No geral, entende-se que fragilidade ambiental, seja a suscetibilidade do meio a sofrer rupturas em seu equilíbrio natural, sendo sua aplicação frequentemente realizada através de uma análise multicriterial (Manfré et al., 2013). A metodologia de fragilidade foi inicialmente construída em 1994 e consiste em atribuir pesos aos diferentes parâmetros (meio físico, biótico e socioeconômico) (Ross,1994). Ao utilizar modelos baseados em árvore de decisão, obtém-se análises espaciais atraentes, que dão origem a mapas qualitativo e quantitativo. E a integração dessas informações é feita da seguinte maneira, cada pixel dos mapas intermediários de fragilidade são somados, atribuindo um novo valor final ao pixel (Nefeslioglu et al., 2010). Recentemente, essa metodologia que alia

fragilidade aos métodos AHP vem sendo utilizado e tem gerado bons resultados (da Silva Anjinho et al., 2020). Então, justifica-se aplicar essa metodologia na porção do alto Sinos, a respeito de historicamente, essa sub-bacia , sofrer com episódios intensos e periódicos de inundação, erosão e deslizamentos, que possivelmente estejam relacionados à urbanização acelerada, alta declividade, entre outros fatores naturais e antrópicos da região.

Neste artigo, considerou-se uma abordagem baseada em lógica analítica hierárquica de processos (AHP) para a elaboração de mapas de fragilidade ambiental na sub-bacia hidrográfica do Rio Rolante, Rio grande do Sul, Brasil. A contribuição deste trabalho, por fim, a geração do mapa de

fragilidade permitiu identificar e oferecer à comunidade, órgãos públicos e a defesa civil

orientações quanto às áreas mais suscetíveis e frágeis ambientalmente, auxiliando assim nas respostas aos desastres ambientais.

MATERIAIS E MÉTODOS

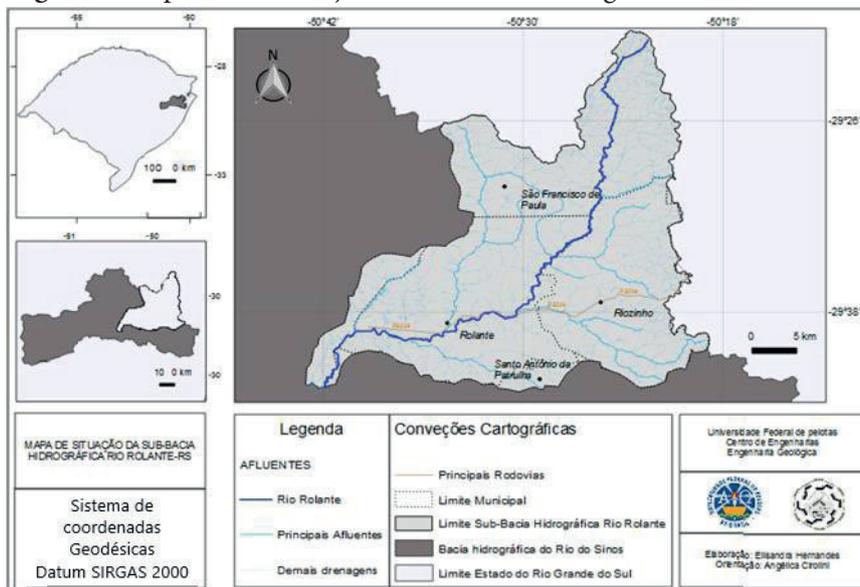
Caracterização da Área de Estudo

A sub-bacia hidrográfica do rio Rolante é uma bacia do rio Sinos, situada no noroeste da Serra Sul-Rio-Grandense, está entre as coordenadas geodésicas de 29°20' e 30°00' de latitude Sul e 50°18' e 51°00' de longitude Oeste. Possui uma área de, aproximadamente, 816 km², abrangendo os municípios de Rolante, São Francisco de Paula, Riozinho e uma pequena porção de Santo Antônio da Patrulha, como mostra o mapa da Figura 1.

A nascente do rio Rolante está localizada no município de São Francisco de Paula, a 120km de Porto Alegre. Em extensão, o rio Rolante é o mais importante afluente do rio Sinos, e as diferenças de cota entre a sua nascente e sua foz são superiores a 900 metros (Penteado, 2011). A sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante encontra-se numa região transicional entre o Planalto de Cima da Serra e a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Essa porção do estado está sujeita naturalmente a uma condição de instabilidade geomorfológica, podendo ser um fator preponderante nos movimentos de massa (Dantas e Ribeiro, 2010). A montante da sub-bacia, o relevo encontra-se mais elevado com

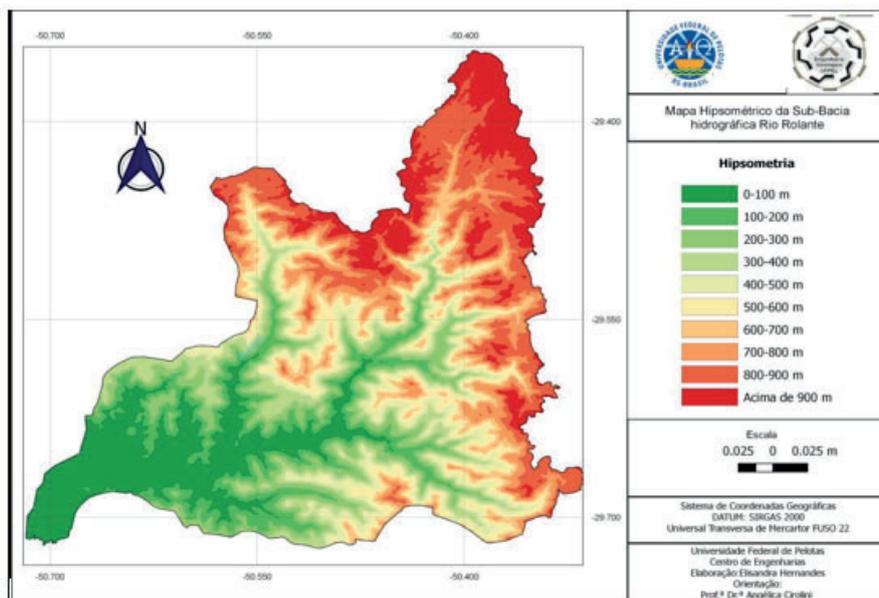
vales e encostas de altitudes maiores que 980m e a jusante planícies com cota de 20m, sendo essas mais extensas e formando meandros que contribuem para as inundações.

