

Vulnerabilidade natural da bacia do rio Piracicaba (Minas Gerais) nos anos de 2021, 2022 e 2023 empregando o modelo HAND

Eliane Maria Vieira^{1*}, Gustavo de Oliveira Dias², Jose Augusto Costa Goncalves³, Lucas Guerra Alves da Cunha⁴, Roberto Cezar de Almeida Monte Mor⁵

¹Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Brasil. (*Autor correspondente: elianevieira@unifei.edu.br)

²Graduado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Brasil.

³Doutor Geologia, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Brasil.

⁴Graduado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Brasil.

⁵Doutor Engenharia Civil, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 14/10/2025 – Revisado em: 02/01/2026 – Aceito em: 23/01/2026

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a vulnerabilidade natural para a bacia do rio Piracicaba nos anos de 2021, 2022 e 2023 foram empregadas as variáveis geologia, pedologia, declividade, Uso e cobertura do solo e áreas suscetíveis à inundação, obtida por meio do modelo HAND. Com a finalidade de se compara os resultados empregando-se o modelo HAND, foram gerados dois mapas, com e sem a adoção deste. A espacialização da vulnerabilidade, com a adoção do modelo HAND demonstrou um decréscimo da área classificada com média e um incremento nas classes baixo e alto entre os anos de 2021 e 2022 e um decréscimo da classe baixo e aumento da classe médio entre os anos de 2022 e 2023. Com espacialização da vulnerabilidade sem a adoção do modelo HAND para o ano de 2021 e comparando o mesmo ano empregando este modelo, notou-se a diferença nos resultados, principalmente nas regiões sudoeste e nordeste da bacia, na região sudoeste ressalta-se a presença da classe muito alto e um aumento expressivo das classes médio e alto ao longo da bacia (sem o emprego do HAND) quando comparado com o modelo que empregou o HAND. Assim, houve diferenças em relação aos resultados das duas metodologias, sendo o cenário gerado sem o emprego do HAND mais conservador, o que proporcionaria uma maior sustentabilidade na bacia, fazendo deste o mais recomendado. Neste sentido, é importante que os direcionamentos que sejam apontados no plano de bacia, considerando esta modelagem, também integre as comunidades locais e os agricultores, buscando alinhar as ações sugeridas com a sustentabilidade econômica destes, para a busca da melhoria das condições socioambientais da bacia de forma duradoura.

Palavras-Chaves: Sustentabilidade, bacia hidrográfica, conservação.

Natural vulnerability of the Piracicaba river basin/MG in the years 2021, 2022 and 2023 using the HAND model

ABSTRACT

This work aimed to analyze the natural vulnerability for the Piracicaba river basin in the years 2021, 2022 and 2023, using the variables geology, pedology, slope, soil use and coverage and areas susceptible to flooding, obtained through the HAND model. In order to compare the results using the HAND model, two maps were generated, with and without its adoption. The spatialization of vulnerability, with the adoption of the HAND model, demonstrated a decrease in the area classified as medium and an increase in the low and high classes between the years 2021 and 2022 and a decrease in the low class and an increase in the medium class between the years 2022 and 2023. With the spatialization of vulnerability without adopting the HAND model for the year 2021 and comparing the same year using this model, a difference in the results was noted, mainly in the southwest and northeast regions of the basin, in the southwest region the presence of very high class and a significant increase in the medium and high classes throughout the basin (without the use of HAND) when compared to the model that used HAND. Thus, there were differences in relation to the results of the two methodologies, with the scenario generated without the use of HAND being more conservative, which would provide greater sustainability in the basin, making it the most recommended. In this sense, it is important that the directions outlined in the basin plan, considering this modeling, also integrate local communities and farmers, seeking to align the suggested actions with their economic sustainability, in order to improve the socio-environmental conditions of the basin. lastingly.

Keywords: Sustainability, watershed, conservation.

Vieira, E. M., Dias, G. O., Gonçalves, J. A. C., Cunha, L. G. A., Monte Mor, R. C. A. (2026). Vulnerabilidade natural da bacia do rio Piracicaba (Minas Gerais) nos anos de 2021, 2022 e 2023 empregando o modelo HAND. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v.7, n.1, p.20-33.



1. Introdução

O termo vulnerabilidade se aplica ao grau de suscetibilidade em que o meio (componente, conjunto de componentes ou de uma paisagem) apresenta em resposta a uma ação, atividade ou fenômeno (Santos, 2007), assim a vulnerabilidade é uma condição definida em um determinado momento que pode ser alterada em função das medidas que se executa para aumentar a capacidade de resposta frente à suscetibilidade (que é intrínseca ou do ambiente), assim reduzindo os impactos socioambientais.

Os impactos socioambientais no espaço brasileiro se destacam por eventos relacionados à precipitação e consequentemente agravam a situação de vulnerabilidade da população expostas aos riscos ambientais como inundações e escorregamentos (Milanesi et al., 2017), seja pelo histórico de ocupação que se deu ao longo dos cursos d'água na maior parte das cidades brasileiras, seja pela ocupação de encostas, muitas vezes já naturalmente instáveis, mas que com a movimentação do solo para as construções e consequente remoção da cobertura vegetal se tornam ainda mais suscetíveis a escorregamentos. Assim a ocupação do espaço geográfico está diretamente ligada à vulnerabilidade na medida em que espaços ambientalmente mais frágeis são ocupados por usos para os quais tais locais se tornam vulneráveis e consequentemente materializam os riscos. Quando se observa os locais afetados por inundações, percebe-se que, neste caso, não está necessariamente ligado à uma condição de fragilidade econômica da população afetada, visto que muitos destes locais são valorizados economicamente, até o momento em que passam a sofrer recorrentes inundações. Já os locais que se apresentam mais suscetíveis a escorregamento, são geralmente ocupados por populações com menor poder aquisitivo, buscando assim locais com um valor imobiliário mais baixo ou mesmo por meio de ocupações clandestinas.

