

VULNERABILIDADE A INUNDAÇÕES URBANAS: UMA ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA PARA ANÁLISE DE RISCOS

 <https://doi.org/10.56238/arev7n1-045>

Data de submissão: 03/12/2024

Data de publicação: 03/01/2025

Lucas Guimarães da Silva

Mestre em Ciências Ambientais
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: eng.lucasguimaraes15@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3776-295X>

Rodrigo Cesar da Silva

Doutor em Desastres Naturais
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: rodrigo.peb@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9721-6988>

Willian José Ferreira

Doutor em Geofísica Espacial
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: willian.jferreira@unitau.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4636-868X>

Jackes de Pablo Pereira Tiburcio

Mestre em Ciências Ambientais
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: jackespablo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5618-5159>

Thiago Moura Figueredo

Mestrando em Ciências Ambientais
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: thiago.mfigueiredo@unitau.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2573-4017>

Marcelo dos Santos Targa

Doutor em Agronomia
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: mtarga@unitau.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4140-3493>

RESUMO

Eventos extremos de precipitação têm causado significativas rupturas nos sistemas sociais, levando a impactos ambientais consideráveis e afetando diretamente a vida das comunidades. Este estudo investiga a vulnerabilidade de São José dos Campos (SJC), no Vale do Paraíba Paulista, Brasil, a inundações, explorando a relação entre registros de inundação, características geográficas e ocupação urbana desordenada. A análise integra dados altimétricos e de precipitação, utilizando técnicas de

geoprocessamento e o Índice de Moran Local para examinar a correlação espacial entre altitude e inundações. Entre os resultados, observou-se uma autocorrelação significativa entre altitude e registros de inundações, com maior vulnerabilidade em áreas de baixa altitude, além de uma redução de 62% nos eventos de inundação entre 2009 e 2018, associada a intervenções mitigadoras. Os achados indicam que características topográficas e precipitações intensas ampliam o risco de inundações, reforçando a necessidade de políticas de ordenamento e melhorias na infraestrutura de drenagem para fortalecer a resiliência urbana. O estudo ainda destaca a necessidade de políticas públicas voltadas para o planejamento urbano sustentável e a adaptação às mudanças climáticas. Nesse cenário, investimentos contínuos em tecnologias de monitoramento e governança participativa são fundamentais para a mitigação de riscos, a proteção das comunidades mais vulneráveis e a promoção de uma convivência equilibrada entre o desenvolvimento urbano e a sustentabilidade socioambiental.

Palavras-chave: Planejamento Urbano. Gestão de Risco. Uso do Solo. Sustentabilidade Ambiental. Extremos Climáticos.

1 INTRODUÇÃO

Desastres decorrentes de eventos extremos de precipitação têm gerado disrupções nos sistemas sociais, causando prejuízos ambientais e impactando diretamente a vida das populações (Bathrellos *et al.*, 2018). Entre os mais frequentes em escala global, destacam-se as inundações e alagamentos, fenômenos em que o excesso de água ultrapassa a capacidade dos corpos d'água, provocando transbordamentos em áreas adjacentes, especialmente em regiões de planície (Handayani *et al.*, 2020). Estudos indicam que, em áreas urbanas, as inundações têm causado danos significativos às infraestruturas, interferido nas atividades econômicas e afetado a segurança das comunidades (Wang *et al.*, 2020). Assim, compreender os fatores e dinâmicas que intensificam esses eventos é essencial para planejar cidades mais resilientes e minimizar os riscos e impactos de eventos hidrológicos extremos.

Nas últimas décadas, as inundações em bacias urbanas são agravadas pela expansão desordenada das cidades e pela redução de áreas verdes, o que diminui a capacidade de infiltração e intensifica o escoamento superficial (You, 2023). A impermeabilização das superfícies e o crescimento urbano afetam a drenagem natural e ampliam a frequência e extensão dos eventos de inundação, tornando a gestão dos riscos ainda mais desafiadora (Rentschler *et al.*, 2023).

No Brasil, muitos municípios enfrentam grandes desafios com inundações, especialmente em áreas metropolitanas, devido à alta vulnerabilidade a eventos hidrológicos extremos (Coutinho *et al.*, 2018). Essa vulnerabilidade é ampliada em áreas sensíveis, como margens de rios e encostas, onde frequentemente são desrespeitadas normas de proteção ambiental e de planejamento urbano (Brasil, 2024). No estado de São Paulo, a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHRPS) exemplifica essa situação, dado que sua complexidade geomorfológica — marcada por áreas planas e regiões de alta declividade — a torna particularmente suscetível a inundações e deslizamentos durante chuvas intensas (Silva *et al.*, 2020).

Analisar a distribuição espacial e temporal das inundações na BHRPS, especialmente em áreas urbanas como São José dos Campos (SJC), exige métodos que integrem dados históricos e ferramentas de geoprocessamento. Segundo Bathrellos *et al.* (2018), informações detalhadas sobre ocorrências de inundações em escala local, aliadas a essas ferramentas, são fundamentais para o planejamento e gestão de áreas vulneráveis, além de subsidiar estratégias que reduzam os impactos desses eventos e a exposição das comunidades.

Apesar dos avanços, ainda há lacunas na compreensão espacial das inundações em SJC, pois faltam análises que integrem dados históricos, topográficos e de precipitação para gerar mapas de risco localizados. Desse modo, busca-se responder: quais áreas de SJC são mais suscetíveis a

inundações, e como a análise integrada desses dados pode contribuir para a identificação e mitigação desses riscos?