Figura 1. Mapa de Localização da sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante.



Fonte: Autor, Base de dados FEPAM-RS

O mapa de hipsometria (Figura 2) ilustra a grande diferença de cotas na sub-bacia o que também contribui para o aumento do fluxo das águas do rio Rolante.

Figura 2. Mapa hipsométrico da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Rolante

Eventos Extremos

O rio Rolante é um importante afluente do rio Sinos, localizado na sua porção a jusante, e historicamente são atribuídos a ele eventos de inundações e deslizamento, isso deve-se em parte a ocorrência de precipitações intensas somadas às características geomorfológicas, alta declividade do terreno e características do solo. Além destas particularidades, as áreas urbanas da sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante localizam-se em uma das planícies de inundação do Rio Sinos, ou seja, área propícia a cheias próximas aos cursos d'água, e essas ocupações das encostas geram também vários cortes e aterros, contribuindo para que os movimentos de massa ocorram. As maiores inundações ocorreram nos anos de 1906, 1936, 1956, 1982 (Petry, 2003). Além destas, um episódio histórico de inundação ocorreu em janeiro de 2017, sendo os mais significativos os ocorridos em 1982 e em 2017.

Atenta-se aqui para o evento de janeiro de 2017, um evento hidrometeorológico extremo, que resultou em escorregamentos no município de São Francisco de Paula como mostra Figura 3, e enxurradas nos municípios de Rolante e Riozinho.

Figura 3. Cicatrizes de escorregamento na BHRR, 05 de janeiro de 2017.



Fonte: (Pelotão de Polícia Ambiental de Canela,2017).

A enxurrada foi responsável por atingir cerca de 15 mil pessoas, a intensidade da água conseguiu alagar cerca de 70% da cidade de Rolante, atingindo áreas sem precedentes, arrastando carros e danificando a ERS-239, principal acesso ao município. Segundo à comunidade não era habitual eventos desta magnitude. Os detritos somados as drenagens e chuva intensa, transformaram- se em fluxos de detritos, responsáveis por destruir casas, interromper o abastecimento de água nos municípios a jusante, matar o gato e devastar lavouras, além disso, causou o desabrigo de mais de 300 famílias (Sema e Gpden, 2017). Eventos como este geram grande comoção na comunidade atingida, alertando mais uma vez sobre a importância de medidas que reduzam os danos sofridos e proporcionem respostas a esses eventos adversos.

Dados

Coleção de dados pré-existent

Inicialmente, através da etapa de gabinete, foram levantados dados vetoriais e matriciais acerca dos aspectos relevantes do meio físico local. As imagens de satélite foram obtidas através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para a análise do Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizou-se a altimetria do sensor radar interferométrico *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30x30m, obtidas na página do INPE, projeto TOPODATA. O processamento digital das cenas incluiu: geração de mosaico, verificação de ocorrência de valores de altitude negativos e existência de erros. O MDE, no formato raster, foi trabalhado no algoritmo *Slope do QGIS*, extensão dos recursos *GRASS* e *GDAL/OGR*.

Ainda nessa fase inicial, para coleta de dados, foi elaborado um questionário contendo dez questões, a fim de proporcionar um espaço para que a comunidade pudesse descrever os eventos adversos ocorridos no município de Rolante, esse que é o mais atingido pelas inundações. As questões foram enviadas através do formulário *Google Forms*, via grupos de redes sociais da comunidade local. Esta alternativa possibilitou delimitar as áreas mais atingidas pelos eventos e os anos em que mais ocorreram, bem como o entendimento dos desastres sob o ponto de vista de quem foi mais atingido por ele. Feita a elaboração dos mapas

intermediários e a verificação dos questionários iniciais, foi possível delimitar a melhor abordagem de campo a fim de obtenção de dados mais fidedignos para representar a sub-bacia hidrográfica do Rio Rolante.

Dados de campo

Em campo, foi realizada a checagem dos dados prévios e dos mapas fundamentais. Nesta oportunidade, foram coletadas amostras deformadas de solo, aquelas em que há quebra da estrutura, e rochas a jusante e a montante do rio Rolante. Para coleta de informações espaciais, utilizou-se o receptor de sinal GPS, modelo etrex 30, e para coleta do solo e rocha utilizou-se de pá, saco de ráfia, sacos plásticos (30X10cm) e martelo petrográfico. Na etapa de campo, as coletas ocorreram em 9 pontos distintos, e a escolha da localização dos pontos baseou-se nos limites entre unidades litológicas, geomorfológicas, pedológicas, tendo em comum esses pontos a proximidade dos afluentes do Rio Rolante. No último ponto (ponto 9) de coordenadas de 29°30'15,75" de latitude Sul e 50°22'21,65" de longitude Oeste, foi recolhido material proveniente da cicatriz de escorregamento, um Neossolo pouco espesso, com bastante matéria orgânica, de cor marrom escuro, coletado diretamente do sopé do morro.