A ocupação não é estática, seja ela formalizada ou irregular, há variações nos usos ao longo dos anos, frequentemente tendendo a aumentar a vulnerabilidade local, portanto o monitoramento destes usos ao longo dos anos é um ponto fundamental para a gestão do território, seja em ambiente urbano ou rural, e que pode ser trabalhado no âmbito das bacias hidrográficas por meio do Plano de Manejo da Bacia, principalmente quando se tem por objetivo tratar dos riscos relacionados aos processos de inundação, já que a água que se concentra em determinada região é proveniente do escoamento de uma área maior a montante, sendo portanto governada pela capacidade de infiltração nestas áreas.

Devido à relação dos impactos ambientais com a precipitação, estudos que envolvam a simulação hidrológica nas bacias podem dar subsídios importantes para o plano de manejo, principalmente no momento atual onde já se detecta alterações das distribuições e volumes precipitados decorrentes das mudanças climáticas. A capacidade de simular cenários que alterem o fluxo da água na bacia, pode demonstrar quais seriam as melhores intervenções na bacia que teriam a capacidade de se reduzir a vulnerabilidade ambiental.

Tais simulações empregam como informações as características locais relacionadas ao processo hidrológico na bacia como as classes de solos, por meio do mapa pedológico (que podem apresentar uma maior ou menor capacidade de infiltração) a cobertura destes por meio do mapa de uso e ocupação do solo (que a depender da cobertura pode aumentar a infiltração ou o escoamento superficial) a inclinação do terreno (que pode aumentar a velocidade de escoamento e consequentemente uma maior concentração da água em regiões mais baixas do terreno)

A integração destas informações se dá por meio da aplicação de técnicas desenvolvidas nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), envolvendo os Modelos Digitais de Elevações (MDE), como fonte da altimetria para a obtenção da declividade e delimitação das regiões mais baixas onde podem se concentrar os fluxos e assim as delimitações de zonas que apresentam riscos de inundação, portando sendo uma importante ferramenta para a delimitação do grau de vulnerabilidade de cada região (Pinheiro, 2024).

Esta integração pode ocorrer por meio da soma das variáveis (geologia, pedologia, declividade, Uso e cobertura do solo), empregando como método a análise multicritério, por meio da álgebra de mapas, sendo estes devidamente reescalados, para permitir a soma e a ponderação, como no trabalho desenvolvido por

Santos (2014), onde além do reescalonamento foi realizada uma ponderação dos atributos. Contudo esta metodologia, embora empregue a declividade, não identifica as regiões mais baixas do terreno que poderiam ser atingidas por inundações com o aumento do nível dos rios, é neste contexto que se destaca o método de modelagem hidrológica do terreno – HAND.

O HAND emprega um modelo digital de elevação (MDE) e a partir da inserção alturas de elevação do nível do curso d'água, fornecidas pelo operador, gera a delimitação de isolinhas de contorno do modelo hidrológico, similar ao processo de extração de curvas de nível (Nobre et al., 2016). Assim, quanto menor a cota da isolinha maior é a suscetibilidade à inundações, delimitando-se assim as áreas mais vulneráveis.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo identificar as áreas com maiores vulnerabilidades ambientais, na bacia do rio Piracicaba/MG, afluente do rio Doce, localizada no estado de Minas Gerais, comparando os resultados de duas metodologias distintas (uma empregada por Sokoloski et al. (2019), e uma empregando o modelo HAND) para os anos de 2021, 2022 e 2023.

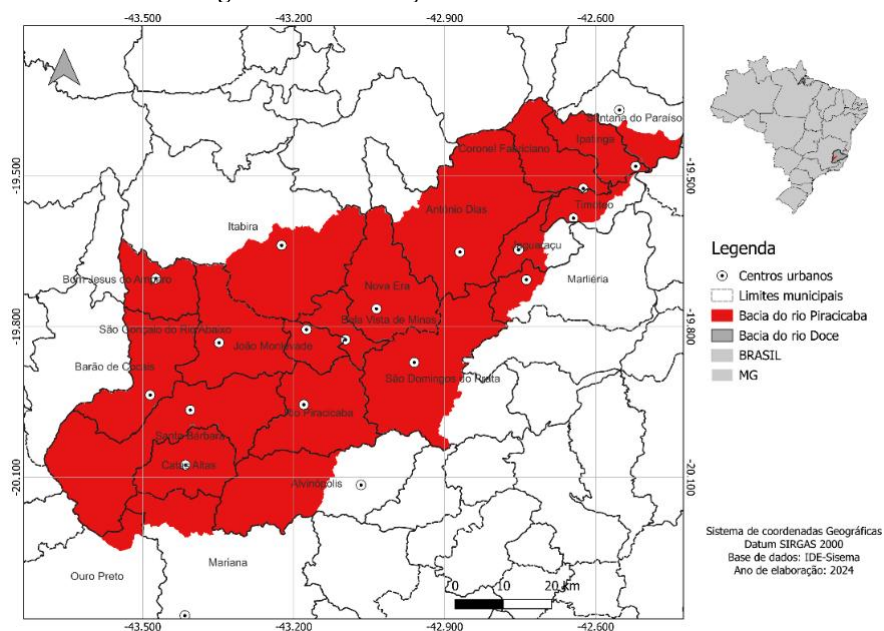
A identificação de alterações na vulnerabilidade ao longo dos anos na bacia pode direcionar ações para áreas que estão sofrendo uma maior degradação ambiental bem como demonstrar as regiões que vem aumentando sua resiliência neste período, informações estas fundamentais para a elaboração e revisão de planos de manejo.

