

Análise de vulnerabilidade à inundação em São Sebastião - SP.

Ana Júlia dos Santos Mariani e Silveira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos – SP – Brasil

Abstract. *This study presents an analysis of flood susceptibility and vulnerability in the municipality of São Sebastião (SP), aiming to identify the highest-risk areas and their impact on the local population. First, an adapted Variable Reclassification Model (MRV) and Analytic Hierarchy Process (AHP) were used to weight the physico-environmental variables. After geoprocessing, weight assignment, and reclassification, a flood susceptibility map was produced, revealing higher risks in the lower coastal plains. Next, population data by census tract were overlaid with the susceptibility map to generate the vulnerability map. Additional maps were also created to support the discussion. In this way, the results indicated that the urban areas in the eastern portion—densely populated and close to drainage channels—are the most vulnerable. This type of analysis can support the development of public policies for risk prevention, urban planning, and emergency response.*

Resumo. *Este trabalho apresenta uma análise de suscetibilidade e vulnerabilidade à inundação no município de São Sebastião (SP), visando identificar as áreas de maior risco e seu impacto na população local. Primeiro, foram utilizados modelo de Reclassificação de Variáveis (MRV) adaptado e Análise de Hierarquia Analítica (AHP) para ponderar as variáveis físico-ambientais. Após o geoprocessamento, atribuição de pesos e reclassificação produziu-se o mapa de suscetibilidade à inundação, que revelou maiores riscos nas planícies costeiras mais baixas. Em seguida, dados de população por setor censitário foram cruzados com o mapa de suscetibilidade para gerar o mapa de vulnerabilidade. Também foram realizados outros mapas para subsidiar a discussão. Dessa maneira, os resultados apontaram que as áreas urbanas da porção leste, densamente povoadas e próximas a drenagens, são as mais vulneráveis. Esse tipo de análise pode subsidiar a construção de políticas públicas de prevenção à risco, de planejamento urbano e resposta a emergências.*

1. Introdução

Eventos extremos de chuva e seca se acentuarão nas próximas décadas com as mudanças climáticas. As mudanças nas dinâmicas ambientais no Brasil podem impactar fortemente as regiões Sul, Sudeste e da faixa Leste do Nordeste, pois concentram os maiores centros urbanos e detêm dois terços da população brasileira. Os eventos climáticos extremos incluem não só o aumento das ondas de calor, mas também o aumento das precipitações [Iwama, 2014; Marchezini, 2021].

A intensificação de chuvas nessas regiões podem aumentar o risco de deslizamentos de terras e inundações bruscas [Marchezini, 2021], pois o crescimento da população, aumento da infraestrutura urbana, alterações nas condições de drenagem e nas propriedades do solo, como impermeabilização e compactação, são processos que interferem no escoamento superficial e na infiltração da água na terra [Ferraz, 2021]. Chuvas intensas e concentradas, juntamente com uso inadequado do solo e processo de urbanização desordenado brasileiro causam as inundações bruscas [Ferraz, 2021]. Para

Tucci (1997, p. 667) estes eventos “acontecem quando a precipitação é intensa e a quantidade de água que chega simultaneamente ao rio pode ser superior à sua capacidade de drenagem, resultando na inundação de suas áreas ribeirinhas.”

Os riscos de enchentes, inundações e alagamentos, causados por condicionantes naturais e potencializados pelas ações antrópicas [Ferraz, 2021] impactam muito as zonas costeiras. “Ocupações irregulares em encostas ou nas margens dos corpos de água” acentuam a vulnerabilidade da população presente nessas áreas [Iwama, 2014].

Dentro das geociências aplicadas, a suscetibilidade de um objeto diz respeito à sua sensibilidade ou fragilidade perante algo, sendo uma característica do meio. Nesse caso, a predisposição dessas áreas a eventos de inundação. Por outro lado, quando a vulnerabilidade é analisada, insere-se o fator humano quando existe a exposição de pessoas [Lima; Amorim, 2023].

O município de São Sebastião, localizado no litoral norte do estado de São Paulo, com área de 402,395 km², tendo população estimada de 81.595 pessoas e uma densidade demográfica de 202,77 hab/km [IBGE, 2022]. A cidade tem um histórico de inundações, que geram consequências desde cancelamento de aulas, recomendação de mudança de alojamento da população localizada em áreas de risco até casos de mortes em decorrência de enchentes e movimentos de massa [CNN Brasil, 2023; G1, 2023; Prefeitura Municipal de São Sebastião, 2023; G1, 2024].

O agravamento desses problemas e o impacto socioeconômico gerado torna relevante entender a distribuição espacial das áreas suscetíveis a esse tipo de fenômeno para que a prevenção de desastres ambientais seja mais efetiva, e a resposta a emergências mais rápida [Portela *et al.*, 2023; Lima; Amorim, 2023]. Portanto, o objetivo do trabalho é mapear as áreas mais vulneráveis à inundação em São Sebastião.