Nessa perspectiva, o objetivo deste estudo é identificar áreas de maior suscetibilidade a inundações em SJC, utilizando técnicas de geoprocessamento e análise espacial. Alinhada à Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, especialmente ao Objetivo 11 — que promove cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis —, a pesquisa busca fornecer subsídios ao planejamento urbano e à gestão de riscos de inundações. Desse modo, contribui para o desenvolvimento de estratégias preventivas e mitigadoras que reduzam os impactos das inundações e aumentem a segurança da região frente a eventos hidrológicos extremos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

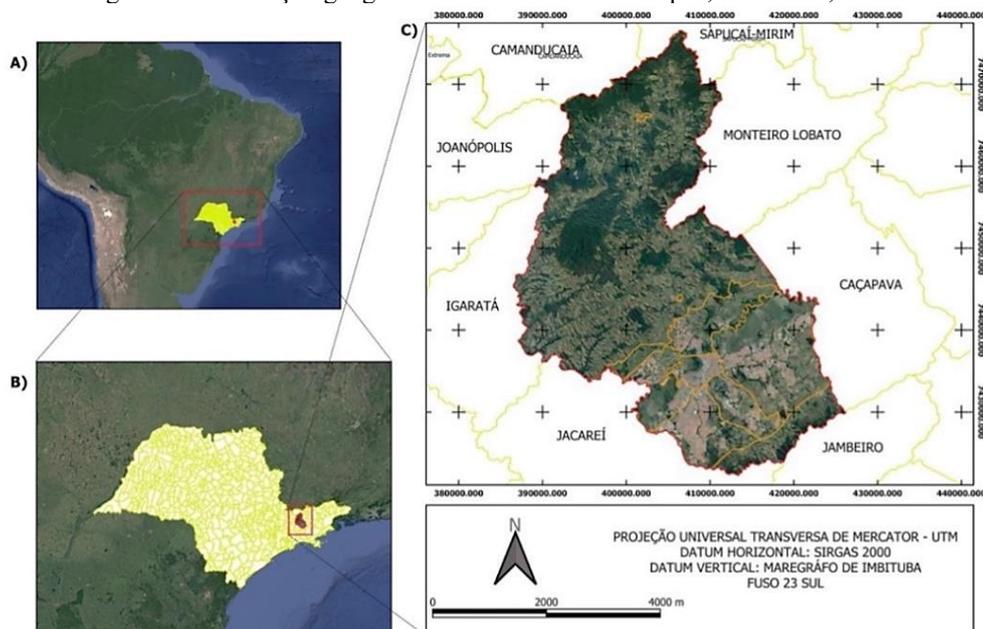
2.1 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo é focado no município de São José dos Campos (SJC), localizado na Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVPLN), estado de São Paulo. Sendo a maior cidade da RMVPLN, com uma população de 697.428 habitantes e uma densidade demográfica de 634,4 habitantes por km² (IBGE, 2024), SJC possui grande importância econômica, tecnológica e científica para o Brasil.

O município está situado no eixo entre São Paulo e Rio de Janeiro (Figura 1) e é um dos principais polos industriais e de pesquisa do país, destacando-se especialmente nas áreas aeroespacial, tecnológica e de inovação (Ferreira *et al.*, 2023a). Além disso, é reconhecida pela qualidade de vida e infraestrutura avançada, com um setor de serviços diversificado e crescente, que integra áreas com forte potencial de expansão.

De acordo com Köppen-Geiger, o clima de SJC é classificado como subtropical úmido (Cfa), com verões chuvosos e invernos relativamente secos. A temperatura média anual é de 20,9°C, com variações sazonais significativas que influenciam o regime de chuvas e a umidade (Ferreira *et al.*, 2023a). A precipitação anual média é de aproximadamente 1.400 mm, com os meses mais chuvosos concentrados entre dezembro e fevereiro, quando a precipitação mensal pode exceder 200 mm devido às altas temperaturas e à umidade trazida da massa de ar tropical atlântica (Ferreira *et al.*, 2020b). Os meses de inverno, especialmente de junho a agosto, são mais secos, com precipitação média mensal variando entre 30 e 60 mm, e são marcados pela influência de massas de ar frio e seco, que contribuem para uma queda na umidade relativa do ar.

Figura 1. Localização geográfica de São José dos Campos, São Paulo, Brasil.