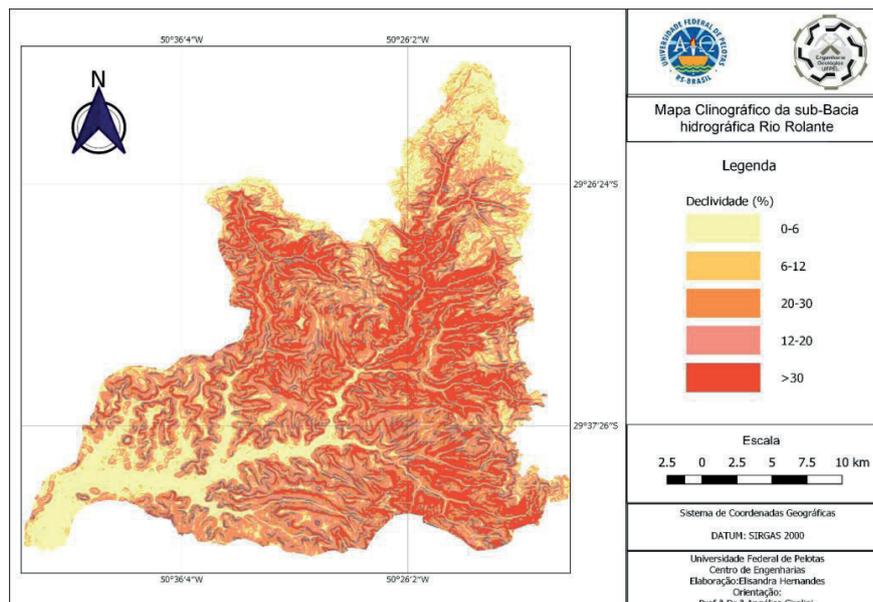
Caracterização Fisiográfica da Área

A caracterização fisiográfica da área em estudo leva em consideração os parâmetros físicos de relevo, pedologia, geologia, uso do solo e urbanização.

Relevo

A sub-bacia hidrográfica Rio Rolante possui algumas das maiores declividades da Bacia Rio do Sinos, cerca de 60% da área total apresenta valores superiores a 30%, evidenciando desta maneira, um relevo dissecado e declivoso. A classificação adotada aqui para a declividade parte da metodologia de Ross (1994), segundo o autor as classes associam valores de fragilidade referente aos riscos de escorregamentos e/ou deslizamentos e inundações. Sendo assim, as classes de declividade ficam divididas em: menores 6%, indicando grau de declividade muito baixo; de 6 a 12%, grau fraco; de 12 a 20%, médio; 20 a 30%, forte; e acima de 30%, declividade muito forte (Figura 4). A região a montante da sub-bacia possui altas declividades e mais a jusante declividades mais fracas, estando a velocidade do escoamento superficial bastante ligada a declividade entende-se que altas velocidades de fluxo são esperadas na porção central, com presença de cachoeiras, e pode acarretar em erosões a montante e inundações a jusante da sub-bacia (Villela e Mattos, 1975).

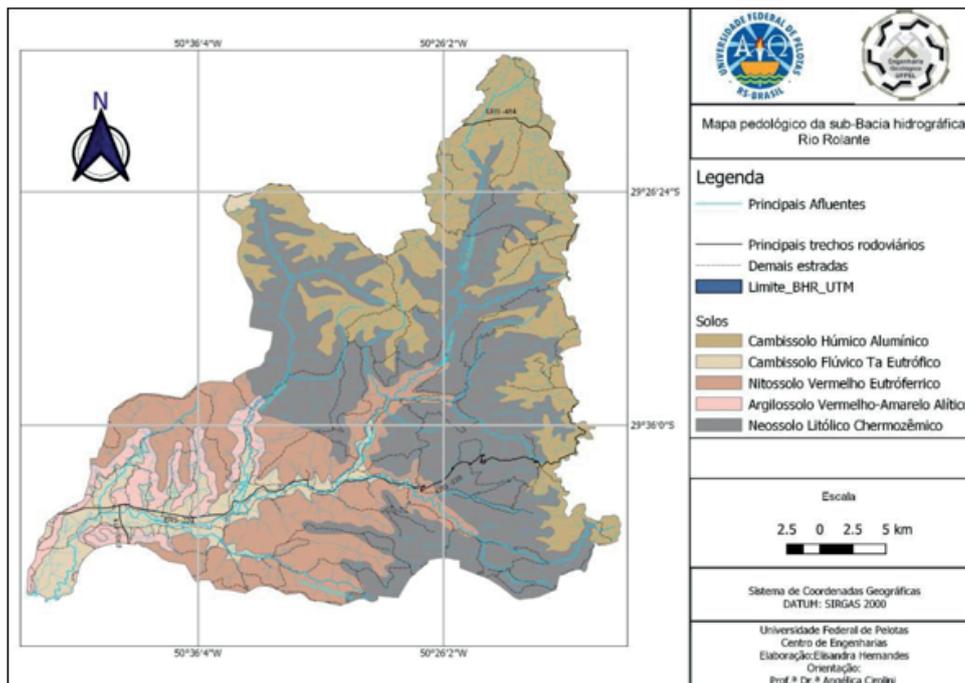
Figura 4. Mapa clinográfico da sub-bacia Hidrográfica Rio Rolante.



Pedologia

A área de estudo engloba cinco unidades de solo, sendo elas Cambissolo húmico alumínico, Cambissolo Eutrófico, Nitossolo vermelho eutrófico, Argissolo vermelho-amarelo alíticos e Neossolo litólico chernozêmico, conforme ilustrado na Figura 5.