A utilização de ferramentas para análise espacial permite subsidiar um planejamento urbano e de prevenção a riscos mais adequados. Para tal finalidade, serão integrados dados físico-ambientais e socioeconômicos, que serão processados em ambiente de geoprocessamento com o objetivo de mapear a suscetibilidade à inundação das áreas de São Sebastião e a vulnerabilidade da população por setor censitário. Sendo a noção de vulnerabilidade considerada neste trabalho o entendimento de que, quanto maior o número de pessoas em uma área com alta suscetibilidade à inundação, maior a sua vulnerabilidade. Por isso, foram cruzados os dados de população por setor censitário do IBGE com as categorias de suscetibilidade aqui desenvolvidas.

2. Material e Método

2.1 Modelos base

Para fazer o mapa de suscetibilidade, primeiramente foi escolhido um modelo para análise das informações e depois foi feita a aquisição dos dados necessários, processados de acordo com suas especificidades. Após isso, gerou-se o mapa de vulnerabilidade e outros mapas que auxiliam na discussão do contexto.

Os modelos utilizados como base foram o MRV (Modelo de Reclassificação de Variáveis) [Rezende; Marques; Oliveira, 2017], que dá maior agilidade aos processos e utiliza variáveis relevantes para análise de inundação, e foi complementado com o método aplicado no artigo de Portela *et al.* (2023), para ajudar a levar em consideração as características do município e fazer álgebra de mapas.

Em seguida, dentro dos modelos, aplica-se o processo analítico hierárquico - *Analytical Hierarchy Process (AHP)* para conseguir quantificar a influência de cada variável dentro do sistema. Os dois modelos utilizam dados de tipo de solo, uso e ocupação do solo, altitude e declividade de *input* para mapeamento de risco de inundação. O artigo de Portela *et al.* (2023) contém uma breve revisão bibliográfica que buscou as variáveis mais utilizadas quando se aplicou AHP para suscetibilidade à inundação, e estas 4 variáveis consideradas nos dois modelos foram as que mais apareceram, com grande margem. [Rezende; Marques; Oliveira, 2017; Portela *et al.*, 2023].

2.2 Dados

Além dos dados de suscetibilidade, para melhor discussão no contexto de São Sebastião, foram incluídos os dados de áreas urbanas e hidrografia. Também foram utilizados dados de limites políticos para confecção de mapas. Para o mapa de vulnerabilidade foi utilizado a população residente total. Todas as bases de dados utilizadas para avaliar vulnerabilidade estão resumidas na Tabela 1, com suas respectivas fontes:

Dado	Fonte	Formato e informações adicionais
Uso e cobertura do Solo	MapBiomas	Raster - resolução: 10m
Altitude	Copernicus	Raster - resolução: 30m
Declividade	Será feita a partir do modelo digital de terreno do Copernicus	Raster - resolução: 30m
Tipo de Solo	Pedologia do DATAGEO - São Paulo	Vetorial - escala 1:250000
Limites políticos	IBGE	Vetorial - escala 1:250000
Áreas Urbanas	DATAGEO - São Paulo	Vetorial - escala 1:50000
Hidrografia	DATAGEO - São Paulo	Vetorial - escala 1:50000
População residente total	Censo Demográfico 2022 - IBGE	Tabular - Organizado por Setor Censitário

Tabela 1. Variáveis utilizadas. Fonte: Elaborado pela autora.

O uso e cobertura do solo demonstra as condições de cobertura do solo e interferência na infiltração e escoamento [Rezende; Marques; Oliveira, 2017; Portela *et al.*, 2023], além de auxiliar na compreensão dos possíveis impactos de uma inundação, considerando o uso majoritário das regiões no município. A altitude direciona a água para as áreas mais baixas do município, de acordo com a gravidade, enquanto a declividade influencia o acúmulo de água no terreno [Rezende; Marques; Oliveira, 2017]. De maneira similar, o tipo de solo também apresenta condições de infiltração e escoamento próprios que variam com suas características pedológicas. Logo, estas 4 variáveis são determinantes para os processos que levam uma área a inundar [Rezende; Marques; Oliveira, 2017; Portela *et al.*, 2023]

Já as informações das áreas urbanas e de hidrografia foram levadas em consideração para tentar visualizar a suscetibilidade do município quando comparadas à ocupação urbana da cidade e às drenagens principais. Esses mapas subsidiam a discussão para a análise de vulnerabilidade do município, que foi feita levando em consideração a quantidade de pessoas em cada setor censitário.