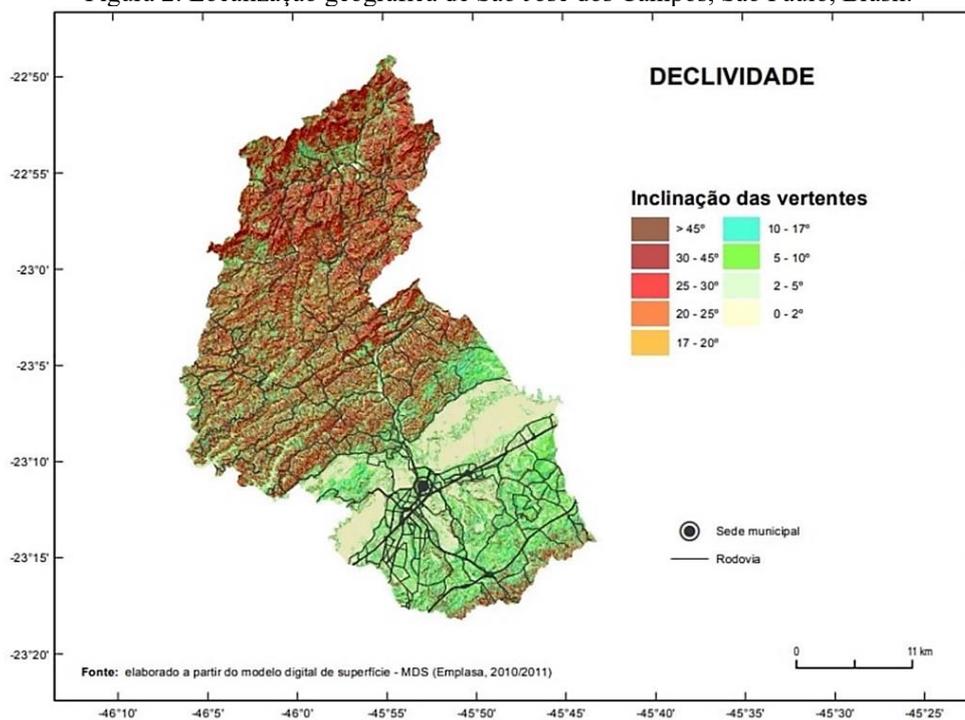
Fonte. Elaborada pelos autores.

Os solos predominantes em SJC são argissolos, latossolos, cambissolos e gleissolos, com cobertura vegetal que varia entre savana e floresta ombrófila densa (Ferreira *et al.*, 2020). Segundo Camargo *et al.* (2011), seu relevo é composto principalmente por morros e serras, localizados nas regiões norte e sudeste. Por outro lado, o sul e partes do leste apresentam colinas amplas e tabulares, enquanto as áreas de planície, especialmente ao longo do rio Paraíba do Sul, destacam-se por formas de agradação, como planícies aluviais e terraços fluviais.

A altitude no município varia de 535 metros, na planície aluvial do Paraíba do Sul, a 2.082 metros, no Pico do Selado, localizado ao norte, no distrito de São Francisco Xavier (Prado; Abreu, 1995). Essa distribuição altimétrica pode ser observada na Figura 2, que apresenta o mapa hipsométrico de SJC, evidenciando as diferentes inclinações das vertentes. O mapa ilustra a variação de elevações no município, indicando zonas de maior suscetibilidade a processos erosivos e a inundações, especialmente nas áreas de baixa altitude e inclinação suave.

Diante de suas características físicas, climáticas e socioeconômicas, SJC apresenta condições propícias para a análise da vulnerabilidade a inundações urbanas, visto que a combinação entre a ocupação intensiva das planícies aluviais, o crescimento urbano acelerado, a predominância de solos com baixa capacidade de infiltração e o regime de chuvas concentrado nos meses de verão torna o município particularmente suscetível a processos hidrológicos extremos, exigindo estudos detalhados para identificar e mitigar os riscos associados.

Figura 2. Localização geográfica de São José dos Campos, São Paulo, Brasil.



Fonte. Elaborada pelos autores.

2.2 ANÁLISE E SELEÇÃO DE EVENTOS DE INUNDAÇÃO

Seguindo um processo em quatro etapas, foram selecionados eventos de inundação com dados consistentes para evitar informações irrelevantes que poderiam comprometer os resultados. As etapas incluíram: (I) coleta de dados sobre inundações; (II) geocodificação, filtragem e georreferenciamento; (III) análise espacial; e (IV) avaliação da suscetibilidade a inundações.

A primeira etapa, de coleta de dados, abrangeu informações de inundações, características morfométricas e precipitação. Foram consultadas sete fontes principais: (I) Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM); (II) Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) de São Paulo; (III) Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC) de SJC; (IV) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); (V) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); (VI) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); e (VII) Prefeitura Municipal de SJC.

Na segunda etapa, de geocodificação, filtragem e georreferenciamento, foram selecionadas as ocorrências de inundações registradas entre 2009 e 2018 pela Defesa Civil de SJC. Cada ocorrência foi analisada individualmente, e, conforme a metodologia proposta por Ozkaia e Akyrek (2019), aquelas sem dados suficientes para georreferenciamento foram descartadas, a fim de minimizar possíveis erros de viés e assegurar a precisão dos resultados. As ocorrências aprovadas foram organizadas em um banco de dados no software QGIS 3.4.3.

Na terceira etapa, de análise espacial, as ocorrências georreferenciadas foram combinadas com dados de altimetria e precipitação, permitindo uma análise detalhada dos fatores envolvidos. Utilizou-se o Índice de Moran Local, conforme descrito por Parsian *et al.* (2021), para identificar padrões de concentração espacial das inundações e aprimorar a análise de suscetibilidade.

Por fim, a quarta etapa, de avaliação da suscetibilidade a inundações, considerou os cenários comuns em SJC definidos pela Defesa Civil, como "casa alagada", "alagamento" e "enchente", que representam problemas típicos de inundação urbana no Brasil. Cada ocorrência foi examinada quanto ao uso e cobertura do solo, possibilitando a identificação de pontos críticos de vulnerabilidade a inundações.

2.3 APLICAÇÕES DE GEOPROCESSAMENTO E DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Para georreferenciamento e geocodificação das ocorrências de inundações, utilizou-se o Google Earth Pro, gerando arquivos KML com base nos registros da Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil, conforme o método de Castro (2018). Esses dados foram convertidos para GeoPackage no QGIS 3.4.3, padronizados em Datum SIRGAS2000 e projeção UTM, e importados para GeoDA para análise de autocorrelação espacial.