Os Cambissolos húmico alumínicos afloram à montante da sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante, são solos minerais que possuem horizonte B incipiente, sob horizontes de grande quantidade de matéria orgânica, possuem uma textura média mais fina e pouca evolução pedogênica. É comum também nesse tipo de solo a presença de muitos fragmentos de rocha, outra característica da fase inicial de intemperismo, além disso, possui elevados teores de alumínio no solo afetando significativamente o desenvolvimento de raízes (UFSM e SEMA-RS, 2001).

Figura 5. Mapa pedológico pertencente à sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante.

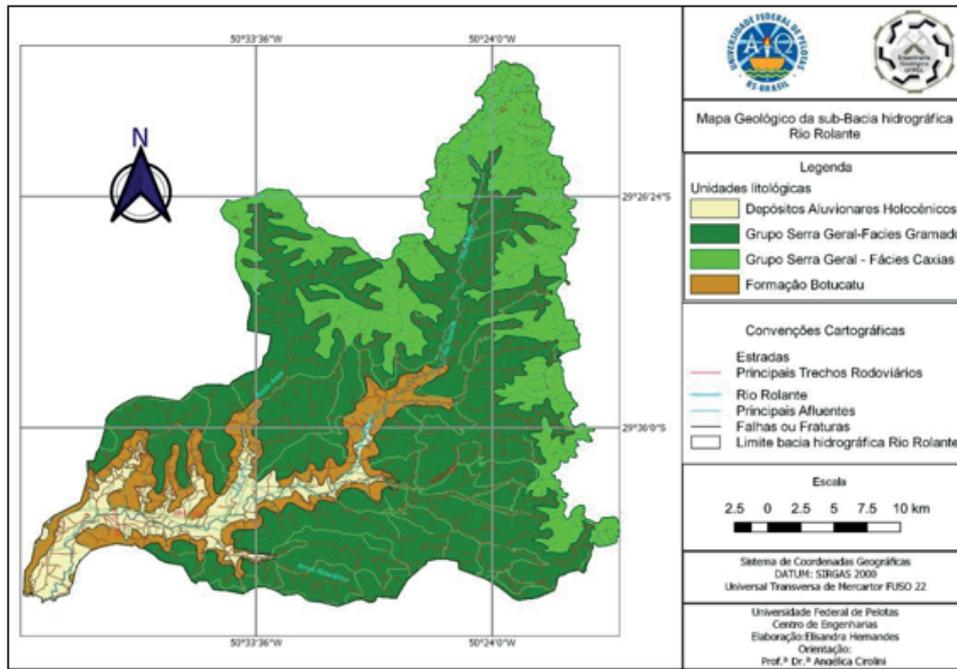
A unidade representada pelos Nitossolos vermelho eutróficos, ocupa 40% da área de estudo, e é caracterizada por solos minerais, argilosos a muito argilosos, estruturado em blocos bem desenvolvidos, derivados de rochas básicas e ultrabásicas, com distinção de horizontes pouco visível, e normalmente com cerosidade e contração com perda de umidade (AGEITEC, 2017). Entretanto, a maioria dos escorregamentos ocorridos na sub-bacia, ficaram a cargo da unidade dos Neossolos litólicos chernozêmicos, esses são caracterizados pela presença em áreas de relevo mais acidentados e dissecados, e são solos constituídos de material mineral, de cor escura, com alta saturação por bases, pouco desenvolvidos, rasos, e com horizonte diretamente assentados sobre a rocha ou um raso horizonte C (UFSM e SEMA-RS,2001; SEMA e GPDEN, 2017).

Geologia

A área de estudo está localizada no nordeste do estado do Rio Grande do Sul e é composta por arenitos da Formação Botucatu, encobertos por derrames basálticos da Formação Serra Geral (FSG), particularmente das Fácies Gramado e Caxias (ambas Formações pertencentes à Bacia do Paraná).

Como ilustra a Figura 6 na área de estudo afloram as fácies Gramado e Caxias que pertencem a Formação Serra Geral, representam respectivamente, basaltos de 132 milhões de anos, granulares, finos a médios, melanocráticos; e na Fácies Caxias, rochas intermediárias a ácidas com idade de 131 milhões de anos, granulares finas (Modena et al., 2014). Essas rochas encontram-se altamente fraturadas devido ao rifting do atlântico, que foi responsável pela abertura do Atlântico Sul e ruptura e espalhamento dos “fragmentos” gondwânicos e separação das bacias do Paraná (Melfi et al., 1988).

