



Uso da geomorfometria na identificação de áreas prioritárias de proteção e recuperação vegetal para preservação de mananciais

The use of geomorphometry to identify priority areas for protection and vegetation recovery for the preservation of water sources

Helton Santos de Souza¹ , Francisco de Assis Dourado da Silva¹ 

¹Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mails: heltongeo83@gmail.com, fdourado@cepedes.uerj.br, fdourado@uerj.br

Como citar: Souza, H. S., & Silva, F. A. D. (2022). Uso da geomorfometria na identificação de áreas prioritárias de proteção e recuperação vegetal para preservação de mananciais. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19, e17. <https://doi.org/10.21168/rega.v19e17>

RESUMO: Diante da necessidade de garantir água de qualidade e em quantidade para as gerações do presente e do futuro, a proteção de mananciais de abastecimento público torna-se cada vez mais importante. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor um método de análise que, a partir dos parâmetros geomorfométricos de uma bacia hidrográfica, seja possível estabelecer um subsídio adicional a identificação de áreas com aptidão para realização de projetos que busquem a manutenção, conservação e recuperação natural da vegetação de mananciais e desta forma considera-las como Áreas Prioritárias. O método utilizado para realizar o cálculo de áreas prioritárias para proteção e recuperação de mananciais, com base nos fatores geomorfométricos, foi a combinação das diferentes camadas de informação geomorfológica, através da álgebra de mapas. A partir desta técnica foram calculados indicadores de retenção de água, capacidade de regeneração natural da vegetação e resistência do solo a processos erosivos da Bacia do Rio das Flores, RJ. Dois cenários foram propostos a fim de explorar os parâmetros utilizados, no Cenário 1, o Fator Topográfico de Perda do Solo (LS), entrou na equação como um fator positivo, os resultados obtidos foram: Baixa 47,5%; Média, 44,3% e Alta prioridade 8,2% da extensão da Bacia. O Cenário 2, a equação é substituída, e o fator (LS) passa a ser negativo, neste caso foram obtidos os seguintes valores: Baixa 5,2%; Média 76,3% e Alta prioridade 18,4%.

Palavras-chave: Parâmetros Geomorfométricos; Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente; Álgebra de Mapas.

ABSTRACT: Given the need to ensure water quality and quantity for present and future generations, the protection of springs for public supply becomes increasingly important. This work was developed with the objective of proposing an analysis method that, from the geomorphometric parameters of a watershed, it is possible to establish an additional subsidy to identify areas with the ability to carry out projects that seek the maintenance, conservation and natural recovery of the vegetation of springs and thus consider them as priority areas. The method used to calculate the priority areas for protection and recovery of springs, based on geomorphometric factors, was the combination of different layers of geomorphological information, through the algebra of maps. From this technique were calculated indicators of water retention, natural regeneration capacity of vegetation and soil resistance to erosive processes of the Rio das Flores Basin, RJ. Two scenarios were proposed in order to explore the parameters used, in Scenario 1, the Topographic Soil Loss (LS) factor, entered into the equation as a positive factor, the results obtained were: Low 47.5%; Medium, 44.3% and High priority 8.2% of the basin's extension. Scenario 2, the equation is replaced, and the factor (LS) becomes negative, in this case the following values were obtained: Low 5.2%; Medium 76.3% and High priority 18.4%.

Keywords: Geomorphometric Parameters; Hydrologically Consistent Digital Elevation Model; Map Algebra.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica constitui um dos primeiros procedimentos realizados em análises hidrológicas e tem por finalidade elucidar diferentes questões relacionadas ao entendimento da hidrodinâmica da Bacia (Teodoro et al., 2007). Nesse contexto, baseado no registro das variáveis hidrológicas, é possível representar matematicamente as

Recebido: Abril 15, 2022. Revisado: Agosto 23, 2022. Aceito: Setembro 25, 2022.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

características físicas da bacia hidrográfica, o que permite uma integração multidisciplinar dos diferentes sistemas de gerenciamento de recursos hídricos (Tucci, 1993, 2001).

A representação da superfície terrestre o mais próximo da realidade é fundamental para a adequada análise geomorfológica de uma determinada área (Soares Neto et al., 2018). Com a difusão de novas técnicas de geoprocessamento, assim como o avanço da tecnologia de satélites na obtenção de informações referentes ao relevo terrestre, tornou crescente o número de trabalhos que propõem técnicas de automatização de rotinas em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) com objetivo de aplicações em modelagem hidrológica (Ávila et al., 1999).

Tal representação tem a bacia hidrográfica como principal recorte de estudo, pois constitui a unidade espacial ideal para modelagem, uma vez que agrega elementos passíveis de delimitação e quantificação, representados matematicamente (Mello & Silveira, 2018) levando em conta, as características físicas espacialmente distribuídas na paisagem (Rennó & Soares, 2003). De acordo com Mello & Silveira (2018), a análise geomorfométrica consiste na quantificação da superfície terrestre com enfoque na extração de parâmetros extraídos a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), também é compreendida como análise digital do relevo.

Entende-se que o modelo é uma ferramenta que permite entender e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever ou simular condições distintas, antecipando a ocorrência de eventos, permitindo a tomada de medidas preventivas (Tucci, 2005). Um Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação computacional da superfície da Terra e fornece um conjunto de informações numéricas a partir do qual parâmetros morfométricos podem ser gerados digitalmente.

De acordo com Pieroni (2018), a crescente demanda por recursos naturais, sobretudo a água, resultou em um cenário de degradação ambiental, caracterizado por passivos ambientais com crescente abrangência em todo o território brasileiro. Ele também aponta que, embora exista uma série de ações das esferas pública e privada, para o equacionamento dos conflitos relacionados a água, ainda é grande o desafio para o desenvolvimento de um uso sustentável do recurso, em níveis populacionais, e apesar da elevada oferta de água superficial, muitos mananciais são afetados por sérios problemas de volume e qualidade das águas, dados os usos intensivos, sobretudo agropecuários e urbanos, que se fazem presentes em suas bacias de contribuição.

Desta forma, o presente artigo visa subsidiar informações complementares que auxiliem na determinação de áreas prioritárias para proteção, recuperação vegetal e manutenção de Mananciais de abastecimento, utilizando variáveis geomorfométricas, tendo como base o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente. Tal objetivo está elencado em 3 elementos de análise: avaliação conceitual dos fatores geomorfométricos e suas combinações através de álgebra de mapas; automatização do método a ser utilizado com a ferramenta ModelBuilder, presente no software *ArcMap 10.3* e por fim, verificar a sua aplicabilidade em uma área-piloto, a Bacia Hidrográfica do Rio das Flores.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área piloto

A Bacia do Rio das Flores, cujo rio principal nasce no distrito de Ipiabas, em Barra do Piraí, e desce passando pelo Município de Valença até desaguar no Rio Preto, um afluente do Rio Paraíba do Sul, no Município de Rio das Flores (Figura 1), é considerada uma bacia estratégica, visto que compreende uma AIPM (Área de Interesse para Proteção de Mananciais), definida por meio da Resolução INEA 158/2018 e CERHI-RJ 218/2019, pois abrange o trecho a montante da fonte de captação de água que abastece a sede de Valença, onde está presente os municípios de Valença e Barra do Piraí, possuindo cerca de 7 mil hectares de área.

Sua importância também é constatada por abrigar uma das Bacias do projeto conexão Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro (Figura 2), projeto que possui a parte técnica coordenada pela Gerência de Instrumentos de Gestão do Território e Informações Geoespaciais, do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, RJ). Além disso, a Bacia possui projetos já implementados, como o *Água de Rio das Flores*, que utiliza a política de pagamento por serviços ambientais a proprietários selecionados através de critérios técnicos para sua devida adesão e implementação.

De acordo com o portal do projeto, Conexão Mata Atlântica, é:

Uma iniciativa do governo federal, por meio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, e dos governos dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, com apoio técnico e financeiro do GEF/BID, tendo como área de intervenção a bacia do rio Paraíba do Sul. O objetivo do Projeto é recuperar

e preservar serviços ecossistêmicos associados à biodiversidade e captura de carbono da floresta, a partir de uma abordagem de manejo sustentável da paisagem, através da promoção de atividades de restauração ecológica de florestas nativas e regeneração natural.

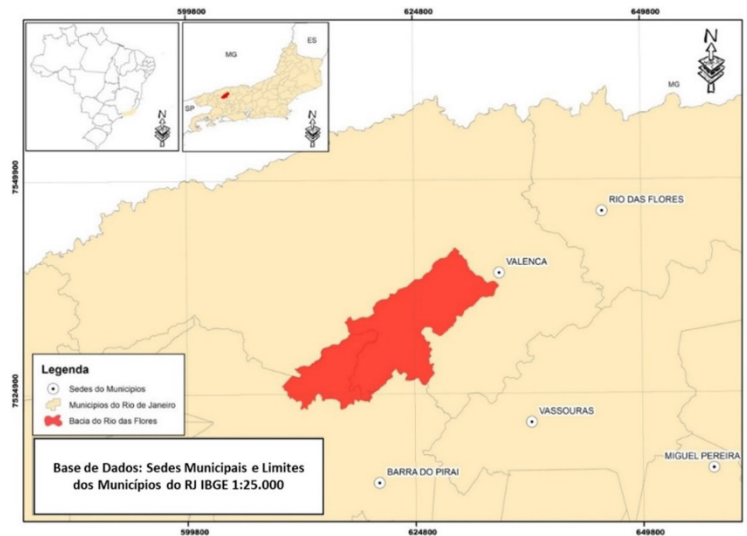


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio das Flores, RJ.