Dados altimétricos foram extraídos do Modelo Digital de Superfície (MDS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2022). Usando os algoritmos *r.reclass* e *r.report* do QGIS, calculou-se a declividade para identificar padrões nas áreas de inundações. Esses dados foram integrados ao banco geográfico para cálculo do Índice de Moran Local (IML) e análise de altitude média dos eventos.

As precipitações foram obtidas da estação do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE, código E2-099) e de mapas de precipitação estimada (CHIRPS v.2, 1981–2023), que combina dados de satélite e de estações meteorológicas, com resolução de 5 km (Funk *et al.*, 2015). Para avaliar extremos de precipitação, foram utilizados índices de extremos meteorológicos (ETCCDI), com o software Climpact v.3 (Alexander; Herold, 2016). Os indicadores de chuva extrema considerados foram: Rx1day, que indica a quantidade máxima de precipitação em um único dia (mm); Rx3day, que representa a quantidade máxima acumulada em três dias (mm); Rx5day, quantidade máxima em cinco dias (mm); e R30mm, o número de dias com precipitação igual ou superior a 30 mm (dias).

Para contabilização dos eventos de inundação, os registros que ocorreram na mesma data foram consolidados em uma única entrada. A análise desses eventos foi então realizada com técnicas de geoprocessamento, considerando variáveis essenciais, como altimetria e precipitação, além dos próprios registros de inundação.

2.4 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA: AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL DE MORAN LOCAL

Para avaliar a dependência espacial entre os registros de inundação e a altimetria, foi aplicado o IML, conforme o modelo de autocorrelação espacial proposto por Anselin (1995). Esse índice é uma ferramenta estatística que mede a correlação espacial entre uma área específica e suas regiões vizinhas, indicando como características geográficas, como altitude e ocorrência de inundações, podem estar agrupadas espacialmente.

O diagrama de dispersão do IML permite classificar essas correlações em quatro categorias principais (Luzardo *et al.*, 2017): Q1 representa áreas onde valores altos estão próximos de outros valores altos (alto-alto); Q2 indica áreas onde valores baixos estão próximos de outros valores baixos (baixo-baixo), ambas denotando autocorrelação positiva. Já Q3 (alto-baixo) e Q4 (baixo-alto) indicam autocorrelação negativa, onde valores altos estão próximos de baixos e vice-versa.

Na interpretação dos resultados, valores próximos de zero indicam ausência de correlação espacial, enquanto valores mais próximos de -1 ou +1 refletem autocorrelação negativa e positiva, respectivamente (Costa *et al.*, 2007). O índice é comparável ao coeficiente de correlação de Pearson, com intensidade classificada como baixa (0 a 0,25), moderada (0,25 a 0,50), considerável (0,50 a 0,75) e alta (0,75 a 1).

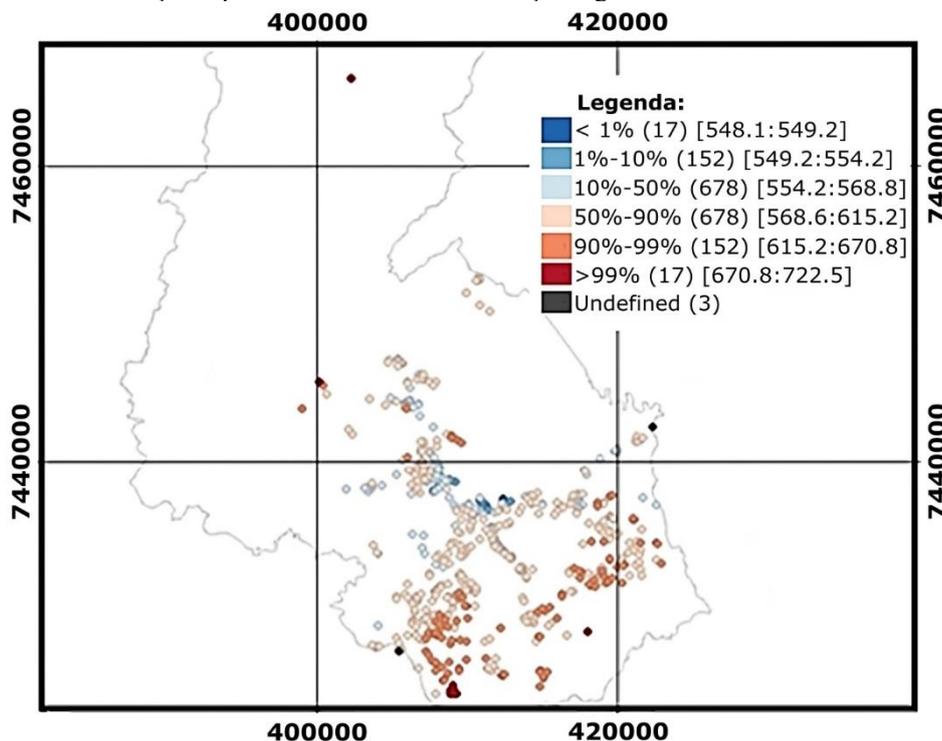
3 RESULTADOS

Os resultados deste estudo trazem uma análise sobre a relação entre os registros de inundações e as características geográficas e antrópicas em SJC, abrangendo o período de 2009 a 2018. Os achados a seguir destacam a distribuição espacial dos eventos de inundação, as influências do uso e ocupação do solo, e o impacto de intervenções mitigadoras, compondo um quadro que justifica a importância de políticas integradas para a gestão do risco de inundações.