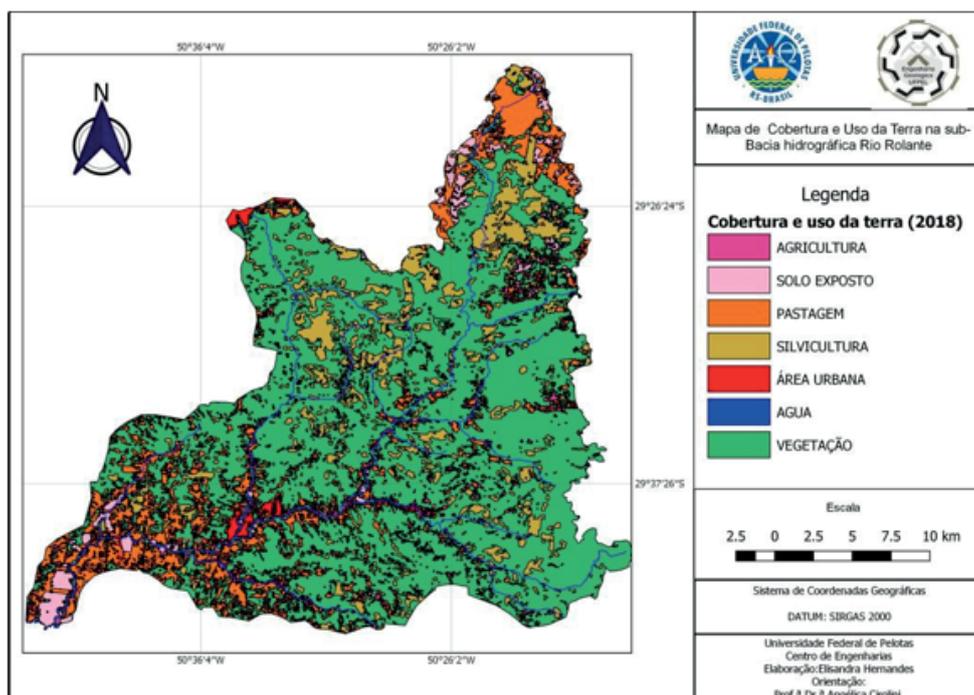
Figura 6. Mapa geológico da sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante.



Uso do solo e Urbanização

A porção do Alto Sinos, que engloba a região da área de estudo, possui ocupação rarefeita e o uso do solo é predominantemente rural, vinculado à agropecuária (PROSINOS, 2019). Os dados de imagens foram obtidos através do projeto MapBiomias, que tem por finalidade mapear anualmente a cobertura e uso do solo do Brasil e monitorar as mudanças no território. O mapa exposto na Figura 7 ilustra uma área de mais de 72% de vegetação, 8% de Silvicultura, 6 % de pastagens, 6 % água, 4% Solo Exposto e 4% de Área urbana.

Figura 7. Mapa de Uso e Cobertura de Terra da sub-bacia hidrográfica Rio Rolante.



Fragilidade Ambiental

A metodologia empregada nesta pesquisa baseou-se na análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados (Ross, 1994). A metodologia sugere estudos prévios quanto ao relevo, solo, uso e cobertura da terra e geologia. Para a avaliação ambiental dessas distintas variáveis, atribui-se pesos, sendo assim, cada parâmetro avaliado é notificado quanto à sua fragilidade, classificada como muito fraca, fraca, média, forte e muito forte. Então, o mapa final de fragilidades ambientais resulta da soma das fragilidades de cada parâmetro em relação à área. Para a declividade ficam estabelecidos os pesos descritos na Tabela 1, sendo lógico que quanto maior a declividade maior será o grau de fragilidade ambiental.

Tabela 1. Pesos atribuídos as classes de Fragilidade

Classes de declividade	Grau de Fragilidade Ambiental	Peso
0 a 6	Muito Fraco	1
6 a 12	Fraco	2
12 a 20	Médio	3
20 a 30	Forte	4
>30	Muito Forte	5

Fonte: Adaptado (Ross, 1994).

Para o uso do solo, as classes expostas na Tabela 2 foram baseadas na metodologia de Ross, porém os pesos foram escolhidos em razão da área de estudo. As áreas urbanas possuem alta fragilidade como exposto anteriormente (Eventos extremos em Rolante) e as zonas onde há predominância de mata ciliar possuem menor fragilidade.

Tabela 2. Graus de fragilidade do uso e cobertura do solo.

Uso e Cobertura do Solo	Grau de Fragilidade Ambiental	Peso
Vegetação	Muito Fraco	1
Água	Fraco	2
Agricultura	Médio	3
Silvicultura	Médio	3
Pastagem	Médio	3
Área Urbana	Forte	4
Solo Exposto	Muito Forte	5

Fonte: Adaptado (Ross, 1994).

Quanto à geologia, foi determinado o grau de fragilidade com base em antigos deslizamentos, tendo ocorrido mais episódios de deslizamentos nos basaltos fraturados das Fácies Gramado como apresenta a Tabela 3.

Tabela 3. Graus de fragilidade a partir da geologia.

Geologia	Grau de Fragilidade Ambiental	Peso
Depósitos Aluvionares	Fraco	2
Depositos Aluvionares e Coluvionares	Fraco	2
Arenitos-Formação Botucatu	Médio	3
Basaltos-Fácies Caxias	Forte	4
Basaltos-Fácies Gramado	Muito Forte	5

Fonte: Adaptado de (Ross, 1994).

Para o solo foram delimitadas as classes e identificadas a classificação de Ross (1994), tabela 4.

Tabela 4. Graus de fragilidade dos solos

Solos	Grau de Fragilidade Ambiental	Peso
Nitossolos	Médio	3
Cambissolos	Forte	4
Argissolos	Forte	4
Neossolos	Muito Forte	5

Fonte: Adaptado (Ross, 1994).

Método AHP de Saaty

O AHP é um método de análise multicriterial que baseia-se em um processo de ponderação ativa, onde diversos parâmetros importantes são estruturados de forma hierárquica relacionando a significância relativa de cada parâmetro. O AHP foi inicialmente desenvolvido como ferramenta de apoio a decisões sobre problemas complexos (Saaty,1991). Quando existem muitos fatores que contribuem para algum evento, por exemplo, neste trabalho os deslizamentos e inundações ocorrem derivados das características dos solos, relevo, geologia e uso do solo, então usa-se o AHP para determinar a contribuição relativa de cada um nesses eventos. Para a elaboração do mapa de fragilidade foram seguidas as etapas do método AHP (Silva e Nunes,2009).As etapas de 1 a 4 são respectivamente: Estruturação da Hierarquia de Decisão , Construção da Matriz de Comparação Pareada, Verificação do índice de consistência e Definição do valor da importância relativa (peso) de cada fator (solo, geologia, declividade e uso).