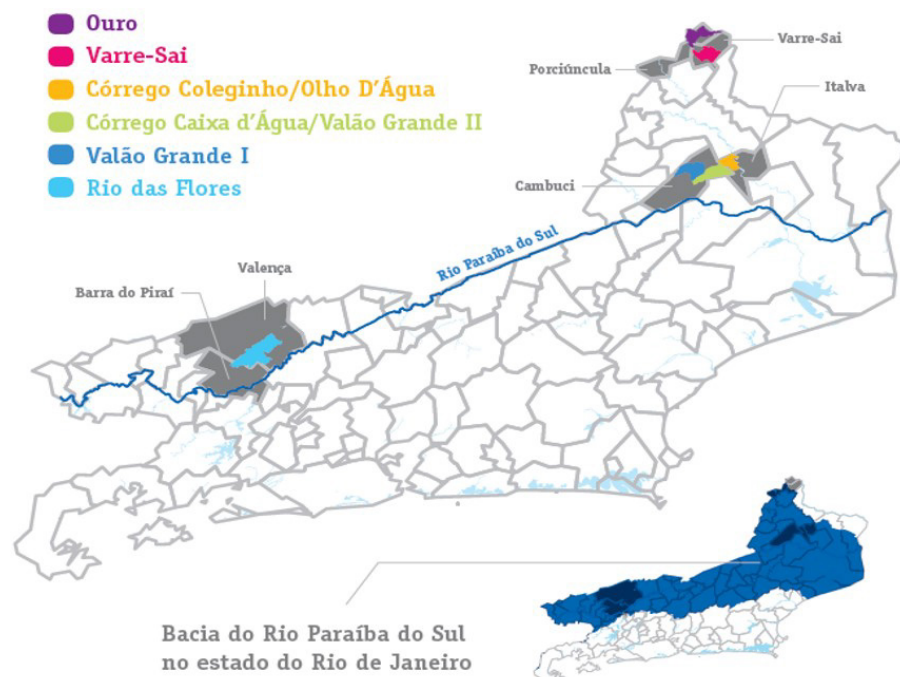


Figura 2 - Áreas de atuação do Projeto Conexão Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro (Instituto Estadual do Ambiente, 2019).

Atualmente, grande parte da área da microbacia, cerca de 57%, é ocupada por pastagens, situação que se mantém desde a decadência do café, no final do século XIX. A pecuária de corte e de leite é a principal atividade econômica rural, embora enfrente dificuldades como a baixa qualidade dos animais e das pastagens, falta de crédito rural e assistência técnica Rio Rural (2015 apud Instituto Estadual do Ambiente, 2021). As florestas também ocupam uma parte significativa do território, mais de 30%, se consideradas as áreas de vegetação secundária em estágio inicial de regeneração. A agricultura temporária (com banana, mandioca, milho e feijão), ocupa menos de 1% do território (Rio Rural, 2015; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017). As áreas urbanas e edificações também ocupam uma área pequena da microbacia, cerca de 3%, correspondendo aos núcleos de São Francisco e Ipiabas (Instituto Estadual do Ambiente, 2021).

2.2 Álgebra de Mapas

Rocha et al. (2004), define análise espacial como sendo uma ferramenta que possibilita manipular dados espaciais de diferentes formatos, extraindo desta forma um conhecimento adicional. O processo de combinar, integrar e transformar a informação através de diferentes camadas de mapas, utilizando operações matemáticas, básicas e avançadas para geração de informação é chamada álgebra de mapas (Tomlin, 1990).

Para Soares Filho (1998), o processo de modelagem cartográfica envolve mapas e modelos, ou seja, modelos expressos em mapas, um modelo cartográfico pode ser simplificado a uma coleção ou camadas de mapas, pertencente a uma área comum, compondo operações entre seus elementos. Na Figura 3, expressamos a combinação de camadas oriundas das informações extraídas a partir do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente, e posteriormente a adição de pesos e expressões matemáticas.

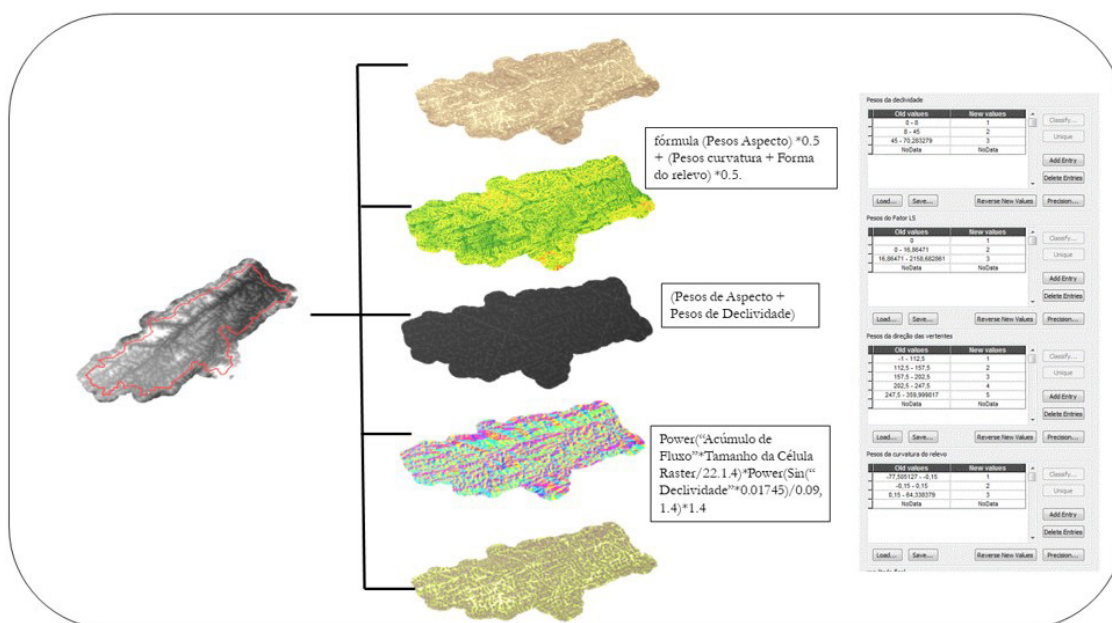


Figura 3 - Síntese da Álgebra de Mapas

2.3 Metodologia De Análise: Pesos E Parâmetros Geomorfométricos Para Priorização De Áreas Para Proteção De Mananciais

Com a finalidade de combinar diferentes camadas obtidas a partir do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente consistente, foram extraídas informações de aspecto, forma, curvatura do relevo e declividade, tal combinação resultou nos indicadores geomorfológicos para retenção de umidade no solo, no indicador de capacidade de recuperação natural da vegetação e no Fator LS, fator topográfico de perda do solo.

Aos indicadores mencionados, foram atribuídos pesos, cabe frisar que as características da escolha de pesos seguem critérios subjetivos e bibliográficos sobre o tema, esses critérios dizem respeito ao conhecimento técnico, conceitual e teórico do pesquisador, mas podem também seguir o resultado de um painel de especialistas sobre o assunto que, poderiam auxiliar na escolha de temas, assim como na elaboração de pesos a partir de características regionais da área de estudo.

2.3.1 Aspecto do Relevo x Pesos

O Aspecto do relevo (Figura 4) identifica a orientação da encosta, ou seja, ele corresponde a direção de declive de uma determinada célula em relação às células vizinhas, seus valores estão distribuídos em grades cujas direções são angulares variando de 0 a 360°, as células que possuem valor -1 atribuído correspondem a áreas planas. A orientação possui os seguintes valores: norte (0°-22,5° e 337,5°-360°), nordeste (22,5°-67,5°), leste (67,5°-112,5°), sudeste (112,5°-157,5°), sul (157,5°-202,5°), sudoeste (202,5°-247,5°), oeste (247,5°-292,5°) e noroeste (292,5°-337,5°). Em relação a distribuição de pesos (Tabela 1), levou-se em consideração a localização espacial do Estado do Rio de Janeiro, onde é possível

afirmar que, a orientação das encostas direcionadas ao Oceano Atlântico permite uma maior incidência de ventos úmidos, desta forma, as encostas com orientação L (leste) e S (sul) são mais úmidas, e as encostas N (norte) e NE (nordeste) são mais secas, o que interfere diretamente no processo de recuperação natural da vegetação no Estado (Marques et al., 2005).

Tabela 1 - Pesos Aspecto do Relevo

ASPECTO	PESOS
Plana, Norte, Nordeste, Oeste, Noroeste e Norte	0
Sudeste e Sudoeste	1
Sul e Leste	2

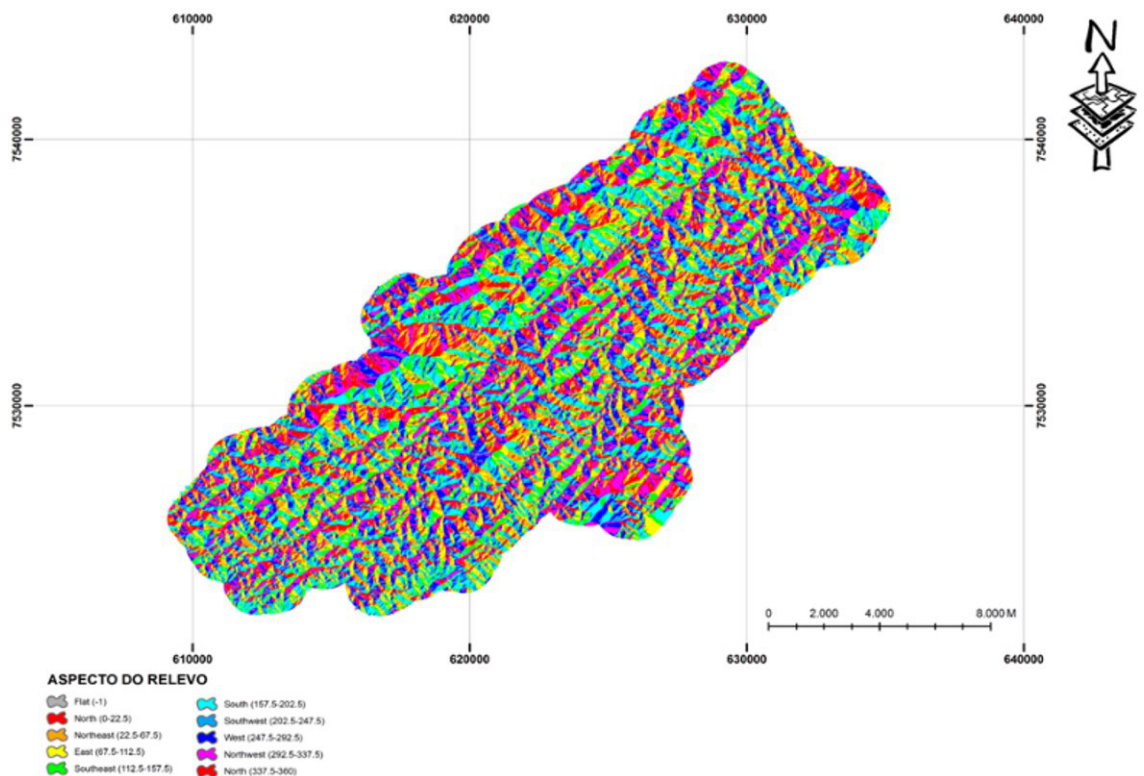


Figura 4 - Mapa de Aspecto do Relevo da Bacia do Rio das Flores

2.3.2 Forma do Relevo x Pesos (parei a revisão textual aqui 21/09/2022)

A análise da forma do relevo (Figura 5) seguiu a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1979) onde os intervalos em porcentagem são: 0 – 3% relevo plano, 3% – 8% relevo suavemente ondulado, 8% – 20% relevo ondulado, 20% – 45% relevo fortemente ondulado, 45% – 75% relevo montanhoso e maior que 75% escarpado ou fortemente montanhoso. A distribuição de pesos (Tabela 2) considerou as áreas que possuem relevo Ondulado como prioritárias, pois no caso da Bacia do Rio das Flores, além de serem áreas em grande parte de pasto abandonado, nos dias de hoje, também sofre bastante com processos erosivos devido ao seu passado de exploração. Já as áreas Planas, e ou, suavemente onduladas também possuem potencial de recuperação, no entanto, são áreas já destinadas a algum tipo de uso antrópico, o que dificulta as ações de mobilização dos proprietários.