3.1 MAPEAMENTO DOS REGISTROS DE INUNDAÇÃO

Ao longo do período de estudo, 1.697 eventos de inundação foram registrados pela Defesa Civil em SJC, com uma maior concentração em áreas de baixa altitude e proximidade a corpos d'água (Figura 3). Essa alta incidência evidencia a vulnerabilidade do município, especialmente em regiões urbanizadas de forma desordenada, onde ocupações irregulares amplificam o risco de inundações. Esse mapeamento inicial oferece uma base para identificar áreas críticas e os impactos da urbanização sem planejamento, que compromete a resposta da cidade a eventos de chuva intensa (Santos; Haddad, 2014; Marchezini *et al.*, 2018).

Figura 3. Distribuição espacial dos eventos de inundação registrados em SJC entre 2009 e 2018.



Fonte. Elaborada pelos autores.

Em SJC, aproximadamente 19,9% da área possui declividade inferior a 8%, uma condição que favorece o acúmulo de água e, conseqüentemente, a ocorrência de inundações, especialmente em regiões planas ou de leve inclinação próximas a corpos d'água. Esse cenário demonstra que o crescimento urbano desordenado contribui para a intensificação dos eventos de inundação, uma vez que a falta de infraestrutura de drenagem compromete o escoamento e agrava a vulnerabilidade das comunidades. Estudos de Santos *et al.* (2016) e Alcântara (2022) destacam que a ausência de políticas eficazes de uso do solo amplifica as perdas econômicas e aumenta os riscos à segurança das populações. Nesse sentido, estratégias de governança urbana que priorizem a sustentabilidade e a resiliência são fundamentais para reduzir a vulnerabilidade e fortalecer a resposta a eventos extremos.

A correlação entre baixa altitude e frequência de inundações em SJC é confirmada pela análise conjunta das Figuras 2 e 3. O mapa hipsométrico (Figura 2) destaca áreas com altitudes inferiores a 615 metros, predominantemente nas várzeas dos rios, que são mais suscetíveis ao acúmulo de água durante períodos de chuvas intensas. A Fig. 3 reforça essa observação ao evidenciar a concentração de eventos de inundação nessas áreas. Essa associação entre declividade e inundações sublinha a necessidade de intervenções específicas, como melhorias nos sistemas de drenagem e restrições para novas ocupações em regiões de risco, visando mitigar os impactos das características topográficas combinadas com o crescimento urbano desordenado.

A análise revela que SJC compartilha vulnerabilidades com outras cidades brasileiras suscetíveis a inundações, como Blumenau e Brusque, em Santa Catarina, e Duque de Caxias, no Rio de Janeiro (Momo *et al.*, 2016; Neves *et al.*, 2019). Nessas cidades, a combinação de características topográficas desfavoráveis e pressão urbana sem infraestrutura de drenagem adequada favorece a ocorrência de inundações frequentes. Este padrão recorrente demonstra que o problema é nacional, indicando que estratégias de mitigação podem ser replicadas e adaptadas às particularidades de cada local.

Contudo, para SJC, recomenda-se a adoção de estratégias já implementadas em outras cidades com sucesso, ajustando-as às especificidades locais. Medidas como restrições para ocupações em áreas de várzea, ampliação do sistema de drenagem e monitoramento contínuo das áreas de risco são exemplos de políticas que podem ser adaptadas. Tais ações contribuem para a resiliência urbana e para uma gestão do uso do solo mais sustentável, minimizando os impactos das inundações e promovendo a segurança da população.

3.2 AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL ENTRE ALTIMETRIA E INUNDAÇÕES

A análise com o Índice Moran Local (IML) identificou uma autocorrelação espacial significativa entre a altitude e os registros de inundações no município de São José dos Campos ($p < 0,05$). Foram considerados 962 eventos com dependência espacial, enquanto 735 registros foram descartados devido ao comportamento aleatório dos pontos de inundação, uma vez que a significância estatística não atingiu o nível de confiança de 95% ($p > 0,05$). A análise revelou que áreas com características altimétricas semelhantes apresentam maior vulnerabilidade a inundações, sobretudo aquelas localizadas em zonas de baixa altitude e próximas a corpos d'água.

Os resultados indicaram um padrão claro de autocorrelação positiva, conforme evidenciado pelo valor de IML 0,857, o que confirma a dependência espacial entre as variáveis analisadas. Essa correlação mostra que áreas de topografia semelhante, com baixos valores de altitude, concentram a maioria das ocorrências de inundação, reforçando a influência direta da configuração altimétrica no comportamento hidrológico da região. Em particular, os quadrantes Q1 (alto-alto) e Q2 (baixo-baixo) foram os que concentraram a maior parte dos eventos, demonstrando uma relação espacial significativa entre altitude e inundações.

Entre os locais de destaque estão as áreas situadas próximas ao córrego Cambuí, nos bairros Sapé I, Vila Guarani e Jardim do Lago, todos na zona leste de SJC. Esses locais apresentaram 415 eventos de inundação, fortemente influenciados pela cota altimétrica média de 568 metros e pela

infraestrutura de drenagem insuficiente, que aumenta o risco de alagamentos durante períodos de precipitação intensa.