2. Material e Métodos

2.1 Características da área de estudos

A área na qual foi desenvolvida o presente estudo é a bacia hidrográfica do rio Piracicaba, localizada na porção leste do estado de Minas Gerais. A bacia é uma sub-bacia do rio Doce e abrange 21 municípios, dos quais 17 estão totalmente inseridos na bacia. Tem como rio principal o rio Piracicaba, com nascente no município de Ouro Preto e foz no município de na divisa dos municípios de Timóteo e Ipatinga, percorrendo 241 km (IGAM, 2024).

Figura 1 – Localização da bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Segundo o Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão da Bacia do Rio Piracicaba (2010) a maior parte da bacia apresenta sistemas antropizados (60%) e menos da metade é ocupada por áreas em estágio natural (40%). Abrangendo em sua maior parte o bioma Mata Atlântica e em menor extensão o bioma Cerrado (CBH-Doce, 2024).

Ainda segundo o Plano, na bacia predominam os solos Latossolos, Argilossolos e Cambissolos, sendo os Argilossolos os de maior erodibilidade e os Latossolos os que apresentam menores erodibilidades. De acordo com Camargo et al. (1986), os Latossolos apresentam uma coloração avermelhada devido à presença de óxidos de ferro, indicando uma intensa lixiviação e uma alta taxa de intemperismo químico, apresentam boa capacidade de infiltração e menores propensões à erosão. Os Cambissolos geralmente apresentam uma estrutura bem desenvolvida e moderada fertilidade, no entanto, eles também podem ser suscetíveis à erosão em áreas de declive acentuado (EMBRAPA, 1979). Já os Argilossolos são comuns em áreas de relevo suavemente ondulado e apresentam uma textura argilosa que proporciona uma boa capacidade de retenção de água. Os argilossolos vermelhos são amplamente utilizados para culturas de subsistência e pastagem (CAMARGO et al., 1986).

2.2 Análise multicritério

Para elaboração do mapa de vulnerabilidade da sub-bacia do rio Piracicaba/MG foi utilizado Sistema de Informações Geográficas (SIG) QGIS 3.34.10, Prizren, como ferramenta de análise e integração dos fatores que definem a vulnerabilidade da bacia para os anos de 2021, 2022 e 2023.

Foi empregado como método de integração a análise multicritério, por meio da álgebra de mapas e para a ponderação dos atributos por meio de uma adaptação da metodologia empregada por Santos (2014), tendo como variáveis: geologia, pedologia, declividade, Uso e cobertura do solo e áreas suscetíveis à inundação.

Inicialmente foram trabalhadas as classes geologia, pedologia, declividade e cobertura vegetal e à inundação para a variável áreas suscetíveis à inundação, considerando o grau de vulnerabilidade ambiental à erosão e estratificando-as em classes que receberam pesos variando de 1 a 5, sendo o valor mais elevado o correspondente ao maior grau de vulnerabilidade natural, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Grau de vulnerabilidade natural.

| Peso | Grau de vulnerabilidade |
|-------------|--------------------------------|
| 1 | Muito baixo |
| 2 | Baixo |
| 3 | Médio |
| 4 | Alto |
| 5 | Muito alto |

Fonte: Santos (2014)

Na segunda fase as variáveis foram integradas, empregando a álgebra de mapas. Assim todas as variáveis foram submetidas à operação de álgebra de mapas empregando a equação 1 (Equação 1).

$$VN = \frac{G+P+D+CV+IN}{5} \quad (1)$$

Onde: VN é a vulnerabilidade natural, G a geologia, P a pedologia, D a declividade, CV a cobertura vegetal (Uso e cobertura do solo) e IN as áreas suscetíveis à inundação.

2.3 Estratificação das variáveis

Para a elaboração dos mapas estratificados foram empregados os mapas geológico e pedológico do estado de Minas Gerais disponibilizados na plataforma Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-Sisema) (IDE-Sisema, 2024). As classes geológicas foram reclassificadas de acordo com o grau de suscetibilidade à erosão empregando-se com referência o trabalho desenvolvido por Crepani et al. (2001) e o mapa pedológico foi estratificado de acordo com a propensão natural à erosão, conforme trabalho desenvolvido por Sokoloski et al. (2019). Ambos foram recortados para o limite da bacia, reclassificados e convertidos do formato vetorial (formato original) para o formato raster.

O mapa de declividade foi gerado a partir do MDE do ALOS PALSAR, pré-processado pela Alaska Satellite Facility, com resolução espacial de 12,5 m (ASF, 2024). Foram empregadas cinco cenas (AP 27379 FBS F6780, AP 27131 FBS F6780, AP 26956 FBS F6780, AP 26956 FBS F6770 e AP 26460 FBS F6790). Foi realizado o mosaico das cenas, recortado para o limite da bacia, posteriormente empregada a ferramenta DEDAL Declividade para o cálculo da declividade em porcentagem e reclassificado conforme Sokoloski et al. (2019).

Para o mapa de uso e cobertura do solo dos anos de 2021, 2022 e 2023 foram adquiridos os mapas do estado de Minas Gerais da plataforma MapBiomas, recortados para o limite da bacia. Os mapas foram reclassificados considerando a suscetibilidade à erosão das classes de uso e ocupação conforme desenvolvido por Sokoloski et al. (2019).