Tabela 2 - Pesos Forma do Relevo.

FORMA	PESOS
Plana e Suave Ondulada	1
Ondulada	2
Forte Ondulada, Montanhosa e Escarpada	0

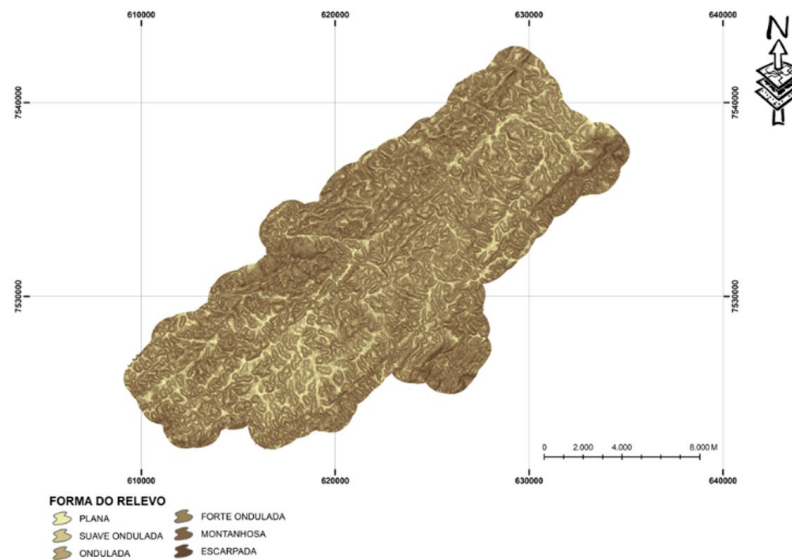


Figura 5 - Mapa de Forma do Relevo da Bacia do Rio das Flores

2.3.3 Declividade (°) x Pesos

A declividade (Figura 6) pode ser descrita como a mudança de elevação numa determinada distância que corresponde ao ângulo de inclinação da superfície local, desta forma, possui ação direta sobre o equilíbrio entre o escoamento superficial e a infiltração direta de água no solo, além disso, é um fator controlador da intensidade de fluxos de matéria e insolação. Dos pesos atribuídos (Tabela 3) deu-se maior importância as áreas que variam de 20 – 45(°), embora tenham o seu grau de importância as regiões de 0 – 20(°) tiveram um peso menor, pois foi levado em consideração o histórico de uso do solo para agricultura temporária, nas regiões mais baixas, fator que dificulta o acesso e utilização do terreno em projetos de recuperação vegetal.

Tabela 3 - Pesos Declividade (°).

DECLIVIDADE (°)	PESOS
0 - 20	1
20 - 45	2
>45	0

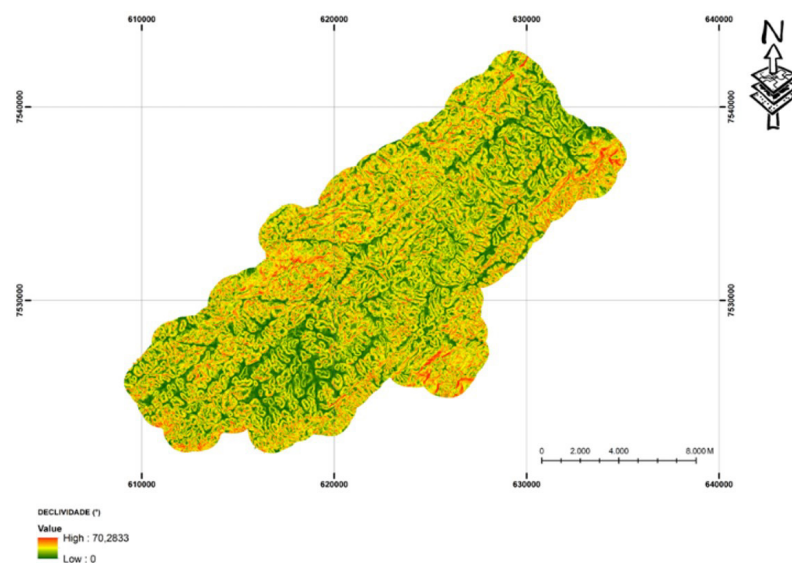


Figura 6 - Mapa de Declividade (°) do Relevo da Bacia do Rio das Flores

2.3.4 Curvatura do Relevo x Pesos

Na curvatura do relevo (Figura 7) as áreas denominadas côncavas, são aquelas onde ocorre os processos de acúmulo de sedimento e água, já as regiões convexas estão associadas aos processos de dispersão. As áreas planas, são consideradas ambientes mais estáveis, pois apresentam maior equilíbrio entre o acúmulo e dispersão em relação às outras classes, desta forma foram estabelecidos os pesos (Tabela 4). Cabe ressaltar que, as características da superfície estão também associadas à migração e acúmulo de nutrientes e matéria orgânica (Schmidt et al., 2003).

Tabela 4 – Pesos Curvatura do Relevo.

CURVATURA	PESOS
Côncava	2
Plana	1
Convexa	0

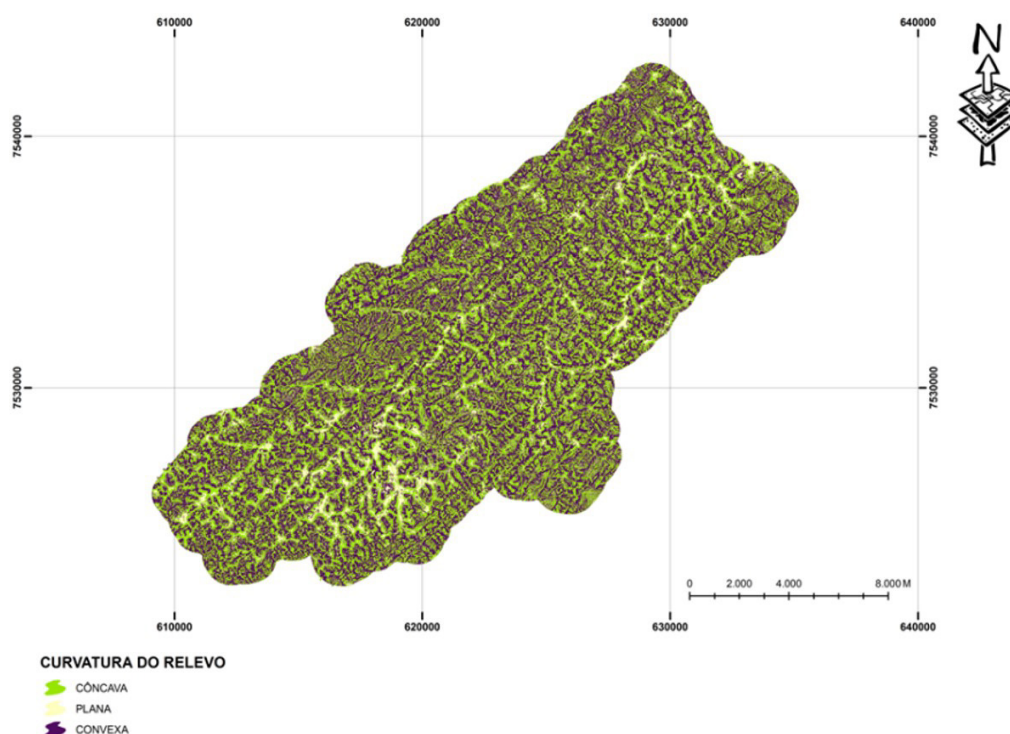


Figura 7 - Mapa de Curvatura do Relevo da Bacia do Rio das Flores

2.3.5 Fator LS x Pesos

O fator topográfico de susceptibilidade à erosão (LS) (Figura 8) representa a influência do comprimento da encosta (L) ou área de contribuição de cada ponto) e declividade (S) da mesma no processo de erosão. Em suma, quanto maior for o comprimento de uma vertente maior será o volume do escoamento e, conseqüentemente, o poder de erosão, da mesma forma, quanto maior o grau de declividade do terreno, maior será a velocidade de escoamento (Tabela 5).

Tabela 5 – Pesos Fator Topográfico (LS).

FATOS LS	PESOS
BAIXO	0
MÉDIO	1
ALTO	2
DECLIVIDADE (°)	PESOS
0 - 20	1
20 - 45	2
>45	0

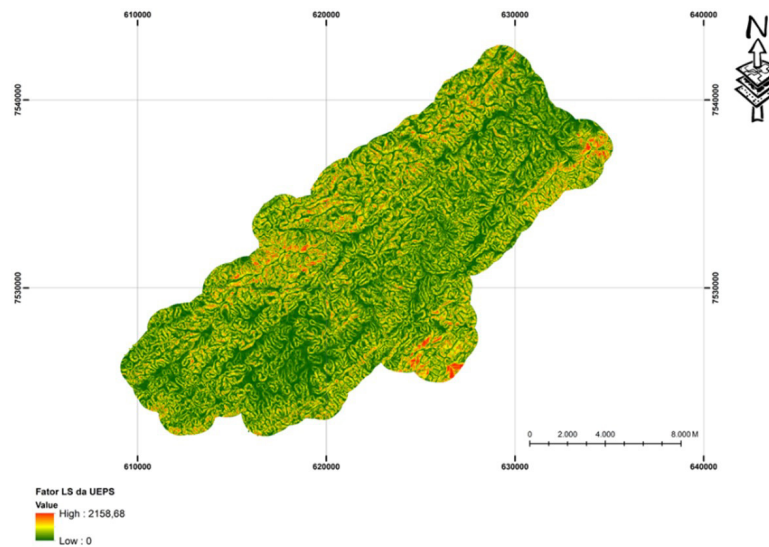


Figura 8 - Mapa do Fator LS do Relevo da Bacia do Rio das Flores.