Outro ponto crítico identificado foi o Mirante do Buquirinha, localizado na região norte de SJC, no distrito de Buquirinha. Essa área registrou o maior número de ocorrências de inundação, devido ao transbordamento recorrente do rio Buquira, cujos níveis oscilam entre 3,20 e 3,50 metros em períodos de chuvas intensas. A vulnerabilidade da localidade é agravada pela combinação de baixa altitude, relevo acidentado e infraestrutura de drenagem insuficiente, fatores que aumentam a suscetibilidade tanto a inundações quanto a deslizamentos. A Figura 4 ilustra o aumento do volume de água, que resulta no transbordamento do rio Buquira e causa danos nos bairros Mirante do Buquirinha, Taquari e Costinha.

Figura 4. Impactos do aumento do volume de água devido ao transbordamento do rio Buquira, em SJC.



Fonte. Defesa Civil de SJC (2023).

Além disso, intervenções específicas, como a remoção de moradias em áreas de risco, tiveram um impacto direto na redução dos eventos de inundação. Entre 2009 e 2018, o número de ocorrências caiu de 60 para 23 eventos, representando uma queda aproximada de 62%. Essas ações incluíram a remoção de residências localizadas em zonas críticas e a desobstrução dos sistemas de drenagem, corroborando a eficácia de políticas de mitigação estrutural. O caso do Mirante do Buquirinha ilustra a relevância dessas intervenções, onde a remoção de moradias vulneráveis resultou na mitigação significativa dos riscos.

Esses resultados enfatizam a necessidade de incorporar regulamentações específicas de uso do solo e estratégias de planejamento urbano que considerem as características altimétricas e hidrológicas

na alocação de infraestrutura de drenagem e na definição de zonas de risco. A abordagem adotada neste estudo reflete a importância de intervenções estruturais e adequações no uso do solo para reduzir os impactos das inundações urbanas, em consonância com estudos anteriores, como os de Belisário *et al.* (2019) e Camargo *et al.* (2011).

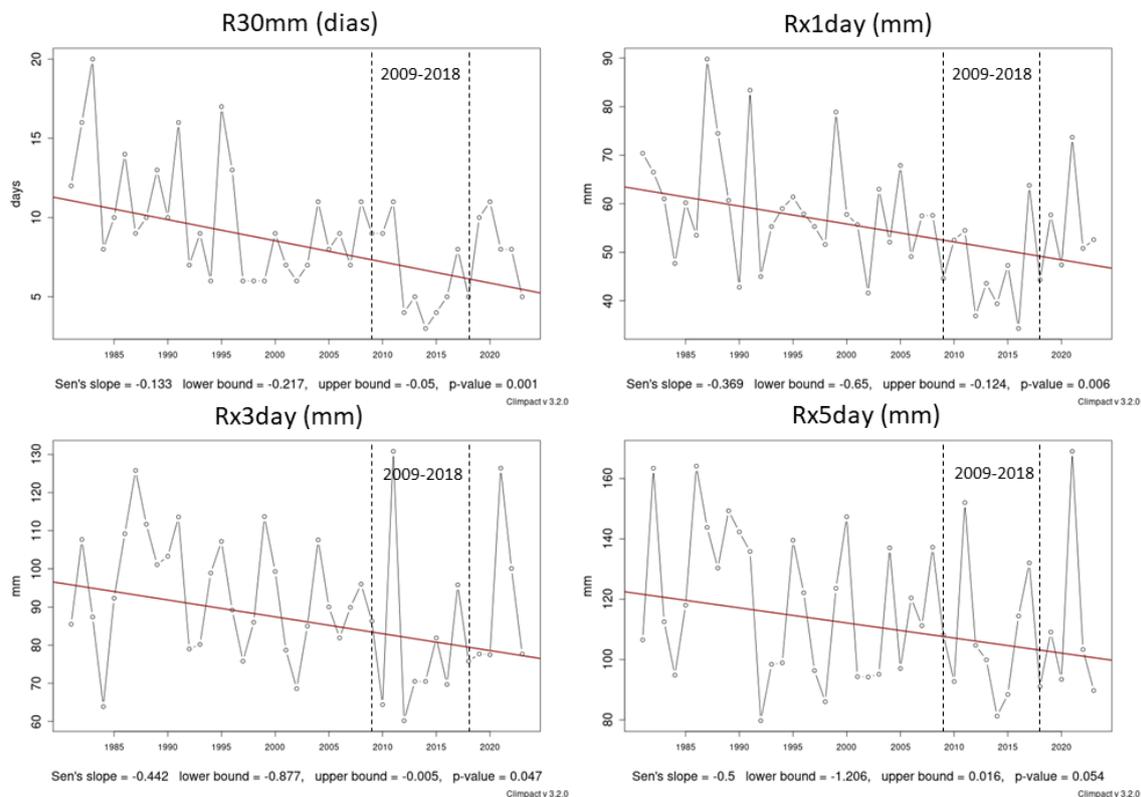
3.3 PADRÕES DE PRECIPITAÇÃO E IMPACTO NAS INUNDAÇÕES

Os dados de precipitação acumulada mostram que a maioria das chuvas intensas em SJC ocorre entre outubro e março, com um pico significativo em janeiro (Ferreira *et al.*, 2020). Esse padrão sazonal de precipitação intensa nos meses de verão aumenta o risco de inundações, especialmente em áreas com infraestrutura de drenagem limitada e ocupação desordenada, como discutido em estudos anteriores de Marengo e Alves (2005) e Silva *et al.* (2019). A correlação entre os períodos de chuvas intensas e a alta frequência de inundações justifica a necessidade de uma infraestrutura de drenagem planejada, bem como políticas de ordenamento urbano para mitigar os riscos de desastres.