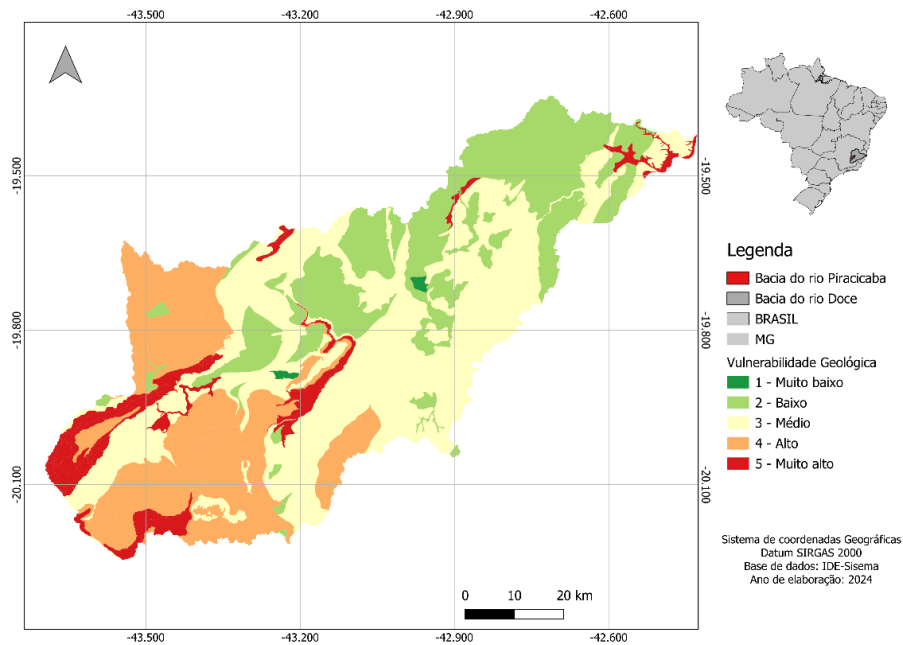
Para a delimitação das áreas mais susceptíveis à inundações foi adquirido o programa HAND Model, disponível de forma gratuita no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2024), onde foi inserido o MDE advindo do ALOS PALSAR (descrito anteriormente) e calcula as zonas de inundação por meio da ferramenta Dem2Hand.

3. Resultados e Discussão

Cada variável foi espacializada e estratificada para a bacia do Rio Piracicaba, conforme descrito na metodologia e apresentado nas figuras a seguir.

A vulnerabilidade natural da bacia quanto à variável geologia pode ser observada na figura 2, sendo a classe 3 – média vulnerabilidade a predominante na bacia com 41,9% da área, seguida das classes 4 – alta vulnerabilidade com 27% da área e 2 – baixa vulnerabilidade com 22%.

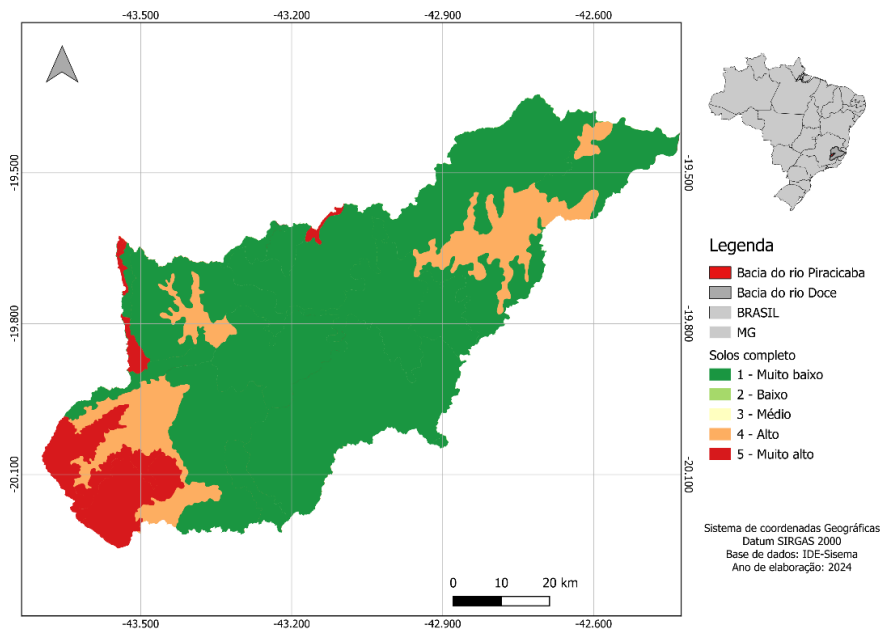
Figura 2 – Vulnerabilidade geológica da bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em relação à pedologia a bacia apresenta-se com vulnerabilidade predominantemente baixa, com 59,8% da área da bacia, seguida da classe muito alta com 27,7% e da classe alta com 12,5%, como pode ser observado na figura 3. A bacia não apresenta áreas classificadas com vulnerabilidade baixa ou média.

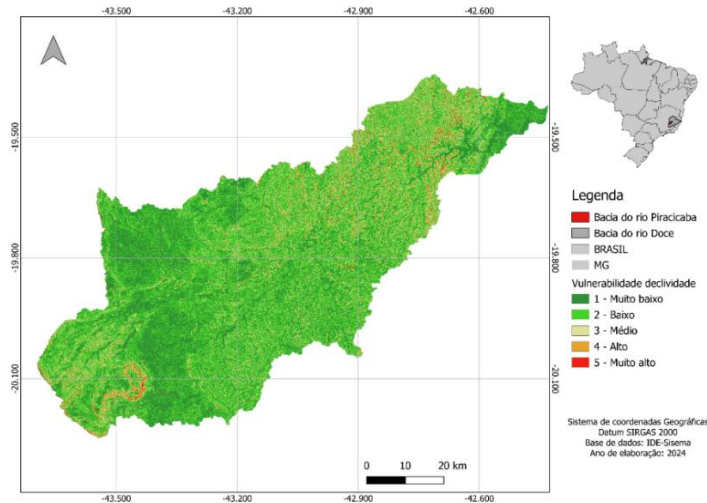
Figura 3 – Vulnerabilidade pedológica da bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A vulnerabilidade em relação à declividade na bacia foi gerada a partir do MDE do ALOS PALSAR, tendo assim, uma resolução espacial de 12,5 m. O mapa de declividade gerado foi reclassificado para as classes de vulnerabilidade apresentando predominância das classes Baixa e Muito baixa, com 49,41% e 32,24% respectivamente, seguidas das classes média (11,99%), alta com 5,83% e muito alta com 0,51% da área da bacia (Figura 4).