2.4 Análise Geomorfométrica aplicada a Determinação de Áreas Prioritárias para Proteção e Recuperação vegetal de Mananciais

Para Moore et al., 1993, os modelos tratam da distribuição espacial do fluxo de água da bacia hidrográfica extraído a partir dos seus dados topográficos, tais como, o limite físico da bacia e sub-bacias, inclinação do relevo, comprimento de rampa, forma do relevo, orientação das vertentes e caracterização da drenagem e sua conexão entre áreas que definirão como a água se move através da paisagem.

A análise morfométrica constitui um conjunto de procedimentos que possuem como orientação, a investigação e a compreensão dos componentes naturais da bacia hidrográfica (Santos & Morais, 2012). As abordagens relacionadas às informações oriundas de cálculos de índices morfométricos, podem subsidiar a delimitação de áreas estratégicas e a partir do ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), é possível desenvolver cenários com o propósito de identificar dados quantitativos necessários para produzir informação qualitativa ao planejamento e tomada de decisão.

As feições geomorfológicas trazem informações fundamentais a sobre a dinâmica da hidrológica da Bacia e podem indicar áreas propícias ao armazenamento de água, a recuperação de vegetação e a capacidade do solo de resistência à erosão, tornando possível a determinação de indicadores para o mapeamento de áreas passíveis a implementação de políticas voltadas a garantia da segurança hídrica regional e local, e recuperação vegetal dos mananciais.

A escolha dos indicadores (Figura 9) se deu de forma a atender três premissas que determinam o grau de prioridade para proteção e recuperação vegetal de mananciais, são elas: a disponibilidade hídrica, que está associada, dentre outros fatores, a capacidade de armazenamento de água, de regeneração natural da vegetação e resiliência do solo.



Figura 9 - Proposta analítica para escolha dos indicadores

2.4.1 Indicador Geomorfológico para retenção de umidade no solo

Este indicador traduz o potencial de armazenamento de água no solo, indicando as áreas que devem ser priorizadas em projetos que visam o aumento da disponibilidade hídrica. Ele reúne as informações de forma, aspecto e curvatura do relevo (Silva e Oliveira, 2004; Sirtoli et al., 2008; Oliveira et al., 2016; Instituto Estadual do Ambiente, 2018).

As áreas com valores mais altos deste índice indicam a distribuição espacial das zonas de elevada saturação hídrica, estão geralmente associadas a regiões de escoamento superficial com grande área de contribuição, baixa declividade e relevos mais planos. Já os valores mais baixos do índice são encontrados normalmente em áreas onde a declividade é alta e os solos são mais rasos, sendo normalmente áreas de recarga de água subterrânea (Lopes, 2012).

O modelo a ser utilizado no presente trabalho (Figura 10) foi gerado a partir do método de álgebra de mapas, resultando em pesos atribuídos as classes aspecto, curvatura e forma do relevo e posteriormente aplicada a fórmula $(\text{Pesos Aspecto}) * 0.5 + (\text{Pesos curvatura} + \text{Forma do relevo}) * 0.5$. (Instituto Estadual do Ambiente, 2018).

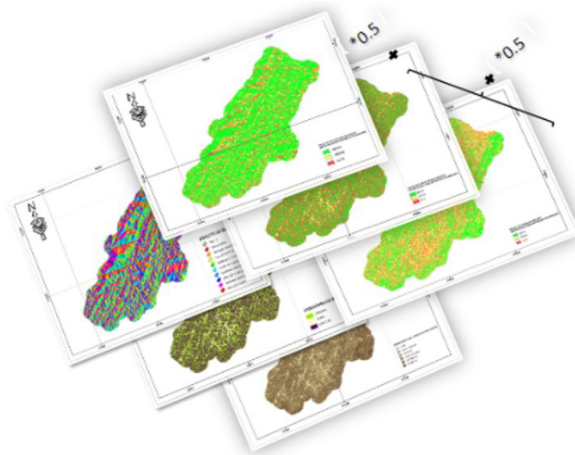


Figura 10 - Modelo do indicador geomorfológico para retenção de umidade no solo.

2.4.2 Indicador Geomorfológico da capacidade de recuperação natural da vegetação

Visando o aumento da possibilidade de sucesso do projeto de recuperação vegetal do manancial é de suma importância conhecer áreas capazes de se regenerar de forma natural (Silveira e Silva, 2010) (Figura 11), a combinação das informações sobre aspecto e declividade do relevo pode auxiliar na determinação de tais áreas (Santos et al., 2017). O cálculo utilizado foi a soma simples após os pesos atribuídos aos dados base, (Pesos de Aspecto + Pesos de Declividade).

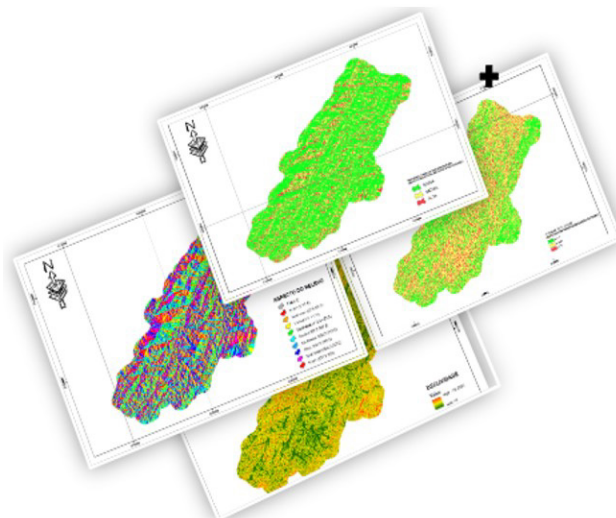


Figura 11 - Modelo do indicador geomorfológico de capacidade de recuperação natural da vegetação.

2.4.3 Indicador de resistência do Solo a degradação

Para gerar o indicador, foi realizado o cálculo do fator LS da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) a equação considerou uma parcela unitária de 22,1 m de comprimento e 9% de declive, como base conforme a expressão (Figura 12), onde, o acúmulo de fluxo representa os sulcos extraídos das partes mais baixas do relevo adjacente, o tamanho da célula corresponde a dimensão do pixel do MDE utilizado, neste caso 10m, o valor 0,01745 é uma constante utilizada para transformar radianos em (°), adaptando, desta forma, a fórmula para receber valores de declividade em (°) extraída da ferramenta *Slope* presente no software ArcMap 10.3 (Pelton et al., 2014). O objetivo desse indicador é representar as áreas de menor ou maior susceptibilidade à erosão do solo, podendo ser utilizado de diferentes formas dependendo do objetivo proposto, por exemplo, áreas com menor susceptibilidade a erosão devem ser priorizadas em projetos que visam aumentar a possibilidade de sucesso em ações de restauração e recuperação vegetal, por outro lado, se o propósito for diminuir a degradação do solo da região, impedindo processos erosivos em determinados locais, áreas com maior susceptibilidade a perda do solo devem ser priorizadas (Pinheiro & Cunha, 2010; Wishmeier, 1962; Chorney e Kennedy, 1971; Lal, 2001; Bertoni & Lombardi Neto, 2005).

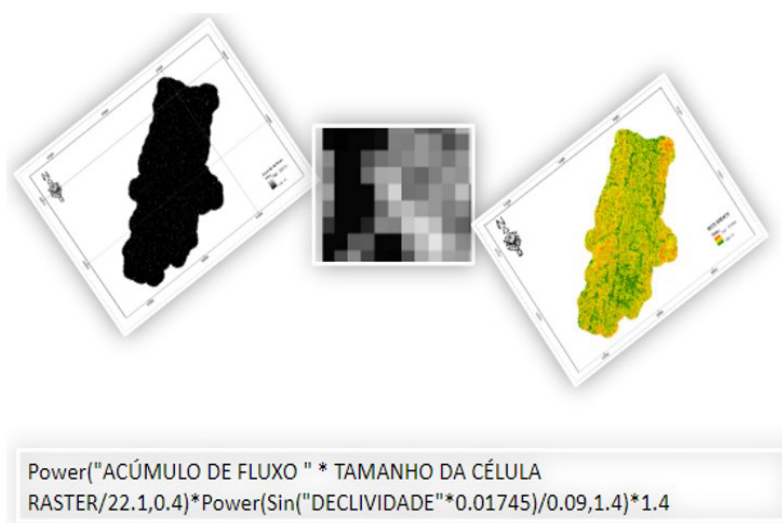


Figura 12 - Fator Topográfico (LS) da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) (Pelton et al., 2014).

2.5 Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente da Bacia do Rio das Flores

Os atributos topográficos de uma Bacia podem ser obtidos a partir de um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), no presente artigo tais informações foram elaboradas através do método de interpolação *Topo to Raster*, que utiliza dados de pontos, linha e polígono e é baseado no programa ANUDEM, desenvolvido por Michael Hutchinson (2011).

A ferramenta *Topo to Raster* possui a característica de interpolar valores de elevação por varredura, o que garante a representação correta dos sulcos e fluxos, além disso, foi projetado para aproveitar diversos tipos de dados vetoriais de entrada normalmente disponíveis em escala mais detalhada do que os modelos digitais altimétricos de origem orbital. Os dados utilizados foram obtidos através da plataforma GEOinea, o portal de dados espaciais do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, RJ), que segue os padrões da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE/CONCAR), na aba "Bases Cartográficas" nesta aba é possível encontrar dados provenientes do projeto RJ25.