A partir da 5ª etapa, os autores sugerem que sejam feitas as classificações de prioridades, mas neste trabalho optou-se por relacionar o valor do peso relativo às classes de Fragilidade estabelecidas por Ross, sendo então o método AHP uma ferramenta que permitiu reclassificar os valores de cada classe (ex.: neossolo, declividade baixa, etc.), por meio da multiplicação do valor obtido por AHP de importância do atributo. Na Tabela 5, ilustra-se uma medida Saaty(1978), que definiu alguns valores para importância relativa do método AHP.

Tabela 5. Escalas de Valores AHP para Comparação Pareada.

Importância	Definição
1	Importância Igual: Fatores contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância Moderada: Um fator é ligeiramente mais importante que o outro.
5	Importância Essencial: Um fator é claramente mais importante que o outro.
7	Importância Demonstrada: Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância é comprovada.
9	Importância Extrema: A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível.
2,4,6,8	Valores Intermediários entre Julgamentos: Possibilidade de compromissos adicionais.

Na Tabela 6., os valores já são comparados, definindo-se a importância de um dos parâmetros em relação ao outro, envolvidos na fragilidade ambiental da sub-bacia Hidrográfica Rio Rolante. Definiu-se que a declividade é o fator mais importante em relação aos demais, entende-se assim, pelo fato de que independente de se ter solo exposto, um solo de alta fragilidade ou uma rocha bastante fraturada, sem a existência de alta declividade. Esses não seriam grandes problemas para movimentação de massa e inundação na região de estudo. Para a verificação do índice de consistência, de acordo com Saaty (1991), é necessário fazer a normalização dos dados e isso se faz por meio de autovetores e autovalores. A coluna Multi é feita pela multiplicação dos dados de cada linha, e o autovetor (Av) é dado pela média geométrica que é $[\text{Multiplicação da Linha}/n]$, o autovetor normalizado corresponde à divisão de cada autovetor pelo seu somatório (ΣAv).

Tabela 6. Comparação Pareada.

Correlação Pareada		
A	B	Importância
Declividade	Declividade	1
Declividade	Solo	5
Declividade	Uso	7
Declividade	Geologia	9
Solo	Solo	1
Solo	Uso	1 2/5
Solo	Geologia	1 4/5
Uso	Uso	1
Uso	Geologia	1 2/7
Geologia	Geologia	1

Por fim, a partir do autovalor normalizado é possível obter o parâmetro de maior influência em porcentagem (%). Para este trabalho foi dado a maior importância para a declividade, posteriormente o solo, tipo de uso e „por último a geologia. Esses valores foram então multiplicados pelos pesos atribuídos à Fragilidade de Ross (1994), gerando novos pesos que foram atribuídos às classes influência na fragilidade ambiental.

Método matrizes - software

A álgebra dos mapas foi realizada com auxílio do *Spring*, através da Ferramenta LEGAL, que permite a interpretação e manipulação de dados espaciais, a partir do somatório de diversas informações, simulando o ambiente real. Depois de aplicado a ponderação das classes, as mesmas são somadas através da operação matemática Soma. A Soma consiste em realizar o cálculo algébrico em cada pixel, atribuindo um novo valor a ele, por exemplo, numa área onde o uso é agricultura, a geologia é composta por Arenitos Botucatu, com Declividade de 10% e a classe de solo é o Neossolo, tem-se a soma de $[(0,3+0,24+1,38+0,7) = 2,62]$ este é o novo valor do pixel. Por último, é feita a instanciação operada pelos algoritmos Recuperere e Novo. Após isso os dados foram exportados para o *Qgis* onde foi realizada a manipulação do mapa final com suas 5 classes de fragilidade ambiental.

RESULTADOS*Matrizes*

A normalização dos dados foi feita por meio de autovetores e autovalores. A coluna Multi é feita pela multiplicação dos dados de cada linha, e o autovetor (Av) é dado pela média geométrica que é [Multiplicação da Linha/n], o autovetor normalizado corresponde à divisão de cada autovetor pelo seu somatório (ΣAv), pois anteriormente esse dado é transformado em porcentagem e arredondado (Saaty,1991).O valor de RC obtido é de 0,006, demonstrando coerência dos resultados, visto que o requisito é que o RC seja inferior a 0,10 para considerá-lo adequado na matemática de mapas. A partir do autovalor normalizado é possível obter o parâmetro de maior influência em porcentagem (%).Esses valores foram então multiplicados pelos pesos atribuídos à Fragilidade de Ross (1994), gerando novos pesos agora atribuídos quanto a classe influência na fragilidade ambiental, como exposto na tabelas 7 abaixo. Os novos valores de pixel foram espacializados em um mapa temático, onde valores mais altos indicam maior fragilidade.