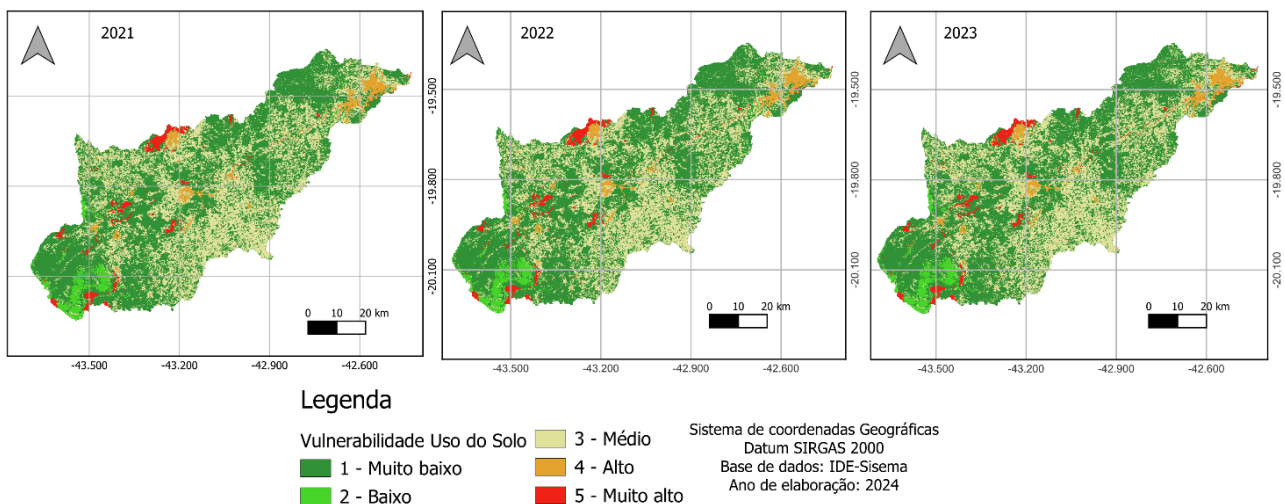
Figura 4 – Vulnerabilidade em relação à declividade da bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a cobertura vegetal foram empregados três mapas de uso e ocupação do solo, obtidos da plataforma MapBiomas, recortados para o limite da bacia e reclassificados conforme Sokoloski et al. (2019). Percebe-se pela figura 5, que não houve variações espaciais da vulnerabilidade natural em relação ao uso e ocupação do solo ao longo dos 3 anos analisados.

Figura 5 – Vulnerabilidade em relação ao uso e ocupação do solo da bacia do rio Piracicaba.

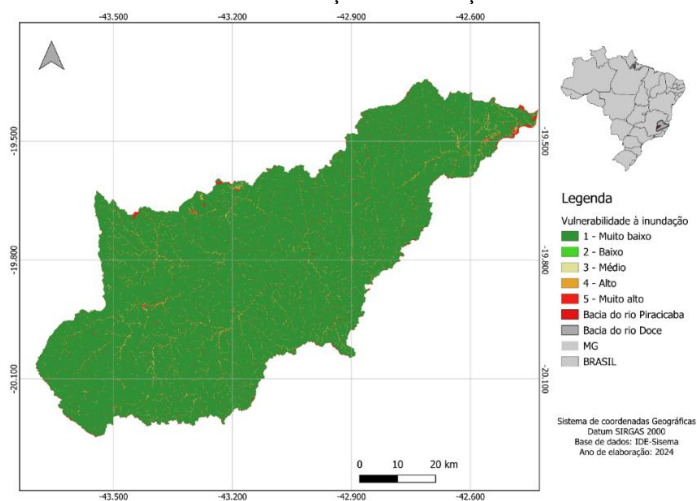


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por fim foi gerada a vulnerabilidade relacionada à suscetibilidade a inundações por meio da reclassificação do modelo HAND. Neste trabalho considerou-se o grau de susceptibilidade à inundação: muito baixo para as áreas com cotas iguais ou acima de 4m de altura do HAND, baixo para cotas ente 3 e 4m de altura do HAND, médio para cotas entre 2 e 3m de altura do HAND, alto para cotas entre 1 e 2m de altura do HAND e muito alto para cotas iguais ou inferiores a 1m de altura do HAND, conforme classificação adotada por Gomes e Filgueira (2024).