De acordo com os metadados, esta base compõe o conjunto de dados geoespaciais de referência, estruturados em bases de dados digitais, que permite uma visão integrada do território do Estado do Rio de Janeiro na escala 1:25.000. Esta base foi gerada a partir de interpretação de fotografias aéreas na escala aproximada de 1:30.000, levantamentos de campo e informações de órgãos setoriais parceiros. A BC25_RJ foi estruturada em conformidade com a Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV), representando elementos para as 13 Categorias de Informações previstas. As categorias são compostas pelas classes de elementos geográficos que representam o território nessa escala. As classes de elementos possuem atributos geométricos e semânticos compatíveis com o mapeamento sistemático básico terrestre (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017).

Porém, os parâmetros derivados de MDEs são fortemente dependentes da resolução espacial, além disso o principal requisito de qualquer MDE é que ele tenha a precisão e a resolução desejada, e que não tenha vazios de dados (Capoane & Silva, 2020).

Tendo em vista verificar a qualidade do Modelo gerado a partir das informações cartográficas e da interpolação pelo *Topo To Raster*, foi realizado um teste que consistiu em aplicar a ferramenta *Fill* (Figura 13) que corrige possíveis erros espúrios no relevo, mas que após sua aplicação, gera distorção altimétrica no MDE final, essa distorção pode ser medida, e se a variação nos valores de altimetria não for significativa, podemos inferir que o dado possui boa qualidade na sua elaboração.



Figura 13 - Perfil de elevação antes e após o Fill

Após a correção, observou-se a diferença entre o resultado do *Fill* (Figura 14) e o MDE original, desta forma foi possível observar que a mudança no modelo foi satisfatória do ponto de vista da escala, havendo pouca modificação do mesmo, pois as distorções mais significativas ocorreram em poucas áreas, que ficaram entre 2 e 9,5 metros de altitude diferente do MDE inicial.

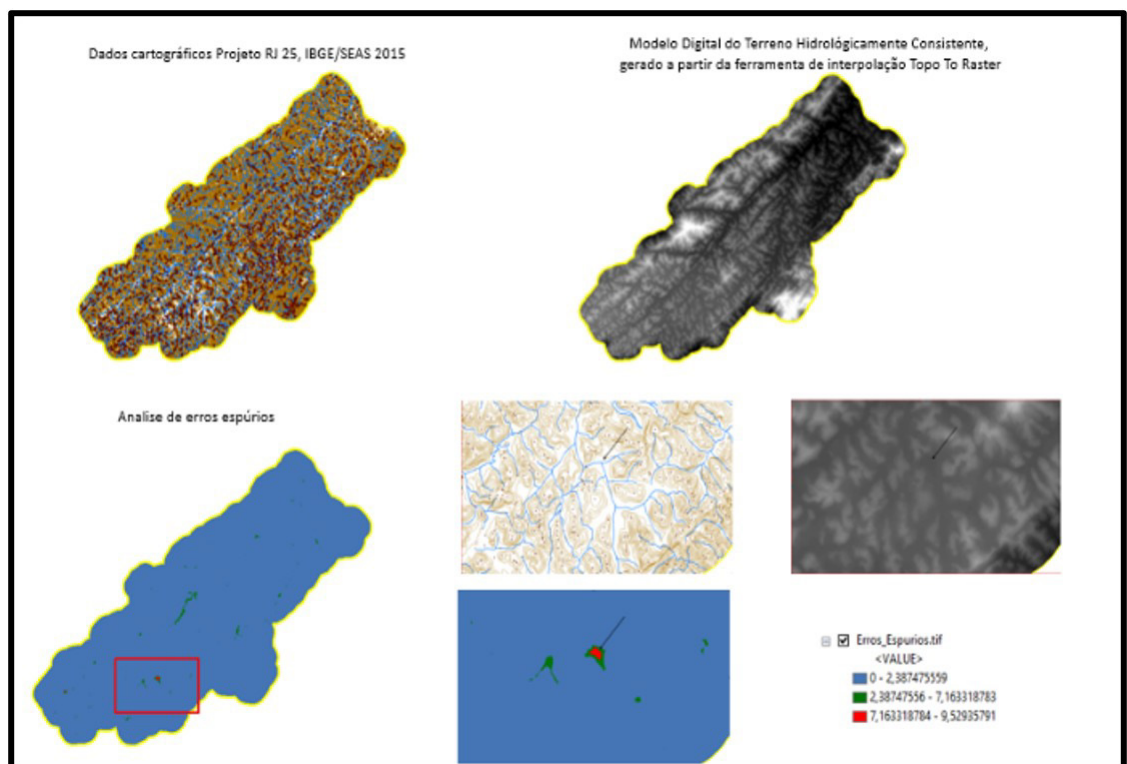


Figura 14 - Avaliação do MDE-HC Modelo Digital de Elevação

2.6 Construção do Modelo

Modelos conceituais em geoprocessamento são fluxos de trabalho que encadeiam sequências lógicas de ferramentas que são utilizadas de forma a transformar informações geográficas, a partir de um dado espacial (Figura 15). No presente artigo foi utilizada a ferramenta *ModelBuilder* que também pode ser considerada uma linguagem de programação visual para a criação de fluxos de trabalho. De acordo como a documentação do programa ArcGis, o *ModelBuilder* é um aplicativo utilizado para criar, editar e gerenciar modelos.

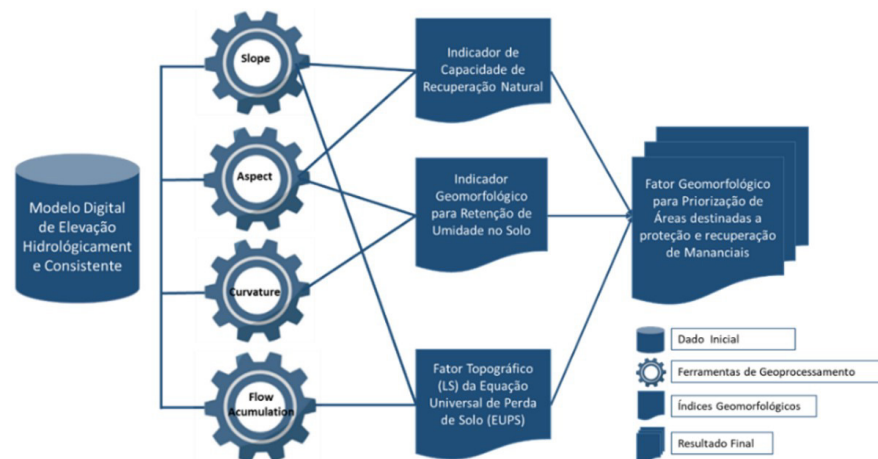


Figura 15 - Modelo Conceitual da Metodologia Proposta.

A construção da ferramenta de determinação de áreas prioritárias para recuperação vegetal e proteção de mananciais, reuniu as etapas de definição dos parâmetros, pesos e cálculos, levando em consideração as informações geomorfométricas que foram extraídas do modelo digital de elevação Hidrológicamente consistente, com a finalidade de tornar a ferramenta flexível e capaz de se adaptar a diferentes regiões, características e objetivos dos projetos.

O fluxo em destaque (Figura 16), corresponde ao método utilizado na construção do modelo, através da ferramenta *ModelBuilder* no ArcGis, permite a utilização de aplicações já presentes no programa, assim como diferentes tipos de cálculos e expressões, passíveis de serem realizados através da ferramenta *Raster Calculator*. A construção seguiu as seguintes etapas:

1ª Etapa: Inserção do dado de entrada, Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente, ou seja, corrigida falhas, como depressões, ou picos de elevação espúrios.

2ª Etapa: Utilização das Ferramentas presentes no software para elaboração dos dados base, são elas: Aspect, Curvature, Slope em Percentual para a elaboração da forma do relevo e em Graus para elaboração da declividade, assim como a Flow Direction e Flow Accumulation, para a definição do Fator LS, cabe ressaltar que estas ferramentas estão presentes na extensão Spatial Analyst.

3ª Etapa: Reclassificação dos resultados primários para atribuição dos pesos a cada classe. A ferramenta Reclassify, também presente na extensão Spatial Analyst.

4ª Etapa: Após a extração dos indicadores e Fator LS, elaboração dos cálculos, utilizando a ferramenta Raster Calculator, gerando desta forma o resultado.

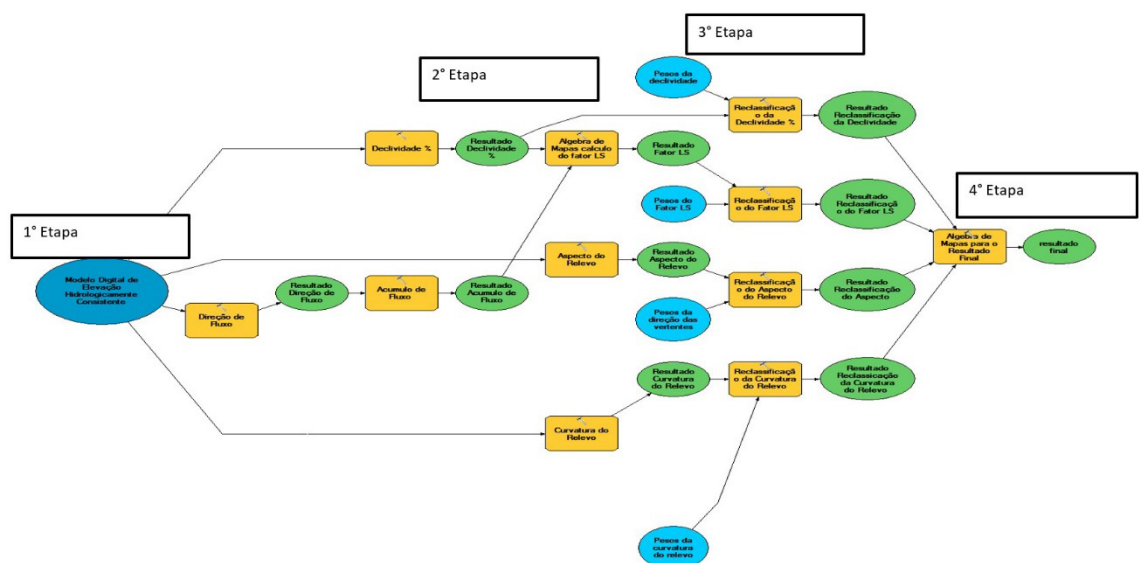


Figura 16 - Construção da Ferramenta pelo ModelBuilder.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Geomorfológica

A distribuição espacial, assim como os pesos e valores, resultantes da análise geomorfológica da Bacia do Rio das Flores estão descritos na Tabela 6, onde observamos que no parâmetro aspecto do relevo destaca-se a direção norte com o percentual de aproximadamente 14% de área e a sudoeste com 10%, abrangem respectivamente o maior e o menor percentual, quando não consideramos as áreas planas. Cerca de 35% da área da bacia está na face Sul, Sudeste e Sudoeste, mais importantes para projetos de recuperação vegetal, por receberem menos incidência de raios solares.