2.3 Processamento dos dados

Na fase de processamento dos dados para geração dos mapas, primeiro foi necessário gerar a declividade com a informação do Copernicus. O Modelo Digital de Elevação (DEM) de 30m do Copernicus foi corrigido com *fill* (Wang & Liu) do SAGA, utilizando o QGIS. Em seguida, foi gerada declividade com a ferramenta do GDAL. Para viabilizar a utilização do mapa de classificação de uso e cobertura do solo do MapBiomas foi necessário reamostrar os pixels para 30 m. Os dados de tipo de solo precisaram ser rasterizados.

Após a geração dos dados, é possível designar os pesos para cada atributo daquela área a fim de aplicar a AHP. Os atributos de cada camada foram reclassificados em pesos, em que 1 se refere à muito baixa suscetibilidade à inundação, até 5, com suscetibilidade muito alta. Os pesos de cada atributo das variáveis utilizadas no MRV estão detalhados na Tabela 2, que mostra cada atributo e seu respectivo peso atribuído. Ademais, por ser necessário levar em consideração as características físico-ambientais de São Sebastião, os valores referentes a cada peso foram adaptados dos modelos supracitados.

Peso	Declividade	Altitude	Tipo de solo	Uso e Cobertura do Solo
1-Muito Baixa	>45%	>500m	Nula	Floresta; Praia, Duna e Area; Restinga Arbórea
2-Baixa	20-45%	100-500m	Baixa	Silvicultura
3-Média	8-20%	30-100m	Média	Pastagem ; Agropecuária - Mosaico de Usos; Afloramento Rochoso
4-Alta	3-8%	10-30m	Alta	Área Urbanizada; Outras Áreas não Vegetadas
5-Muito Alta	0-3%	0-10m	Muito alta; Área urbana; Massa d'água e Oceano	Rio, Lago e Oceano; Campo Alagado e Área Pantanosa
Fontes para atribuição de pesos:	Portela et al., (2023), apud EMBRAPA.	Adaptado de Rezende,	Adaptado da classificação do	Adaptado de Campioli e Vieira (2109).

		Marques e Oliveira (2017).	DATAGEO para tipo de solo.	
--	--	----------------------------	----------------------------	--

Tabela 2. Pesos das variáveis. Fonte: Elaborado pela autora.

Para declividade a classificação dos valores foi definida a partir de Portela [2023], sendo que os valores foram adaptados da classificação de declividade da EMBRAPA. Já para altitude, a classificação foi feita adaptando de Rezende, Marques e Oliveira (2017) que levou em consideração a altitude média do município, 4m no caso de São Sebastião. Mas também foi importante analisar o perfil topográfico da cidade com o profile tool no QGIS.

Os dados para o tipo de solo do estado de São Paulo já contém no *shp* baixado uma classificação própria de análise da suscetibilidade à inundação, feita pelo estado, que leva em consideração mais características pedológicas que não somente sua ordem, como também subordem, granulometria, entre outras. Portanto, utilizou-se a classificação do DATAGEO-SP, por se aproximar mais da realidade. E a atribuição de pesos para uso e cobertura do solo foi de acordo com a impermeabilização que cada uso e cobertura gera, adaptada da classificação de [Campioli e Vieira, 2019].

Na Figura 1 é possível ver a suscetibilidade das áreas no município de acordo com o peso dado a cada uma das variáveis consideradas para o estudo:

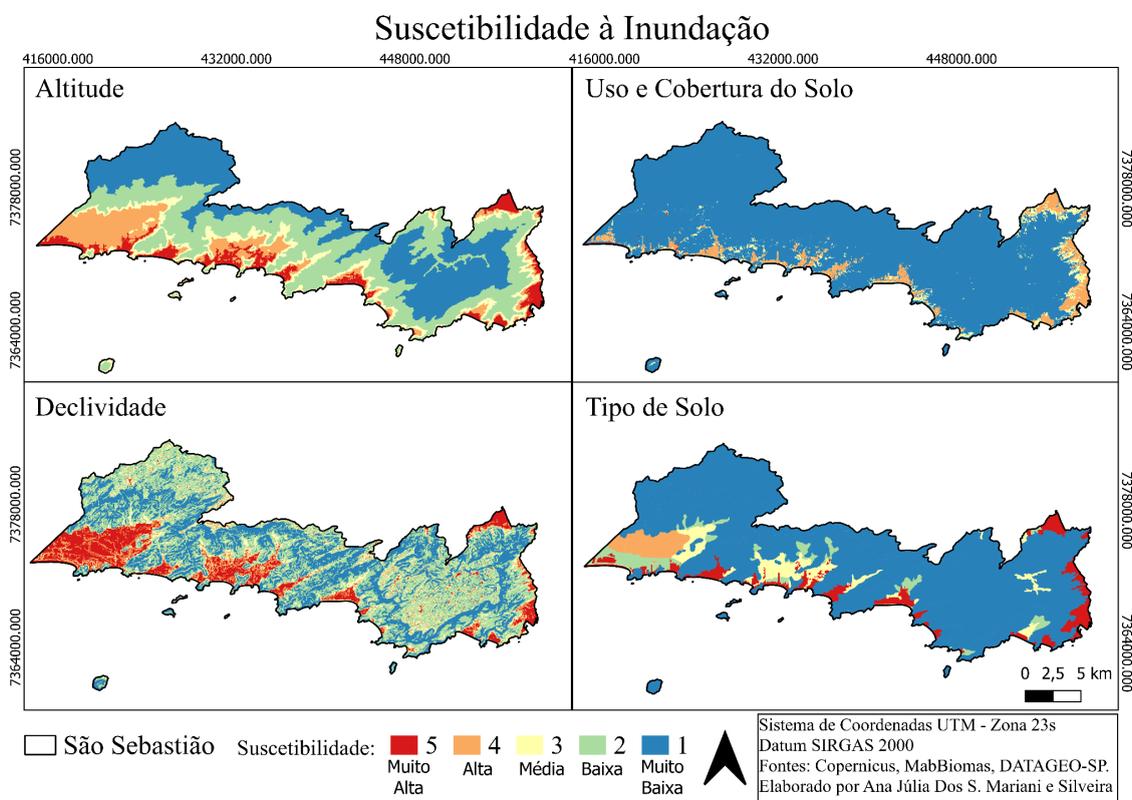


Figura 1. Fonte: Elaborado pela autora.

Para entender o contexto geral do município essas informações são cruzadas, baseado na influência que a altitude, declividade, uso e cobertura e tipo de solo têm num

evento de inundação. Assim, é feito o mapa de suscetibilidade, considerando os vários fatores de influência no sistema. Para chegar no mapa de suscetibilidade à inundação de São Sebastião (Figura 4) aplica-se a matriz de comparação pareada da AHP, que quantifica essa comparação entre as variáveis baseada na sua influência para a suscetibilidade à inundação. A Tabela 3 mostra os valores que precisam ser atribuídos na comparação, e as Figuras 2 e 3 mostram a matriz de comparação, ou seja, o resultado da comparação entre as camadas [Rezende; Marques; Oliveira, 2017; Portela *et al.*, 2023].

Valor	Significado
1	Igual importância
3	Moderadamente mais importante
5	Fortemente mais importante
7	Muito fortemente mais importante
9	Extremamente mais importante
1/3	Moderadamente menos importante
1/5	Fortemente menos importante
1/7	Muito fortemente menos importante
1/9	Extremamente menos importante

Tabela 3. Rezende; Marques; Oliveira, 2017.

Indicadores	Solos	Uso do Solo	Altitude	Declividade
Solos	1	1/3	1/5	1/7
Uso do Solo	3	1	1/3	1/5
Altitude	5	3	1	1/3
Declividade	7	5	3	1

Figura 2 - Matriz de comparação. Fonte: Rezende; Marques; Oliveira, 2017.

Após a comparação entre as camadas levadas em consideração para o modelo, também é importante calcular o índice de consistência e o índice randômico para chegar na razão de consistência. Essa análise estatística verifica a consistência da comparação pareada para garantir coerência e confiabilidade na análise. Pelo fato das duas referências terem uma matriz de comparação com resultados iguais, a razão de consistência apresentou resultados muito similares, demonstrando confiabilidade. Por fim, os rasters foram processados na calculadora raster com os pesos derivados da matriz de comparação: $0.507 * Declividade + 0.296 * Altitude + 0.144 * Uso e$

ocupação + 0.053 * Tipo de solo [Rezende; Marques; Oliveira, 2017; Portela *et al.*, 2023].

As informações populacionais, adquiridas no IBGE, vêm tabuladas de acordo com os setores censitários do município. Então é necessário baixar os dados vetoriais dos setores censitários e unir a tabela com os respectivos polígonos para saber as áreas que apresentam maior contingente populacional. Em seguida, foi feita a estatística zonal do raster de áreas suscetíveis classificadas para cada polígono dos setores. A partir daí, a média da estatística zonal dos valores dos pixels dentro dos setores censitários referentes à suscetibilidade e o quantitativo populacional foram normalizados. Ao multiplicar esses valores e recategorizar dentro dos pesos, tem-se uma medida que representa quais os setores censitários tem uma população grande numa área de alto risco, ou vice-versa, ou seja, podem representar um parâmetro para vulnerabilidade. Os resultados estão apresentados na Figura 7.