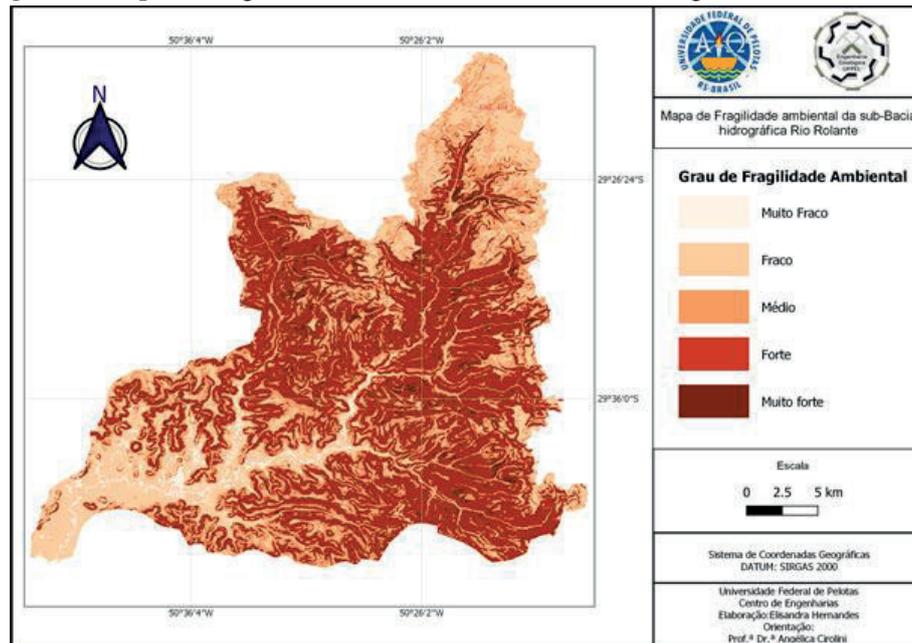
A partir do produto cartográfico, é possível identificar que mais de 60% da área total da sub bacia apresenta alto grau de fragilidade ambiental, identificando um padrão alto de fragilidade e a porção onde esses valores são menores encontra-se junto ao leito do rio. Os valores mais altos de fragilidade estão localizados a montante da sub-bacia onde ocorrem as maiores diferenças altimétricas. Já mais próximo à foz, onde localizam-se as cidades de Riozinho e Rolante, as fragilidades ambientais são menores, contrariando o que era esperado.

Tabela 7. Novos pesos resultantes da reclassificação dos atributos.

Tipo	Classes	Pesos	Normalização	Peso Final
	0-12	1	0,69	0,69
	6-12	2	0,69	1,38
Declividade	12-20	3	0,69	2,07
	20-30	4	0,69	2,76
	>30	5	0,69	3,45
	Depósitos Aluvionares	2	0,14	0,28
	Depositos Aluvionares e Coluvionares	2	0,14	0,28
Geologia	Arenitos-Formação Botucatu	3	0,14	0,42
	Basaltos-Fácies Caxias	4	0,14	0,56
	Basaltos-Fácies Gramado	5	0,14	0,70
	Vegetação	1	0,1	0,10
Uso e Cobertura Do Solo	Água	2	0,1	0,20
	Agricultura	3	0,1	0,30
	Silvicultura	3	0,1	0,30
	Pastagem	3	0,1	0,30
	Área Urbana	4	0,1	0,40
	Litossolo	3	0,8	2,40
Solos	Cambissolo	4	0,8	3,20
	Argilossolo	4	0,8	3,20
	Neossolo	5	0,8	4,00

Após todas as etapas de processamento antes mencionadas, foi realizada a elaboração do mapa final de Fragilidade Ambiental, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9. Mapa de fragilidade ambiental da sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante



DISCUSSÃO

O fator declividade foi definitivo, uma vez que a área possui uma declividade acentuada, resultando até mesmo em semelhança entre os dois mapas (Figura 11 e Figura 16). A porção central da área de estudo é a que apresenta graus mais altos de fragilidade, sendo nesta área onde encontram-se as maiores diferenças altimétricas e onde ocorrem os solos mais suscetíveis à erosão, os Neossolos. O fluxo de detritos ocorrido em janeiro de 2017, foi originado da alta pluviosidade somada ao deslizamento de solo e rocha de uma área de alto grau de Fragilidade ambiental, alertando a instabilidade implícita dessas regiões. A predominância de altas fragilidades na sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante deve-se em grande parte a duas razões principais, altas declividades somadas a solos pouco desenvolvidos e rasos, não sendo, o uso e a geologia tão preponderantes nesse mapeamento.

Os resultados obtidos através desta pesquisa demonstram o predomínio de altos graus de Fragilidade ambiental na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Rolante, sendo que, através do método AHP e da álgebra de mapas, foi possível uma visão integrada de cada influência no grau de fragilidade, colaborando assim, na inferência de que a declividade e os solos são os fatores mais preponderantes. Atenta-se aqui que segundo a Lei federal Nº 6766/79, áreas com declividade maior que 30%

são inapropriadas para a urbanização pela sua alta suscetibilidade à erosão e movimentações de massa e instabilidade das encostas vinculada à supressão da vegetação. Tanto as áreas urbanas de Rolante como de Riozinho, estão em baixas declividades e, como visto na seção de resultados, não era o esperado, porém essas áreas encontram-se margeadas por diferenças altimétricas abruptas das quais recebem altas energias que, ao não serem dissipadas, invadem rapidamente essas zonas potencializando as fragilidades nesses locais explicando assim o que poderia ser reconhecidos como áreas potencialmente frágeis.

O Neossolo, um solo raso sobreposto a uma rocha basáltica altamente fraturada, na porção a montante da sub-bacia somado a alta declividade torna vulnerável o local, já que permite infiltração

tornando a região não instável, apesar da paisagem ser composta em sua grande maioria por vegetação apresenta grau baixo de fragilidade. Apesar da subjetividade quanto à classificação através do método AHP as comparações pareadas auxiliam no refinamento da consistência dos julgamentos de modo a aumentar o número de informações disponíveis e a validade do mapeamento.