A forma de relevo predominante na região é a fortemente ondulada que abrange aproximadamente 38,6% da bacia, em sequência a montanhosa com 29% e 4% escarpado. Os relevos menos acidentados, e por tanto mais propícios a regeneração natural da vegetação, são 17,75% ondulado, 7,6% suavemente ondulado e apenas 2,65% de área plana.

A maior parte da bacia, cerca de 53%, apresenta declividade inferior a 20°, as áreas consideradas prioritárias de 20% a 45% correspondem a aproximadamente 46,45%, as demais áreas acima de 45° não chegam a 0,5% da área, mesmo apresentando valor nulo, nos pesos são importantes, pois correspondem a Áreas de Preservação Permanentes - APPs de declividade de acordo com o código florestal.

A curvatura do relevo apresentou um equilíbrio no percentual de áreas côncavas e convexas, fruto de um relevo bastante acidentado, as áreas convexas apresentaram percentual de aproximadamente 47% e as côncavas, propícias ao armazenamento de água e acúmulo de matéria orgânica, de 40,5%, por fim, as áreas planas que abrangem cerca de 12%.

O Fator topográfico de perda do solo (LS), apresentou em sua maior parte, aproximadamente 70% de área com baixa susceptibilidade, cerca de 22% de média susceptibilidade e 8% para alta susceptibilidade, demonstrando a relevância e as possibilidades de sucesso na implementação de projetos que visem aumentar a cobertura vegetal local.

Tabela 6 – Resultados da análise geomorfológica com os pesos aplicados

Fatos ls	Pesos	%	Curvatura	Pesos	%
Baixo	0	69,653	Côncava	2	40,53744
Médio	1	21,933	Plana	1	12,2627
Alto	2	8,4141	Convexa	0	47,19987
Forma	Pesos	%	Aspecto	Pesos	%
Plana e Suave Ondulada	1	10,274	Plana, Norte, Nordeste, Oeste, Noroeste	0	52,201899
Ondulada	2	17,751	Sudeste, sudoeste	1	35,281669
Forte Ondulada, Montanhosa e Escarpada	0	71,975	Sul e Leste	2	12,516431
Declividade (°)	Pesos	%			
0 - 20	1	53,058			
20 - 45	2	46,452			
>45	0	0,4907			

3.2 Áreas Prioritárias para Proteção e Recuperação de Mananciais em 2 Cenários

Com a técnica aplicada foi possível criar informações geomorfométricas que auxiliem na determinação de áreas destinadas a proteção, recuperação e manutenção da vegetação da Bacia do Rio das Flores, assim como, áreas propícias ao armazenamento de água que, uma vez recuperadas, evitem processos erosivos, contribuindo para qualidade da água local. Para ilustrar o resultado e mostrar a funcionalidade da ferramenta, elaboramos 2 cenários distintos (Tabela 7), um visando áreas com maior susceptibilidade de perda de solo e outro visando áreas com menor susceptibilidade.

Tabela 7 – Cenários.

Cenários		
Método de Elaboração	Álgebra de Mapas	Resultado Esperado
1	Indicador Geomorfológico de Umidade + Indicador geomorfológico de Recuperação Natural da vegetação + Fator Topográfico de Perda do Solo (LS) $((\text{Pesos Aspecto}) * 0.5 + (\text{Pesos curvatura} + \text{Forma do relevo}) * 0.5) + (\text{Pesos de Aspecto} + \text{Pesos de Declividade}) + (\text{Fator Topográfico (LS)})$	Visa retratar as áreas com maior susceptibilidade a perda de solo e priorizá-las
2	Indicador Geomorfológico de Umidade + Indicador geomorfológico de Recuperação Natural da vegetação - Fator Topográfico de Perda do Solo (LS) $((\text{Pesos Aspecto}) * 0.5 + (\text{Pesos curvatura} + \text{Forma do relevo}) * 0.5) + (\text{Pesos de Aspecto} + \text{Pesos de Declividade}) - (\text{Fator Topográfico (LS)})$	Visa retratar as áreas com baixa susceptibilidade a perda de solo e priorizá-las

Por sua importância estratégica a Bacia do Rio das Flores recebeu o projeto Água do Rio das Flores, iniciado em 2016 e que, a partir de ações diretas de pagamentos por serviços ambientais, atua em 35 propriedades da região e visa a recuperação florestal de aproximadamente 610 hectares da Bacia (Instituto Estadual do Ambiente, 2016). Para ilustrar os resultados (Figura 17) obtidos de forma local foram escolhidas 8 propriedades do projeto. (Anexo A).

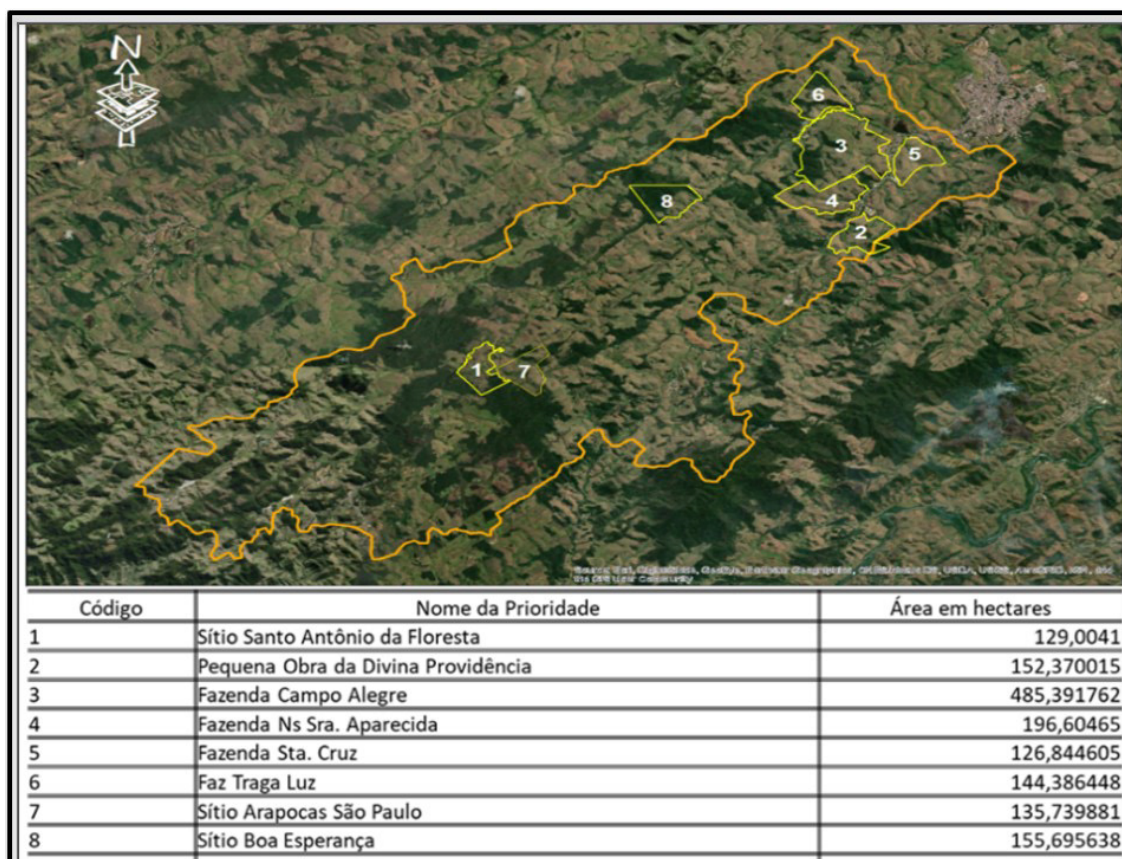


Figura 17 - Croqui das Propriedades Analisadas

O cenário 1, utilizou como cálculo o somatório de todos os indicadores, ao considerar o Fator LS como positivo fez com que as regiões com maior susceptibilidade a perda de solo, apresentem um valor maior do que as demais, as tornando prioritárias. Este cenário apresentou o seguinte resultado para Bacia do Rio das Flores (Figura 18), cerca de 47,5% de área com baixo grau de prioridade, equivalente 8.076 hectares da microbacia, e 44,3% em médio grau de prioridade ou 7.530 hectares, e 8,2% de áreas com alto grau de prioridade, aproximadamente, 1.387 hectares, tal resultado demonstra a possibilidade de realizar ações pontuais.

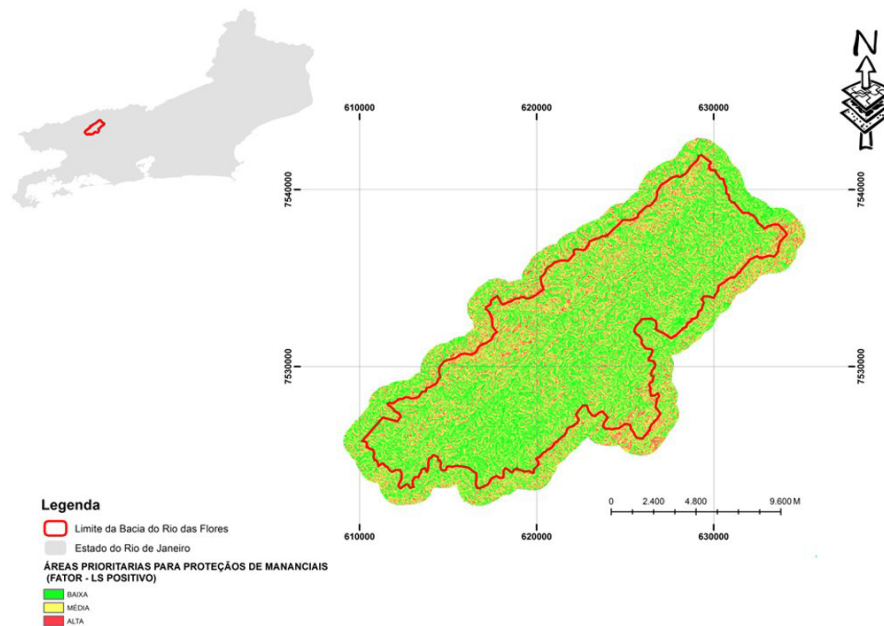


Figura 18 - Mapa de áreas prioritárias para proteção e recuperação vegetal de mananciais (Fator LS positivo)

O cenário 2, utilizou como cálculo o somatório dos indicadores e a subtração do fator LS, tornando seus valores negativo, fazendo com que as áreas com maior susceptibilidade a perda de solo tenham valores menores, priorizando desta forma áreas com baixa susceptibilidade, pois eles passam a ter valores maiores. Este cenário (Figura 19) obteve aproximadamente cerca de 5,23% de área com baixo grau de prioridade, equivalente 889 hectares da microbacia, 76,34% em médio grau de prioridade ou 12.971 hectares, e 18,42% de áreas com alto grau de prioridade, aproximadamente, 3.130 hectares.