3. Resultados e Discussão

O mapa de suscetibilidade à inundação (ver Figura 4) de São Sebastião demonstra que as áreas com suscetibilidade muito alta estão localizadas nas planícies mais baixas do município, próximas ao mar. Com as áreas de suscetibilidade muito baixa e baixa ocupando a maior parte do município, devido à sua geomorfologia.

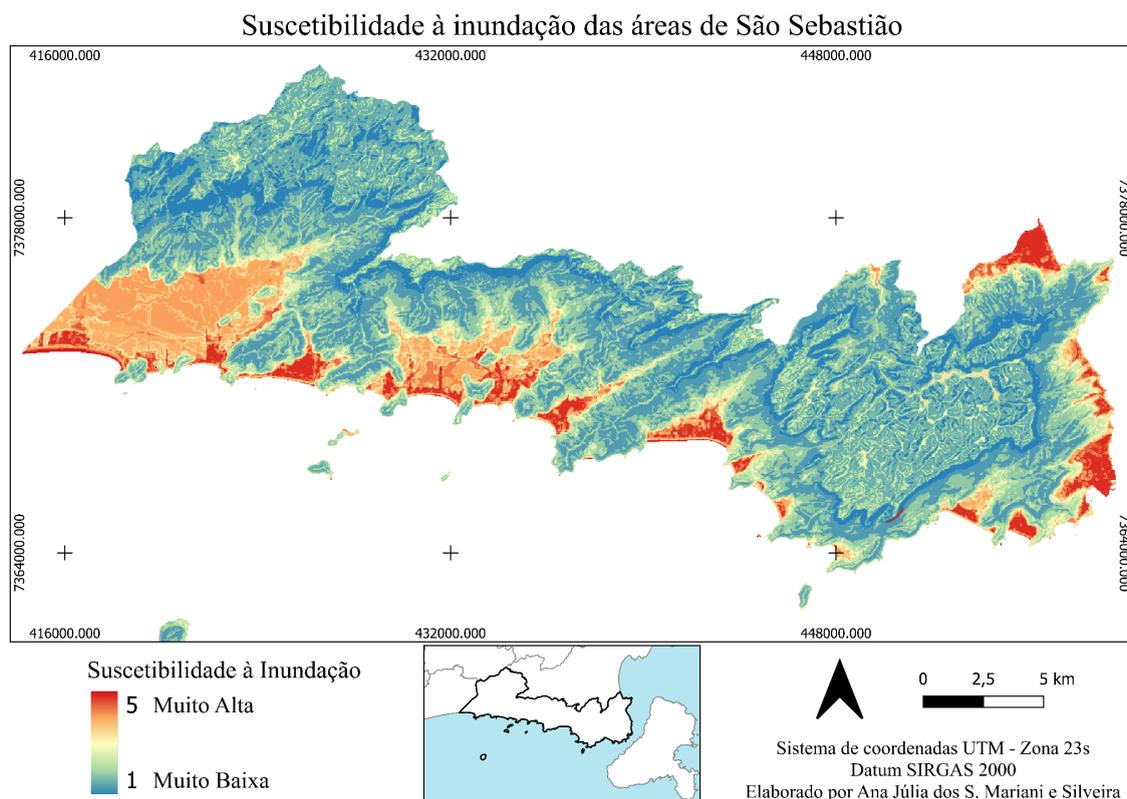


Figura 4. Fonte: Elaborado pela autora.

Nos mapas das Figuras 5 e 6, que mostra as áreas urbanas do município e a quantidade de pessoas por setor censitário,   possível observar as áreas urbanas sobrepondo muitas áreas de risco “muito alto”. Já que os contingentes urbanos estão majoritariamente nas planícies próximas à altitude do mar, além de que, ao comparar essas áreas com as

drenagens, várias delas estão próximas aos exutórios de drenagem, o que também colabora para o risco de inundação. Em relação a distribuição espacial da população (ver Figura 6), a parte Leste e central do município tem maiores quantidades de pessoas, sendo que as áreas declivosas são bem pouco populadas.