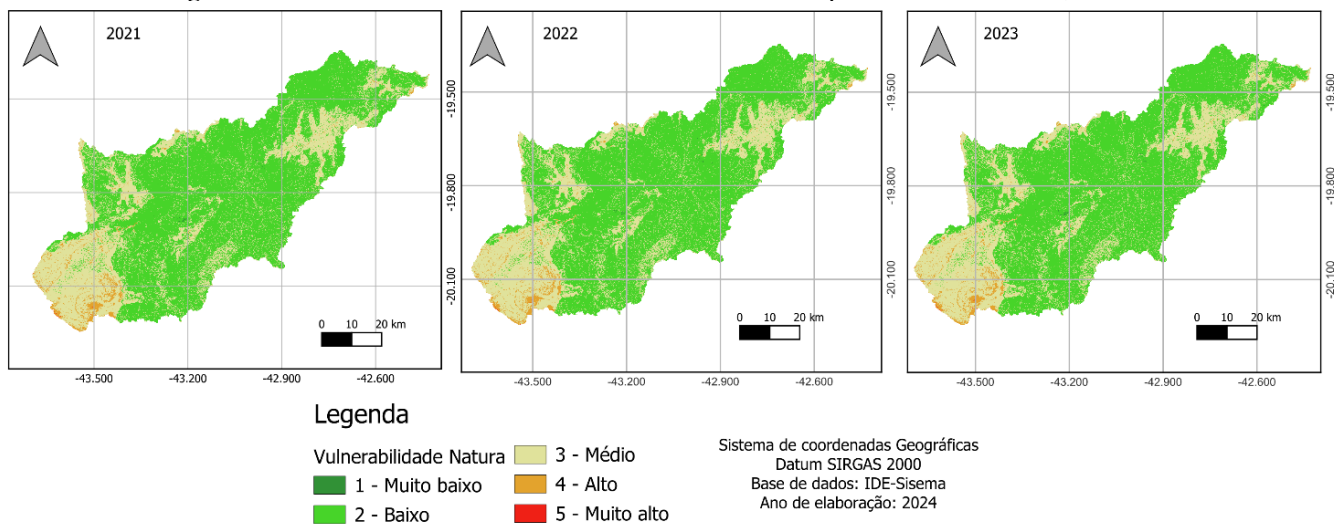
Assim, as regiões que apresentaram maiores vulnerabilidades são aquelas que margeiam os cursos d'água, como pode ser observado na figura 6. A classe predominante de vulnerabilidade em relação à inundação na bacia foi a classe muito baixo com 92,79% da área, seguida pela classe muito alto com 3,89%, as demais classes apresentaram áreas próximas a 1% da bacia (cada classe).

Figura 6 – Vulnerabilidade em relação a inundação da bacia do rio Piracicaba.



Por meio da álgebra de mapas, empregando a equação 1, foram gerados os mapas de vulnerabilidade natural para os anos de 2021, 2022 e 2023, como apresentado na figura 7.

Figura 7 – Vulnerabilidade natural da bacia do rio Piracicaba para aos anos de 2021, 2022 e 2023.



Visualmente não se percebe alterações ao longo dos 3 anos analisados, contudo ao quantificar cada classe de vulnerabilidade natural (tabela 2) fica evidente a alteração ocorrida entre os anos de 2021, 2022 e 2023, com o decréscimo da área classificada com média e um incremento nas classes baixo e alto entre os anos de 2021 e 2022 e um decréscimo da classe baixo e aumento da classe médio entre os anos de 2022 e 2023.

Tabela 2 – Quantificação do grau de vulnerabilidade natural.

| Grau de vulnerabilidade | Área (km2) em 2021 | % em 2021 | Área (km2) em 2022 | % em 2022 | Área (km2) em 2023 | % em 2023 |
|--------------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| Muito baixo | 349,69 | 0,03 | 348,91 | 0,03 | 350,78 | 0,03 |
| Baixo | 681280,16 | 66,40 | 681465,94 | 66,42 | 679716,41 | 66,25 |
| Médio | 322068,75 | 31,39 | 321697,97 | 31,35 | 323395,78 | 31,52 |
| Alto | 22171,41 | 2,16 | 22356,09 | 2,18 | 22405,63 | 2,18 |
| Muito alto | 180,00 | 0,02 | 181,09 | 0,02 | 181,41 | 0,02 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Embora em termos de porcentagem da área da bacia a diferença não seja grande, quando se analise a extensão territorial houve uma redução de aproximadamente 370 km² de áreas que eram da classe médio (tabela 3).

Tabela 3 – Diferenças do grau de vulnerabilidade natural entre os anos.

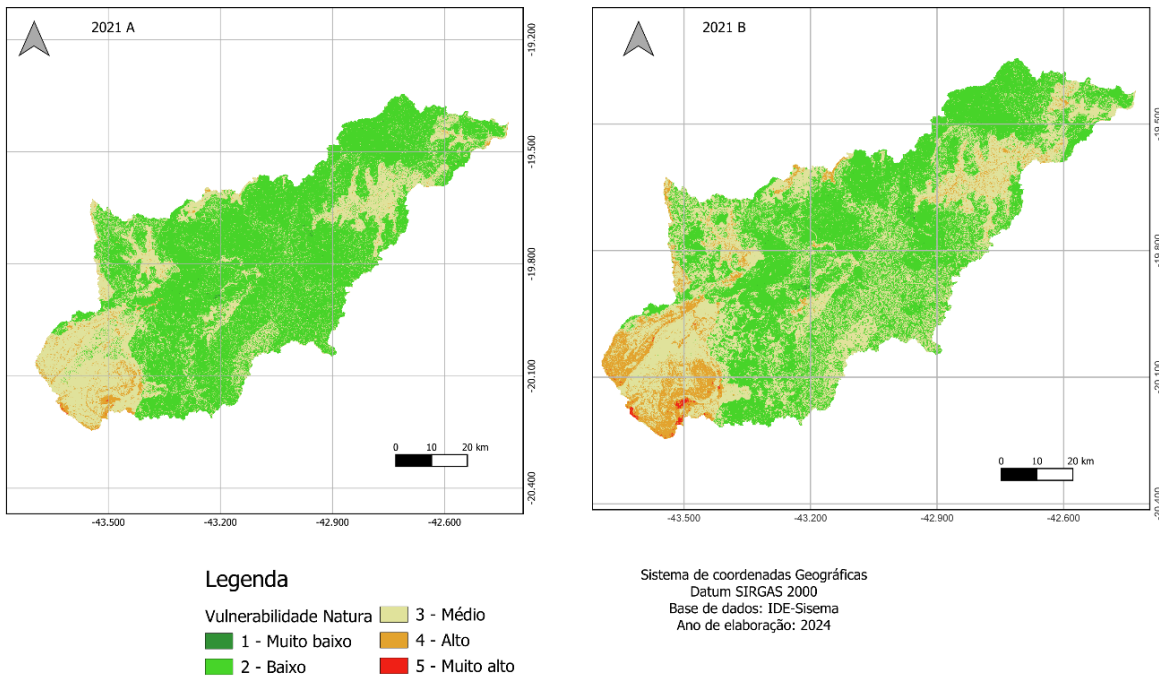
| Grau de vulnerabilidade | Dif. Área (km2) entre 2021 e 2022 | Dif. Área (km2) entre 2022 e 2023 |
|--------------------------------|--|--|
| Muito baixo | -0,78125 | 1,88 |
| Baixo | 185,78125 | -1749,53 |
| Médio | -370,78125 | 1697,81 |
| Alto | 184,6875 | 49,53 |
| Muito alto | 1,09375 | 0,31 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tais áreas, em função da alteração no uso e cobertura do solo passaram a ser classificadas com outros graus de vulnerabilidade, demonstrando de forma incisiva que o manejo destes locais é importantíssimo para a busca da sustentabilidade na bacia. baixo em alguns locais já apontados com classe de vulnerabilidade de médio a muito alto deve receber mais atenção no plano de manejo desta bacia, buscando e induzindo ocupações que sejam menos impactantes ambientalmente, mas que garantam a saúde econômica das famílias que ocupam estes espaços.