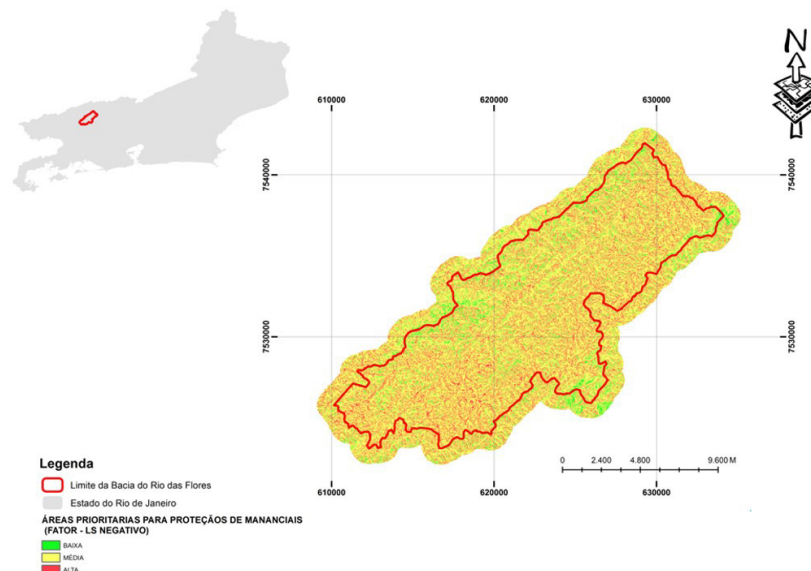


Figura 19 - Mapa de áreas prioritárias para proteção e recuperação vegetal de mananciais (Fator LS negativo)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Presente artigo teve por finalidade a proposição de um método prático que possibilite uma análise da combinação de diferentes parâmetros geomorfométricos presentes na Bacia Hidrográfica do Rio das Flores. Ao analisar estas informações presentes no relevo foi possível atribuir pesos e realizar cálculos que resultaram na diferenciação de áreas, indicando a possibilidades de implementação de projetos de proteção e recuperação vegetal da Bacia em 2 diferentes cenários.

Os pesos atribuídos foram resultado de pesquisa bibliográfica, no entanto, ele pode ser aperfeiçoado por um painel de especialistas, assim como podem ser adaptados para diferentes paisagens e particularidades de uma determinada região que influenciam no resultado.

A escolha dos indicadores foi aperfeiçoada de forma a atender aos objetivos propostos no artigo, tendo como base os parâmetros geomorfométricos, baseando-se em 3 premissas: capacidade de armazenamento de água, capacidade de regeneração da vegetação e capacidade de resistência a erosão superficial do solo, cabe ressaltar que estas métricas podem sofrer ajustes e acréscimos que visem contribuir com o aprimoramento da metodologia.

Ao analisar os resultados na área de estudo, observou-se a tendência de um parâmetro sobrepor ao outro, ou até mesmo anular um ao outro, mesmo que em cálculos e objetivos diferentes. Ao verificar esta questão inferimos a necessidade de criar mais classes intermediárias, ou seja, ao invés de utilizar apenas 3 classes (Baixa, Média e Alta), usar 5 classes (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta), em todos os pesos e posteriormente na análise final.

O relevo acidentado da Bacia do Rio das Flores possibilitou a observação da distribuição espacial dos resultados nos 2 cenários propostos, indicando uma distribuição dispersa da classe de Alta prioridade, trazendo a análise para dimensão local, este fator traz a necessidade de testar a ferramenta em uma região com maior diferenciação do relevo, a fim de observar o comportamento e adaptabilidade do método.

Outra questão importante a ser mencionada é o caráter complementar do estudo proposto, portanto, a interação com outras pesquisas e ações são fundamentais para o sucesso do projeto a ser implementado, análises como, conectividade da paisagem, uso e cobertura do solo, assim como a interação com os proprietários e implementação do Pagamento por Serviços Ambientais, são de grande importância dentro deste contexto.

Por fim, o método foi criado de forma a ser flexível e passível de ajustes, dessa forma o presente trabalho não esgota o tema e ao utilizar a tecnologia espacial auxilia na praticidade e na capacidade de agregar informações de forma lógica, mas que depende intrinsecamente do conhecimento empírico e prático do analista, desta forma, essa combinação se bem implementada, contribui de maneira importante na análise da priorização de áreas que visam recuperar a vegetação e proteger mananciais de água.

5. REFERÊNCIAS

- Ávila, C. J. C. P., Assad, E. D., Verdesio, J. J., Eid, N. J. S., & Freitas, M. A. V. (1999). *Geoprocessamento da informação hidrológica: o estado das águas no Brasil* (Vol. 1, pp. 187-196). Brasília: ANEEL/SRH/OMM.
- Bertoni, J., & Lombardi Neto, F. (2005). *Conservação do solo* (5ª ed.). São Paulo: Ícone.
- Capoane, V., & Silva, D. A. (2020). Avaliação de parâmetros geomorfométricos derivados de modelos altimétricos de diferentes fontes e resoluções: estudo de caso da bacia hidrográfica do córrego Lajeado, Campo Grande, MS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(2), 674-690.
- Chorley, R. J., & Kennedy, B. A. (1971). *A systems approach* (370 p.). London: Prentice Hall.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. (1979). *Levantamento de reconhecimento dos solos do centro-sul do Estado do Paraná (área 9): informe preliminar* (Boletim Técnico, No. 56, 181 p.). Curitiba: EMBRAPA-SNLCS.
- Hutchinson, M. F., Xu, T., & Stein, J. A. (2011). Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. In T. Hengel, I. S. Evans, J. P. Wilson & M. Gould (Orgs.), *Geomorphometry 2011* (pp. 19-22). Redlands. Recuperado em 7 de agosto de 2022, de <http://geomorphometry.org/HutchinsonXu2011>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2017). *Avaliação da qualidade de dados geoespaciais*. Rio de Janeiro: Coordenação de Cartografia.
- Instituto Estadual do Ambiente – INEA. (2016). *Proteção e recuperação de mananciais de abastecimento público: restauração florestal da Bacia do Rio das Flores: projeto piloto*. Rio de Janeiro.
- Instituto Estadual do Ambiente – INEA. (2018). *Atlas dos mananciais de abastecimento público do Estado do Rio de Janeiro: subsídios ao planejamento e ordenamento territorial* (pp. 116-117). Rio de Janeiro.
- Instituto Estadual do Ambiente – INEA. (2019). *Conexão Mata Atlântica – Rio de Janeiro*. Recuperado em 7 de agosto de 2022, de www.inea.rj.gov.br/conexaomataatlantica
- Instituto Estadual do Ambiente – INEA. (2021). *Diagnóstico socioambiental e priorização de áreas para a atuação do Projeto Conexão Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro* (198 p.). Rio de Janeiro.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519-539.