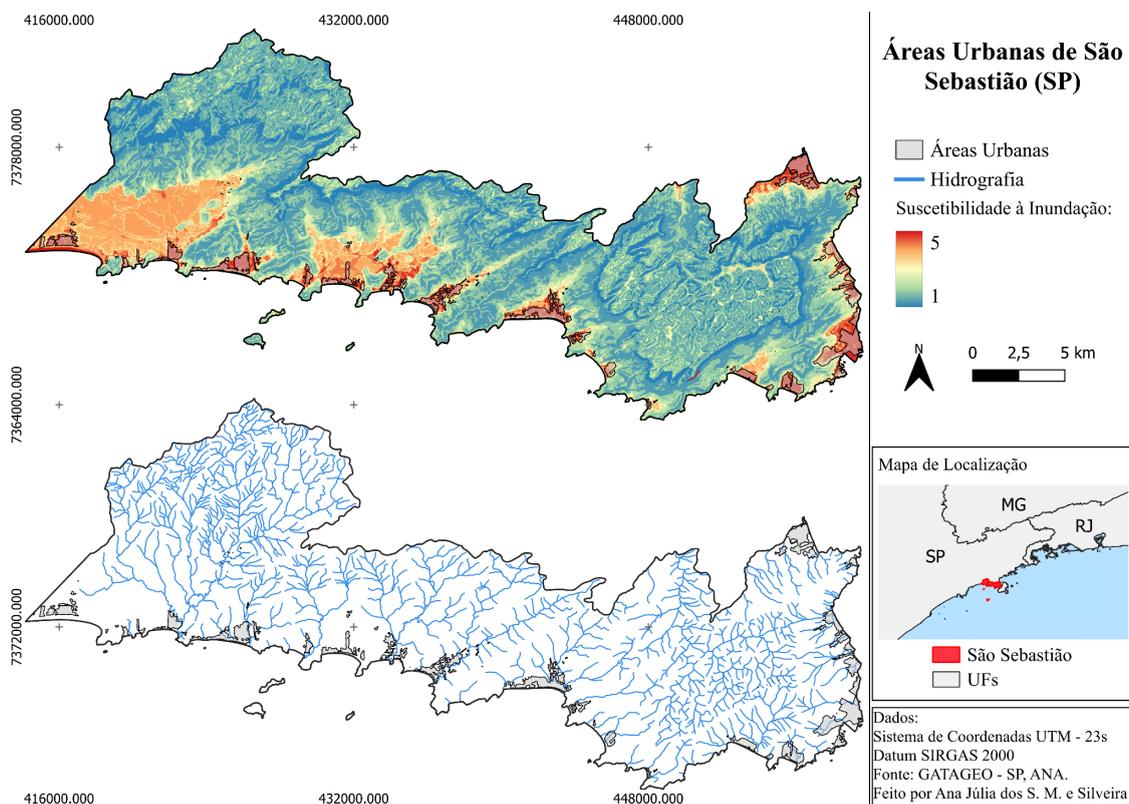


Figura 5 - Mapa de áreas urbanas de São Sebastião sobrepostos ao mapa de suscetibilidade e à hidrografia. Fonte: Elaborado pela autora.

População por Setor Censitário - São Sebastião (SP)

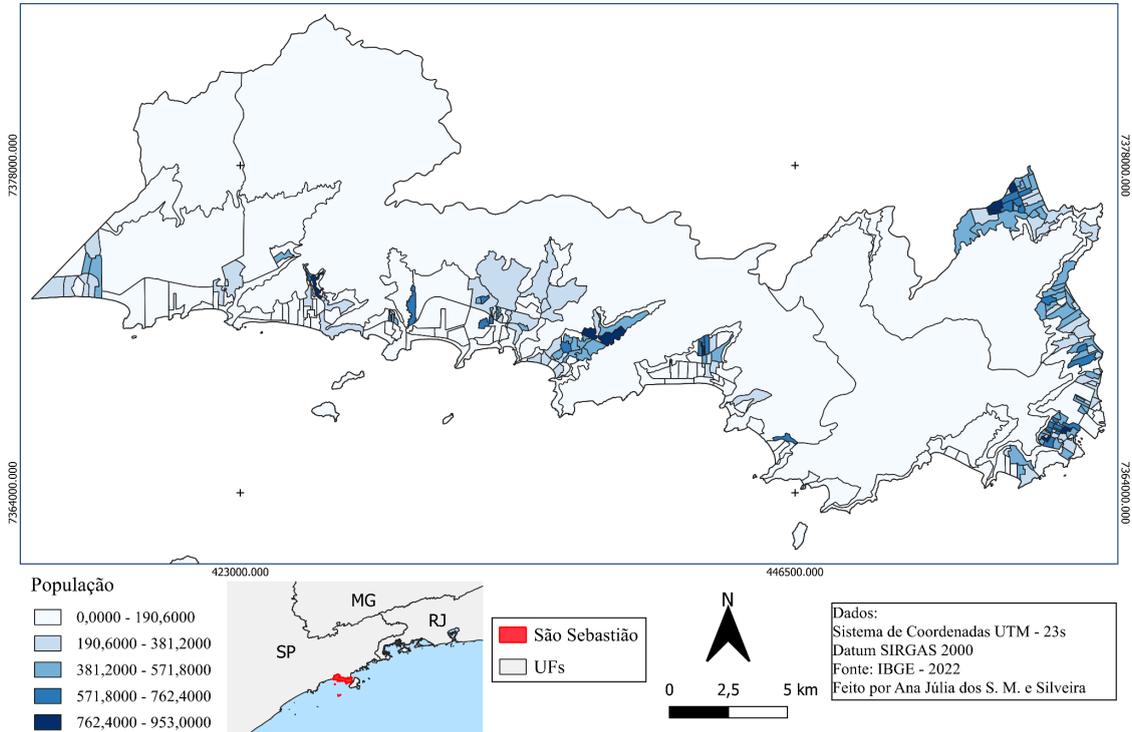


Figura 6. Fonte: Elaborado pela autora.