A série histórica de precipitação entre 1981 e 2023 (Figura 5) aponta para uma tendência de declínio nos eventos de precipitação extrema em SJC, evidenciada pelos índices R30mm, Rx1day, Rx3day e Rx5day.

O índice R30mm, que reflete o número de dias com precipitação igual ou superior a 30 mm, apresenta uma inclinação de -0,133 (p-valor = 0,001), indicando uma redução na frequência de dias com chuvas intensas, o que pode aliviar a pressão sobre a infraestrutura de drenagem e reduzir a exposição de áreas vulneráveis. O índice Rx1day, que mede o volume máximo de precipitação em um dia, revela uma inclinação negativa de -0,369 (p-valor = 0,006), sugerindo uma diminuição na intensidade dos eventos mais severos, o que pode diminuir os picos de inundações, embora a variabilidade interanual mantenha o risco presente. Os índices Rx3day e Rx5day, que representam a precipitação acumulada em três e cinco dias consecutivos, também mostram tendências decrescentes com inclinações de -0,442 e -0,5, respectivamente. Embora o p-valor para Rx5day (0,054) apresente menor significância estatística, ambos os indicadores sugerem uma redução na frequência e intensidade de chuvas prolongadas, que tradicionalmente agravam os riscos de inundação em áreas urbanas densas.

Figura 5. Extremos de precipitação (1981-2023), destacando os índices R30mm, Rx1dia, Rx3dia e Rx5dia.



Fonte. Elaborada pelos autores.

4 DISCUSSÃO

A análise integrada de dados altimétricos e de precipitação permitiu mapear as áreas de SJC mais suscetíveis a inundações e compreender os principais fatores que influenciam esses eventos. Os resultados identificaram maior vulnerabilidade em regiões de baixa altitude e proximidade a corpos d'água, com destaque para a zona leste do município, onde a infraestrutura de drenagem é insuficiente e a cota altimétrica média é de 568 metros.

O Índice de Moran Local (IML) revelou uma autocorrelação espacial significativa ($p < 0,05$) entre altitude e registros de inundações, com 962 eventos dependentes espacialmente. Áreas como Sapé I, Vila Guarani e Jardim do Lago, próximas ao córrego Cambuí, registraram 415 ocorrências devido à combinação de baixa altitude e drenagem precária. O Mirante do Buquirinha, na região norte, apresentou os maiores registros de inundações, relacionados ao transbordamento do rio Buquirinha, cujos níveis oscilam entre 3,20 e 3,50 metros durante chuvas intensas.

Os dados históricos de precipitação (1981-2023) indicaram uma tendência de declínio na frequência e intensidade de eventos extremos, com reduções nos índices R30mm (-0,133, $p = 0,001$) e Rx1day (-0,369, $p = 0,006$). Apesar desse alívio parcial, a persistência de eventos intensos durante o verão ainda representa riscos significativos, especialmente nas áreas já mapeadas como vulneráveis.

Esses padrões refletem desafios observados em outras localidades, como Guaratuba/PR e São Gonçalo/RJ, onde a impermeabilização do solo e a remoção de vegetação ciliar intensificam os impactos das chuvas (Vieira *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2019). Assim como nesses contextos, as inundações em SJC evidenciam a necessidade de políticas de planejamento urbano que incorporem características topográficas no ordenamento do uso do solo e na alocação de infraestrutura de drenagem.

Diante desses resultados, destaca-se a importância de combinar soluções estruturais e baseadas na natureza, como zonas de amortecimento e áreas permeáveis, para fortalecer a resiliência urbana. Experiências bem-sucedidas em cidades como Curitiba e Blumenau demonstram que sistemas integrados de drenagem e programas de conscientização ambiental podem reduzir os riscos de inundação. Adaptar essas práticas à realidade de SJC é essencial para promover um planejamento urbano sustentável, alinhado aos ODS 11 (Cidades Resilientes) e ODS 13 (Ação Climática).

Por fim, esta pesquisa apresenta limitações, como a dependência de registros da Defesa Civil, que podem não contemplar eventos subnotificados, e o recorte temporal restrito (2009-2018). Estudos futuros devem ampliar o período de análise e incorporar dados atualizados, além de explorar tecnologias de sensoriamento remoto e modelagem hidrológica para prever cenários climáticos. Investigar a eficácia de soluções baseadas na natureza representa uma abordagem promissora para mitigar os riscos de inundação em áreas urbanas densas e preparar as cidades para os desafios climáticos do futuro.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa investigou a relação entre registros de inundações e características geográficas e antrópicas em SJC, identificando áreas de maior suscetibilidade e avaliando os efeitos de intervenções mitigadoras entre 2009 e 2018. O principal achado foi a identificação de uma autocorrelação espacial significativa entre altitude e registros de inundações. A análise com o Índice de Moran Local (IML) evidenciou que áreas de baixa altitude, especialmente próximas a corpos d'água, são particularmente vulneráveis às inundações, com destaque para a zona leste do município, onde a infraestrutura de drenagem é insuficiente.

A contribuição desta pesquisa reside na aplicação de uma metodologia integrada de análise espacial e indicadores climáticos, sublinhando a relevância de considerar variáveis topográficas e sazonais no planejamento urbano para a mitigação de desastres. Esses achados oferecem uma base para políticas de ordenamento urbano mais direcionadas e decisões de investimento em infraestrutura de drenagem em regiões de alto risco. Essa abordagem está alinhada com o Objetivo de

Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 da Agenda 2030, que visa promover cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis. Além disso, a promoção de programas de educação ambiental que envolvam a comunidade contribui para o ODS 4, que busca garantir educação de qualidade e incentivar práticas sustentáveis.