A fim de se comparar os resultados empregando o modelo HAND foi aplicada a mesma metodologia empregada no trabalho de Sokoloski et al. (2019), adotando o ano de 2021 (por ser o ano mais próximo ao trabalho desenvolvido pelos autores) conforme figura 8.

Figura 8 – Comparação entre a Vulnerabilidade natural empregando o HAND para o ano de 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Visualmente percebe-se a diferença nos resultados, principalmente nas regiões sudoeste e nordeste da bacia, na região sudoeste resalta-se a presença da classe muito alto na metodologia de Sokoloski et al. (2019), neste também há um aumento expressivo das classes médio e alto ao longo da bacia (figura 8 B) quando comparado com o modelo que empregou o HAND (figura 8A). Tal variação é confirmada com a quantificação das áreas de cada classe apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Quantificação do grau de vulnerabilidade natural com o HAND e sem este.

| Grau de vulnerabilidade | Área (km2) em 2021 (HAND) | % em 2021 (HAND) | Área (km2) em 2021 | % em 2021 |
|-------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|-----------|
| Muito baixo | 349,69 | 0,03 | 415,31 | 0,04 |
| Baixo | 681280,16 | 66,40 | 528969,69 | 51,55 |
| Médio | 322068,75 | 31,39 | 420628,75 | 40,99 |
| Alto | 22171,41 | 2,16 | 73821,09 | 7,19 |
| Muito alto | 180,00 | 0,02 | 2224,53 | 0,22 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Houve uma redução da área classificada como médio com a aplicação do modelo (HAND) passado de 40,99% da área da bacia, sem o emprego do HAND, para 31,39% com o seu emprego, e um aumento da classe baixo, e uma redução nas demais classes. Destaca-se as maiores áreas nas classes alto e muito alto, sem o

emprego do HAND, o que torna o cenário mais conservador.

Pode-se observar que as áreas classificadas para a vulnerabilidade ambiental, em ambas as metodologias, apresentam-se em sua maior parte com o grau baixo (acima de 50% da área total da bacia em ambas as metodologias) e médio de vulnerabilidade ambiental (acima de 30% e 40% da área nas metodologias). Este resultado é semelhante ao encontrado por Carvalho et al. (2022) em seu estudo na região Sudeste Brasileira.

As regiões que apresentaram classes de muito baixa e baixa vulnerabilidade ambiental, estão em locais ainda preservados que apresentam cobertura florestal, e nesta bacia com predominância do latossolo. Embora com um grau de vulnerabilidade baixo não se exime a necessidade da preservação destas coberturas, que segundo Belato e Serrão (2019) devem ser preservadas.

As classes de média e alta vulnerabilidade ambiental compreendem áreas de maior antropização da área de estudo, sendo ocupadas por pastagens e regiões com baixa densidade de florestas, em regiões de cambissolos e argissolos. Estas características para a classe média e alta também foram detectadas nos estudos realizados em diferentes municípios brasileiros, como os desenvolvidos por Carvalho et al. (2022), Klais et al. (2012), Pereira e Pereira (2013), Trevisan et al. (2018), entre outros. Por serem mais vulneráveis devem receber maior atenção para a conservação da biodiversidade e receber projetos de recuperação ambiental ou técnicas mais sustentáveis de manejo.

Outro ponto importante em relação às áreas classificadas como alta e muito alta vulnerabilidade com o emprego do HAND, estão em áreas urbanas com a presença de edificações em muitos destes locais, o que evidencia o risco a que estão expostas estas populações, e que tende a se agravar com as alterações das precipitações ocasionadas pelas mudanças climáticas, que segundo o estudo realizado por Neres et al. (2012), tende a aumentar os volumes precipitados e a frequência de extremos climáticos.

O estudo foi realizado em escala regional, englobando toda a bacia do rio Piracicaba, assim, é importante frisar que os resultados estão condicionados a tal escala, portanto uma análise mais detalhada nas áreas urbanas seria interessante, pois permitiria identificar de forma mais local as áreas que podem ser atingidas pela elevação do nível dos corpos hídricos.

Outro ponto a se ressaltar é que o emprego do HAND se limita a espacializar as áreas que seriam atingidas com a elevação da cota dos rios, assim em trabalhos futuros podem ser incorporadas à análise o emprego de modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos mais complexos, que poderiam simular cenários considerando as previsões climáticas.

Ao observar os mapas gerados nos três anos de estudo, é possível observar que as áreas classificadas de média a alta vulnerabilidade se mantem nas mesmas regiões geográficas, demonstrando que os usos do solo em tais locais se encontram consolidados ao longo deste período. Tal fato também pode ser observado para as demais classes de vulnerabilidade com uma redução das áreas de menor vulnerabilidade dando lugar à classe média vulnerabilidade e alta vulnerabilidade.