As características físico-ambientais do município propiciam a ocupação na área de risco, porque da mesma forma que a água tende a se acumular nas porções mais planas, que funcionam como área de infiltração, a população também tende a ocupar essas porções em São Sebastião. Dessa maneira, por influência da geomorfologia local, a densidade demográfica aumenta nas áreas planas próximas ao nível do mar, configurando alta vulnerabilidade à população do município. Na figura 7 é possível ver o mapa de vulnerabilidade de acordo com os setores censitários. Também é possível observar setores mais vulneráveis são os da porção leste, exatamente porque a parte leste da cidade é a que tem maior densidade populacional (como visto na Figura 6).

De acordo com Alves *et al.* “os índices de vulnerabilidade podem servir como subsídio à tomada de decisões em situações de desastre, compondo uma base estratégica para atendimento dos locais mais vulneráveis”. Além de ser relevante para tomar medidas preventivas [Portela *et al.*, 2023; Lima; Amorim, 2023].

Vulnerabilidade dos Setores Censitários - São Sebastião (SP)

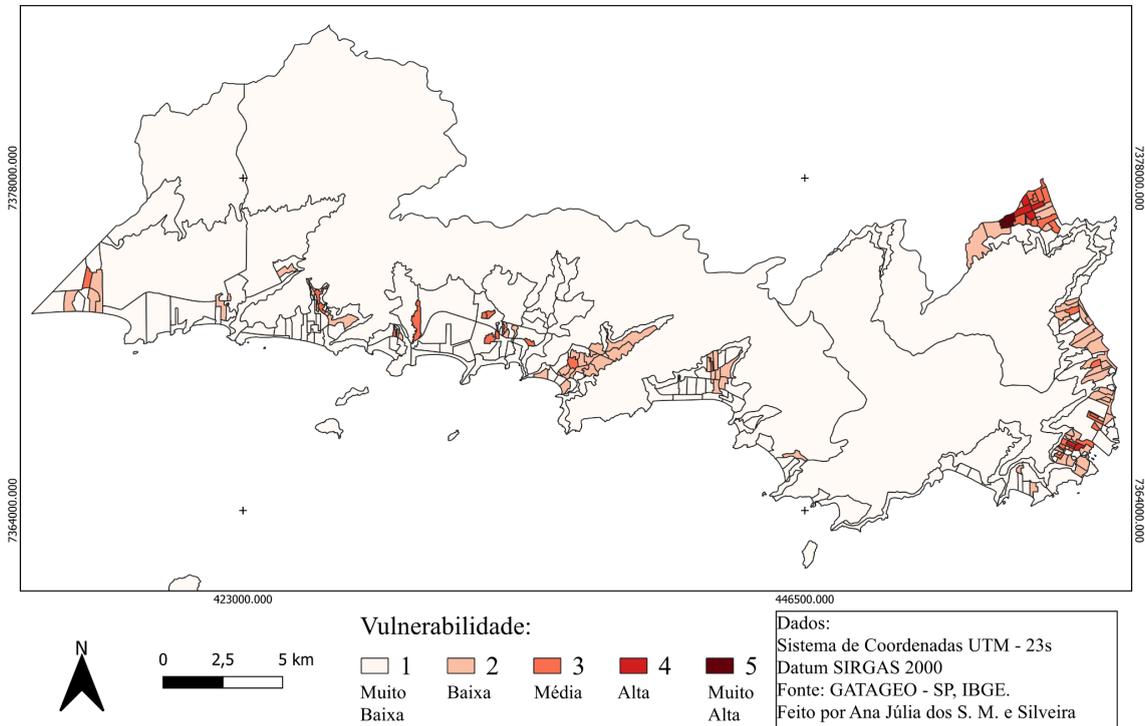


Figura 7. Fonte: Elaborado pela autora.

4. Conclusão

Considerando o contexto de mudança climática que nos últimos tempos tem afetado o Brasil, principalmente nas cidades costeiras, como é o caso de São Sebastião, análises de suscetibilidade e de vulnerabilidade se tornam valiosas. O aquecimento global, que modifica o regime de chuvas, em conjunto com a impermeabilização do solo e mudança na drenagem aumentam os riscos de inundações que impactam a população ali presente de diversas maneiras.