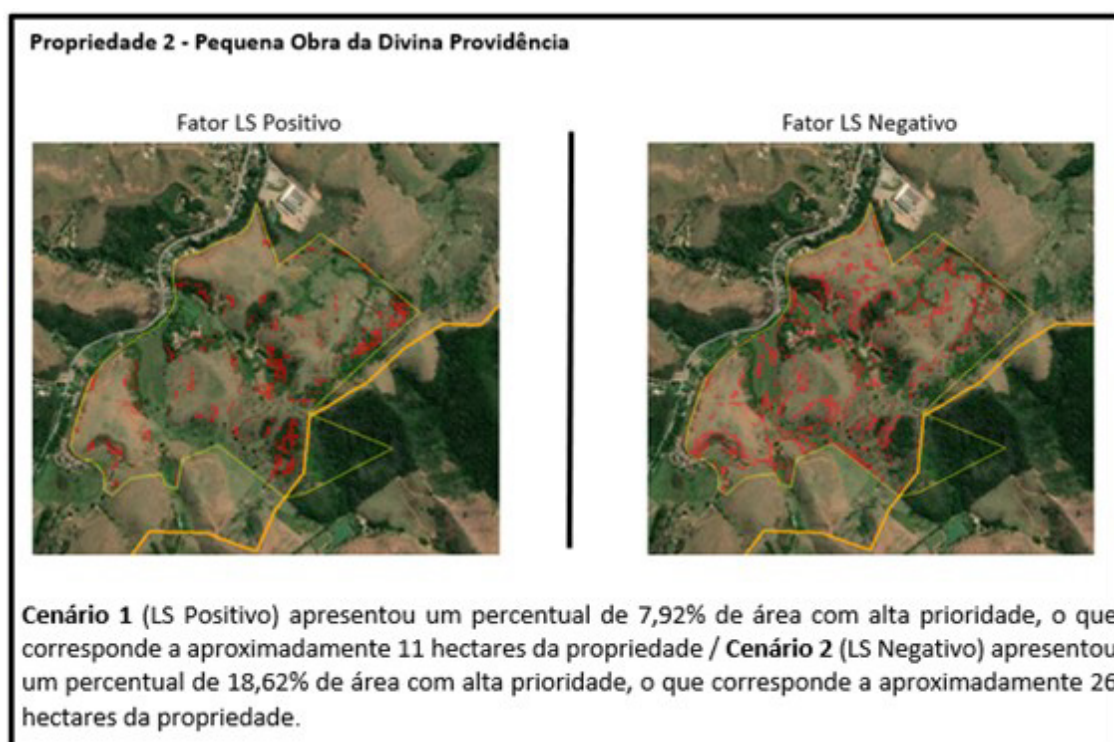
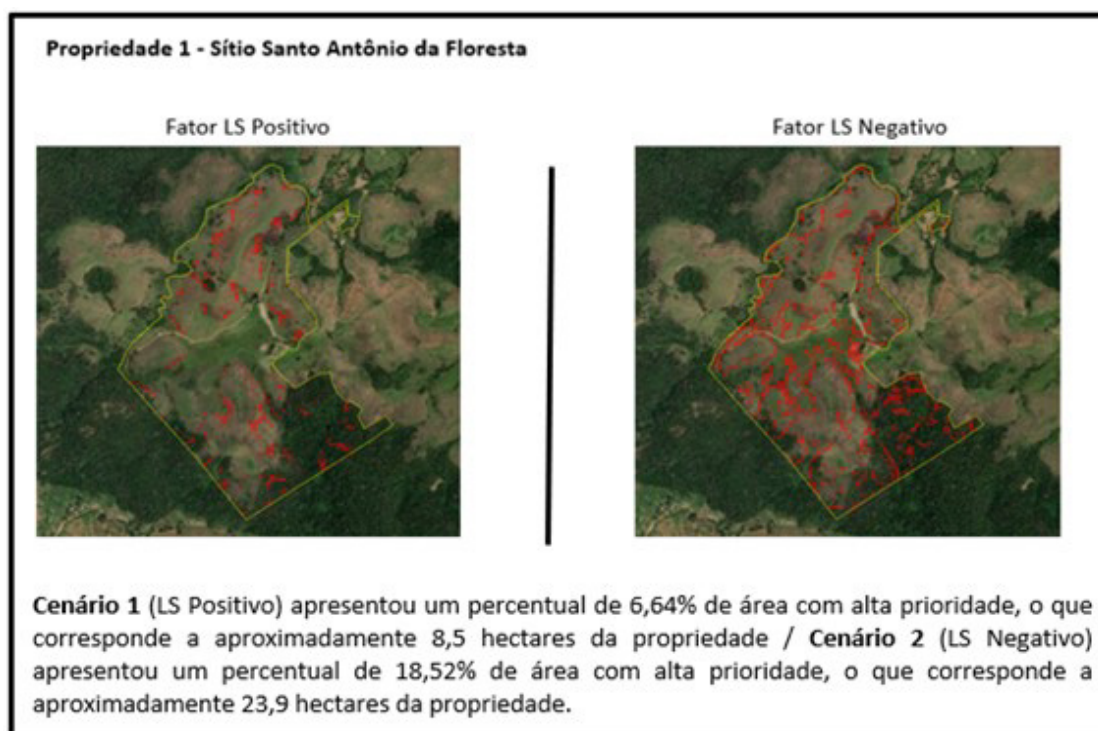
- Lopes, F. C. A. (2012). 2012, Uso de atributo topográfico para estabelecer relação topografia-vazão na bacia do Altíssimo rio Negro, PR/SC. *Revista Geonorte*, 3(4), 1320-1331.
- Marques, O., Tienne, L., Cortines, E., & Valcarcel, R. (2005). Atributos ambientais definidores de presença de fragmentos florestais de Mata Atlântica em microbacias instáveis. *EDUR. Revista Universidade Rural. Série Ciências da Vida*, 2005, 145-150.
- Mello, Y. R., & Silveira, C. T. (2018). Análise de modelos digitais de elevação e geração de atributos topográficos para a região da Serra do Mar do estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geografia*, 11(6), 2029-2045.
- Oliveira, A. H., Klinke Neto, G., & Pereira, S. Y. (2016). Índice topográfico aplicado à determinação de áreas favoráveis para infiltração de água no perfil do solo. In *Anais do 13º Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas* (pp. 129-136). Poços de Caldas: ABTE.
- Pelton, J., Frazier, E., & Pickilings, E. (2014). *Calculating slope length factor (LS) in the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Recuperado em 22 de junho de 2022, de https://www.researchgate.net/profile/Firoz_Ahmad3/post/What_is_the_best_method_
- Pieroni, J. P. (2018). *Definição de Áreas Prioritárias à recuperação, visando a produção de água em microbacias hidrográficas* (Tese de doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro.
- Pinheiro, L. S., & Cunha, M. L. C. (2010). Geração do fator topográfico (LS) da EUPS para modelagem de bacia hidrográfica. In *VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física*. Coimbra, Portugal.
- Rennó, C. D., & Soares, J. V. (2003). Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. In *Anais do XI Simpósio Brasileiro Sensoriamento Remoto*. Belo Horizonte.
- Rio Rural. (2015). *Diagnóstico rural participativo consolidado e plano executivo da Microbacia São Francisco*. Valença, RJ.
- Rocha, C. H., Souza, M. L. P., & Milano, M. S. (1997). Ecologia da paisagem e manejo sustentável dos recursos naturais. *Geografia*, 22(2), 57-79.
- Santos, D. A. R., & Moraes, F. (2012). Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Lago Verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de Lagoa da Confusão – TO. *Revista Geonorte*, 3(4), 617-629.
- Santos, G. L., Pereira, M. G., Delgado, R. C. E., & Moraes, L. F. D. (2017). Padrões da regeneração natural na região de Mar de Morros, Pinheiral-RJ. *Floresta e Ambiente*, 24, e20150081.
- Schmidt, J., Evans, I. S., & Brinkmann, J. (2003). Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(8), 797-814.
- Silva, M. A. R., & Oliveira, M. N. (2004). *Meteorologia básica: apostila*. Rio de Janeiro: UFRJ.
- Sirtoli, A. E., Silva, C. R., Ribeiro, S. R. A., Montovani, L. E., & Oka-Fiori, C. (2008). Atributos topográfico secundários no mapeamento de pedofomas. *Revista Geociências*, 27(1), 63-77.
- Silveira, C. S., & Silva, V. V. (2010). Dinâmicas de regeneração, degeneração e desmatamento da vegetação provocadas por fatores climáticos e geomorfológicos: uma análise geoecológica através de SIG. *Revista Árvore*, 34(6), 1025-1034.
- Soares-Filho, B. S., Carmo, V. A., & Nogueira, W. J. (1998). Metodologia para elaboração do mapa de potencial erosivo da Bacia do Rio das Velhas. *Geomomas*, 5, 34-56.
- Soares Neto, G. B., Silveira, L. G., & Faria, K. M. S. (2018). Aplicação das geotecnologias para parametrização do mapeamento geomorfológico. In *XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física e Aplicada* (pp. 5083-5094). Campinas.
- Teodoro, V. L. I., Teixeira, D., Costa, D. J. L., & Fuller, B. B. (2007). O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, 11(1), 137-156.
- Tomlin, C. D. (1990). *Geographic information systems and cartographic modeling* (249 p.). Englewoods Cliffs: Prentice-Hall.
- Tucci, C. E. M. (1993). *Hidrologia: ciência e aplicação*. EDUSP, Editora da UFRGS.
- Tucci, C. E. M. (2001). *Gestão da água no Brasil* (156 p.). Brasília: UNESCO.
- Tucci, C. E. M. (2005). *Gestão de águas pluviais urbanas*. Ministério das Cidades, Global Water, Partnership - World Bank - Unesco.
- Wishmeier, W. H. (1962). Storms and Soil Conservation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17, 55-59.

Contribuições dos autores:

Helton Santos de Souza: escreveu o trabalho.

Francisco de Assis Dourado da Silva: orientou, supervisionou e revisou o trabalho.

ANEXO A – RESULTADOS LOCAIS REPRESENTATIVOS DE ÁREAS COM ALTA PRIORIDADE DE PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO VEGETAL, NA BACIA DO RIO DAS FLORES, RJ.



Propriedade 3 – Fazenda Campo Alegre

Fator LS Positivo



Fator LS Negativo



Cenário 1 (LS Positivo) apresentou um percentual de 6,25% de área com alta prioridade, o que corresponde a aproximadamente 30 hectares da propriedade/ **Cenário 2** (LS Negativo) apresentou um percentual de 20% de área com alta prioridade, o que corresponde a aproximadamente 97 hectares da propriedade.

Propriedade 4 – Fazenda Nossa Senhora da Aparecida

Fator LS Positivo



Fator LS Negativo



Cenário 1 (LS Positivo) apresentou um percentual de 7,89% de área com alta prioridade, o que corresponde a aproximadamente 15 hectares da propriedade/ **Cenário 2** (LS Negativo) apresentou um percentual de 20,37% de área com alta prioridade, o que corresponde a aproximadamente 40 hectares da propriedade.

Propriedade 5 – Fazenda Santa Cruz

Fator LS Positivo



Fator LS Negativo



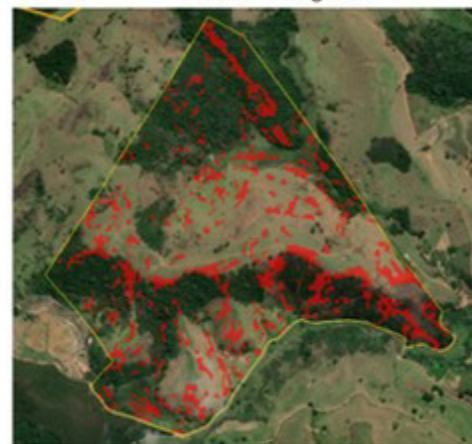
Cenário 1 (LS Positivo) apresentou um percentual de 7,18% de área com alta prioridade, o que corresponde a aproximadamente 9,1 hectares da propriedade/ **Cenário 2** (LS Negativo) apresentou um percentual de 19,86% de área com alta prioridade, o que corresponde a aproximadamente 25,2 hectares da propriedade.

Propriedade 6 – Fazenda Traga Luz

Fator LS Positivo



Fator LS Negativo



Cenário 1 (LS Positivo) apresentou um percentual de 11,37% de área com alta prioridade, o que corresponde a aproximadamente 16,4 hectares da propriedade/ **Cenário 2** (LS Negativo) apresentou um percentual de 17,71% de área com alta prioridade, o que corresponde a aproximadamente 25,6 hectares da propriedade.