CONCLUSÕES

Observou-se que as áreas de maior fragilidade são as que possuem altas declividades, solos expostos de classe neossolo e basaltos fraturados da Formação Gramado, sendo esses locais mais suscetíveis aos processos erosivos e perda de solo. Dentre os solos ensaiados, os que mostraram pior comportamento geotécnicos frente aos ensaios foram os pontos localizados na porção central da área de estudo, mais especificamente os pontos 4 e 5. O ponto 4, por se tratar de um solo não laterítico, fracamente plástico com rápida saturação, e altos teores de areias, são solos não resistentes à erosão fluvial e pluvial. E nos Pontos 5a e 5b, observa-se um solo não laterítico, altamente plástico, com contração diametral alta, rápida saturação e expansão, quando submetidos a ação da água.

Essas análises são coerentes com as classes de fragilidade ambiental e ajudam a entender o comportamento dos solos a jusante da sub-bacia do Rio Rolante. São necessárias ainda outras metodologias para estudo dos solos pouco desenvolvidos a montante da sub-bacia, e outros ensaios para correta caracterização geomecânica dos solos da sub-bacia, como resistência ao cisalhamento.

Ademais, a ocupação predominante de áreas urbanas reflete fragilidades mais baixas no contexto natural, mas que se avaliadas do ponto de vista do risco, apresentam altos riscos já que são áreas posicionadas imediatamente ao final das encostas de alta declividade, estando sujeitas a serem atingidas pelos escorregamentos.

Compreende-se, que o conjunto das possibilidades oferecidas pelo SIG associadas às metodologias de análise multicriterial facilitam a avaliação ambiental, já que permitem delimitar regiões integrando seus diversos aspectos, proporcionando uma visão aproximada da realidade. Diante dessa análise, ao indicar fatores que mais induzem os desastres na sub-bacia, permite-se então iniciar a busca por soluções viáveis para resolver o problema.

REFERÊNCIAS

AGEITEC (2017) - Solos Tropicais. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000fzyjaywi02wx5ok0_q43a0r9rz3uhk>. Acesso em 05 dez. 2020.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. 2001. **Introdução à ciência da geoinformação**.

INPE, São José dos Campos, 345p.

DA SILVA ANJINHO, P., et al. 2020. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. **Land Use Policy**, v. 100, p. 104946.

- DANTAS, T. V. P.; RIBEIRO, A. S. 2010. Caracterização da vegetação do Parque Nacional Serra de Itabaiana, Sergipe – Brasil. **Biotemas**, 23, n. 4, p. 9-18.
- MACEDO, D. R. et al. 2018. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. **Science of the Total Environment**, 635, p. 1267-1279.
- Manfré, L.A. et al. 2013. Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region). **Environmental Earth Sciences**, 69, p.947-957.
- MELFI, A.J., PICCIRILLO, E.M., NARDY, A.J.R. 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin (Brazil). An introduction. In: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. N(Eds.) **The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects**. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, USP, p. 1-13
- MILES, R.E.; SNOW, C. C. 1984. Designing strategic human resources systems. **Organizational dynamics**, 13, n. 1, p. 36-52.
- Modena, R. C. C. et al. 2014. Diferenciação de rochas vulcânicas da formação serra geral utilizando gamaespectrometria terrestre na região vitivinícola Serra Gaúcha, RS-Brasil. In Embrapa Uva e Vinho-Resumo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 47.2014, Salvador, BA.
- NEFESLIOGLU H.A. et al. 2010. Assessment of landslide susceptibility by decision trees in the metropolitan area of Istanbul, Turkey. **Mathematical Problems in Engineering**, 2010.p.1-15.
- OGATO, G. et al. 2020. Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 27, p. 100659.
- PENTEADO, F. A. de. 2011. **Mapeamento e Análise Geomorfológicas como Subsídio para Identificação e Caracterização de Terras Inundáveis. Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do rio dos Sinos – RS**. Tese (doutorado em Geografia Física). Universidade de São Paulo.339p.
- PETRY, O.G. 2003. **Cartografia das áreas de risco no Rio Rolante-RS e estratégias de recomposição da mata ciliar**. Dissertação(mestrado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul,132p.
- PROSINOS. Caracterização Socioambiental da região da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. Disponível em: <<http://www.portalprosinos.com.br/conteudo.php?id=bacia>>. Acesso em 14 set. 2019.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, n. 8, p. 63-74,1994.
- SAATY, T. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **JOURNAL OF Mathematical Psychology**, 15, p. 234-281.
- SAATY, T. 1991. **Método de Análise Hierárquica**, São Paulo : MAKRON Books,p.83-98.
- SEMA; GPDEN/IPH/UFRGS. 2017. Diagnóstico preliminar. Departamento de Recursos Hídricos da SEMA e Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais do IPH/UFRGS. Porto Alegre DRH/SEMA. Disponível em: <http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico_preliminar_gt_rolante_revfinal.pdf>. Acesso em 10 dez. 2020.
- SENA, J. N. 2008. **O Uso de Sistema de Informação Geográfica na Avaliação de Diferentes Alternativas de Geração de Cartas de Suscetibilidade à Erosão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira – São Paulo,114p.
- SILVA, C.A.; NUNES, F. P. 2009. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. INPE, 2009.
- UFSM;SEMA-RS. Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul. Santa Maria:UFSM/SEMA- RS. Disponível em<<http://www.ufsm.br/ifcrs>>. Acesso em 11 de nov. 2020.
- VILLELA, S.M.; MATTOS, A. 1975. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil,247p.

WANG, X.; XIE, H. 2018. A review on applications of remote sensing and geographic information systems (GIS) in water resources and flood risk management. **Water**, **10**, n. 5. p 1-11.

WATSON, V. 2009. Seeing from the South: Refocusing urban planning on the globe's central urban issues. **Urban Studies**, **46**, n. 11, p. 2259-2275.