Os modelos utilizados, as variáveis de altitude, declividade, uso e cobertura do solo e tipo de solo e a utilização da AHP com a definição dos pesos adaptadas para área de interesses permitiu bom desempenho para analisar a suscetibilidade à inundação, de maneira que foi possível inferir a vulnerabilidade em São Sebastião a partir dos dados do último sendo.

A forma como a população é destruída no município, concentrada em áreas de grande suscetibilidade, gera uma alta vulnerabilidade da população ali presente. Por isso, estudos desse tipo podem auxiliar na tomada de decisões tanto preventivas quanto emergenciais.

A comparação dos dados de suscetibilidade com dados especializados por setor censitário dá margem para maior exploração com as informações advindas dos censos demográficos. Seria interessante, por exemplo, ver a renda *per capita* nas áreas

suscetíveis e entender o perfil da população mais vulnerável. Além disso, seria interessante incluir mais variáveis na análise, como dados climáticos ou costeiros, que são fatores de influência direta no sistema.

5. Referências

- ALVES, T. da S.; FARINA, F.; ROHMANN, J. K.; CARDOSO, F. P.; SILVA, T. da S. (2019). Análise da vulnerabilidade socioeconômica de áreas suscetíveis à inundação no município de São Lourenço do Sul, RS. In: XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais... São José dos Campos: INPE, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/trabalhos/analise-da-vulnerabilidade-socioeconomica-de-areas-suscetiveis-a-inundacao-no-mu?lang=pt-br>. Acesso em: 20 mai. 2025.
- CAMPIOLI, P. F.; VIEIRA, C. V. (2019) Avaliação do Risco da Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, Joinville/SC. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12, p. 124–138.
- CNN BRASIL (2023). São Sebastião tem alagamentos e sirenes são acionadas. CNN Brasil, 29 jan. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sao-sebastiao-tem-alagamentos-e-sirenes-sao-acionadas/>. Acesso em: 14 mai. 2025.
- G1 (2023). Chuva causa alagamento na Costa Sul de São Sebastião, SP. G1 – Vale do Paraíba e região, 13 jun. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/06/13/chuva-causa-alagamento-na-costa-sul-de-sao-sebastiao-sp.ghtml>. Acesso em: 14 mai. 2025.
- G1 (2023). Tragédia de São Sebastião: cidade do litoral paulista ainda tenta se reconstruir após chuva de 2023. *Jornal Nacional*, 1 jun. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2024/06/01/tragedia-de-sao-sebastiao-cidade-do-litoral-paulista-ainda-tenta-se-reconstruir-apos-chuva-de-2023.ghtml>. Acesso em: 13 mai. 2025.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. São Sebastião – SP (2025). Cidades e Estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-sebastiao.html>. Acesso em: 25 mai. 2025.
- LIMA, G. S.; AMORIM, R. R. (2023) Suscetibilidade e vulnerabilidade: um impasse conceitual que dificulta a responsabilização pelo desastre. In: COMEMORAÇÃO AOS 20 ANOS DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA (IG-UNICAMP). Anais do evento em comemoração aos 20 anos do programa de pós-graduação em geografia (IG-UNICAMP), v. 1, n. 1, p. 50–65. Disponível em: <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/20anosppgg/article/view/3886>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- PORTELA, B. de M.; ALVES, G. B.; DA SILVA, S. R.; LAFAYETTE, K. P. V. (2023) Análise da Vulnerabilidade à Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém, utilizando o Método de Análise Hierárquica. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 16(3), p. 1247–1262. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1247-1262>

- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO SEBASTIÃO (2023) São Sebastião segue em estado de atenção devido às fortes chuvas. Prefeitura de São Sebastião. Disponível em: <https://saosebastiao.sp.gov.br/noticia.asp?id=N301202516489>. Acesso em: 19 mai. 2025.
- REZENDE, P. S.; MARQUES, D. V.; OLIVEIRA, L. A. de. (2017) Construção de modelo e utilização do método de Processo Analítico-Hierárquico – AHP para mapeamento de risco à inundação em área urbana. *Caminhos de Geografia* (Uberlândia), v. 18, n. 61, p. 1–18. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/40808>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. DataGEO: Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo. São Paulo: SEMIL, [s.d.]. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/#>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- VINHAL, C. P.; DE OLIVEIRA, M. S.; GIONGO, P. R. (2023) Geoprocessamento aplicado ao estudo de risco a alagamento. In: SEMINÁRIO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA UEG CÂMPUS SUDOESTE - QUIRINÓPOLIS. Anais do Seminário de Ensino, Pesquisa e Extensão da UEG Câmpus Sudoeste – Quirinópolis, v. 3, p. 367–375. Disponível em: https://www.anais.ueg.br/index.php/sepe_sudoeste/article/view/16059. Acesso em: 18 mai. 2025.