O crescimento da área de alta vulnerabilidade na bacia deve ser observado na elaboração do plano de manejo desta para os anos futuros, visto que a vulnerabilidade está muito ligada à cobertura do solo período da sua elaboração, o plano pode redirecionar tais usos de forma a minimizar este crescimento e até prover a redução desta classe e consequente aumento das áreas de baixa e média vulnerabilidade.

A identificação dos locais que atualmente se encontram classificados com alta e muito alta vulnerabilidade são cruciais para a busca da sustentabilidade na bacia, visto que para tais locais devem ser adotadas ações mais conservadoras como a manutenção da cobertura vegetal, bem como práticas mais conservacionistas de manejo do solo, sem, contudo, negligenciar a manutenção das condições atuais das regiões com classes de vulnerabilidade mais baixas.

4. Conclusão

Para a delimitação das classes de vulnerabilidade natural da bacia do rio Piracicaba para os anos de 2021, 2022 e 2023 foram empregadas as variáveis geologia, declividade, uso e ocupação do solo, acrescidas da vulnerabilidade à inundação, obtida por meio do modelo HAND. Assim, a metodologia adotada permitiu a comparação entre os resultados da vulnerabilidade natural e desta acrescida com as áreas susceptíveis à inundação, demonstrando que houve diferenças em relação aos resultados das duas metodologias, sendo o cenário gerado sem o emprego do HAND mais conservador, o que proporcionaria uma maior sustentabilidade na bacia, fazendo deste o mais recomendado.

O emprego de uma análise espacial, permitiu identificar os locais que nos três anos analisados apresentaram maiores vulnerabilidade e constatar que as classes média, alta e muito alta vulnerabilidade vem aumentando ao longo dos anos na bacia.

É importante que os direcionamentos que sejam apontados no plano de bacia, considerando esta modelagem, também integre as comunidades locais e os agricultores, buscando alinhar as ações sugeridas com a sustentabilidade econômica destes, para a busca da melhoria das condições socioambientais da bacia de forma duradoura.

5. Referências

- ASF - Alaska Satellite Facility (2015). Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products. Product Guide, revision 1.2. Fairbanks, Alaska: [s.n.]. Disponível em: <https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf>. Acesso em: 29/07/2024.
- Belato, L. S.; Serrão, S. L. C. (2019). Aplicação da vulnerabilidade ambiental do município de Tomé-Açu, Estado do Pará. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, Aracajú, 10 (1), p.131-145.
- Camargo, O. A.; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. (1986). Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas: Instituto Agrônomo, 94p.
- CBHDoce- Comitê de bacia hidrográfica do rio Doce, 2024. Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Piracicaba Parh Piracicaba. Disponível em: https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/PARH_Piracicaba.pdf. Acesso em: 22/10/2024.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análises de solo Rio de Janeiro, 247p., 1979.
- Gomes, S. R.; Filgueira, H. J. A. (2024). Análise de áreas suscetíveis a inundação por meio do modelo Height Above The Nearest Drainage (HAND) no município de Campina Grande, Paraíba, Brasil. Revista Ecologias Humanas, 10(12), 84 – 95.
- IDE-Sisema (2024). Base de dados cartográficas. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 17/10/2024.
- IGAM -Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba (DO2). Disponível em: <https://comites.igam.mg.gov.br/bacia-hidrografica-do-rio-piracicaba-do2->. Acesso em: 25/11/2024.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2024). HAND Model. Disponível em: https://handmodel.ccst.inpe.br/?page_id=307. Acesso em: 11/08/2024.

Klais, T. B. A.; Dalmas, F. B.; Morais, R. P.; Atique, G.; Lastoria, G.; Paranhos Filho, A. C. (2012). Vulnerabilidade natural e ambiental do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil. *Revista Ambiente & Água, Taubaté*, 7 (2), p. 277-290.

Milanesi, J.; Quadros, E. L. L.; Lahm, R. A., (2017). Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação – Porto Alegre/RS. *Revista Brasileira de Cartografia, Edição Desastres Naturais e Impactos Ambientais*: 69(4), 675-686.

ROBERTO NERES, D.; PEREIRA SANTOS, J. P.; ROSSI VICENTE, M.; MEDEIROS DOS SANTOS, R.; DE OLIVEIRA E LUCAS, P. (2025). Efeitos das mudanças climáticas na região norte de Minas Gerais. *Revista Mineira de Recursos Hídricos, Belo Horizonte*, 6, 1-28.

Nobre, A. D.; Cuartas, L. A.; Momo, M. R.; Severo, D. L.; Pinheiro, A.; Nobre, C. A., (2016). HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*, 30(2), 320–333.

Nobre, A.D.; Cuartas, L.A.; Hodnett, M.; Rennó, C.D; Rodrigues, G.; Silveira, A.; Waterloo, M.; Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1), 13-29.

PEREIRA, L. E.; PEREIRA, J. G. (2013). Identificação e análise das áreas de vulnerabilidade ambiental da cidade de Corumbá (MS). *Revista Geografia (Londrina), Londrina*, 21 (1), p. 085-101.

PINHEIRO, J. G. M. (2024). Aplicação do modelo HAND para modelagem da suscetibilidade à inundação nos bairros de Ilhéus, sul da Bahia (Brasil). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, 5(1), 002-012.

Santos, R. F.; Thomaziello, S.; Weill, M. A. M. (2007). Planejamento da paisagem. In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Vulnerabilidade Ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?*. Brasília: MMA, p.165-180.

TREVISAN, D. P., MOSCHINI, L. E., DIAS, L. C. C., GONÇALVES, J. C., (2018). Avaliação da vulnerabilidade ambiental de São Carlos - SP. *Revista Ra'ega - O Espaço Geográfico em Análise, Curitiba*, 44, p. 272-288.