A relevância dessa pesquisa também se conecta ao ODS 13, que reforça a importância da ação contra a mudança global do clima. A análise de SJC, aliada a estudos de outras localidades, como Guaratuba/PR e São Gonçalo/RJ, destaca que eventos climáticos extremos podem intensificar os riscos de inundações, demandando medidas de adaptação e políticas de longo prazo. Em consonância com Ferreira *et al.* (2023b), compreende-se que fortalecer as capacidades institucionais e investir em tecnologias de monitoramento e previsão climática se mostram essenciais para uma resposta eficaz a esses desafios. Ademais, práticas baseadas na natureza, como a criação de zonas de amortecimento e a expansão de áreas permeáveis, dialogam com o ODS 15, que preconiza a proteção e restauração de ecossistemas terrestres. Essas ações ajudam a manter os serviços ecossistêmicos e a resiliência do território, beneficiando tanto o ambiente quanto a população local.

Estudos futuros deveriam expandir o período de análise, incorporando dados mais recentes e avaliando os efeitos de políticas urbanas. O uso de tecnologias de sensoriamento remoto e modelagem hidrológica pode refinar as análises e permitir projeções mais precisas para diferentes cenários climáticos. A investigação da eficácia de soluções baseadas na natureza, como a recuperação de áreas verdes, se mostra promissora para a mitigação de riscos em áreas urbanas densas e pode servir de base para a formulação de estratégias que apoiem os ODS de forma integrada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade de Taubaté e ao Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi) pelo apoio técnico e institucional.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, E., MARENGO, J. A., MANTOVANI, J., LONDE, L. R., SAN, R. L. Y., PARK, E., ... & NOBRE, C. (2023). Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. *Natural hazards and earth system sciences*, 23(3), 1157-1175. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1157-2023>
- ALEXANDER, L., & HEROLD, N. (2016). ClimPACT2: Indices and software.: https://epic.awi.de/id/eprint/49274/1/ClimPACTv2_manual.pdf
- ANSELIN, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- BATHRELLOS, G. D., SKILODIMOU, H. D., SOUKIS, K., & KOSKERIDOU, E. (2018). Temporal and spatial analysis of flood occurrences in the drainage basin of Pinios river (Thessaly, Central Greece). *Land*, 7(3), 106. <https://doi.org/10.3390/land7030106>
- BELISÁRIO, P. R., RIBEIRO, M. R., & VALÉRIO FILHOS, M. (2019). Análise da dinâmica de uso e ocupação do solo e suas implicações com o zoneamento do solo urbano na bacia do Ribeirão Cambuí, São José dos Campos-SP. *Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa-PB, Brasil*, 25, 1-8. <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1368.pdf>
- BRASIL. República Federativa do Brasil, 2024. Sistema integrado de informações sobre desastres S2ID. <https://s2id.mi.gov.br/paginas/series/>
- CAMARGO, F. F., FLORENZANO, T. G., DE ALMEIDA, C. M., & DE OLIVEIRA, C. G. (2011). Mapeamento geomorfológico com imagens estereoscópicas digitais do sensor Aster/Terra. *Geosciences*, 30(1), 95-104. <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/5494>
- CASTRO, J. F. M. (2018). Geovisualização de mapas históricos. *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia*, 16(1), 225-240.
- COUTINHO, M. P., GONÇALVES, D. A., CARAM, R. D. O., & SOARES, P. V. (2018). Áreas de inundação no trecho paulista da bacia do Rio Paraíba do Sul e nascentes do Cadastro Ambiental Rural. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 10, 614-623. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.010.003.AO09>
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Projeto Aerogeofísico São José dos Campos. <https://geosgb.cprm.gov.br>
- FERREIRA, F. L., PEREIRA, E. B., & LABAKI, L. C. (2020). Land surface temperature associated factors in urban areas: local climate zones and spectral characteristics. *Ambiente Construído*, 21, 237-262. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100504>
- FERREIRA, W. J., DA SILVA RICHETTO, K. C., & ALVALÁ, P. (2023a). Cloud brightness evaluation from ground-based total sky images using the HSV color space parameter. *Revista Técnica Ciências Ambientais*, 1(7), 1-13. <https://ipabhi.org/repositorio/index.php/rca/article/view/99>

- FERREIRA, W. J., DA SILVA RICHETTO, K. C., & CHAGAS, E. V. (2023b). Educação Ambiental: um caminho sustentável para combater as mudanças climáticas. *Revista Biociências*, 29(especial).
- HANDAYANI, W., CHIGBU, U. E., RUDIARTO, I., & PUTRI, I. H. S. (2020). Urbanization and Increasing flood risk in the Northern Coast of Central Java—Indonesia: An assessment towards better land use policy and flood management. *Land*, 9(10), 343. <https://doi.org/10.3390/land9100343>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. <http://www.cidades.ibge.gov.br>
- LUZARDO, A. J. R., CASTAÑEDA FILHO, R. M., & RUBIM, I. B. (2017). Análise espacial exploratória com o emprego do índice de Moran. *GEOgraphia*, 19(40), 161-179.
- MARCHEZINI, V., TRAJBER, R., DA CONCEIÇÃO, R. S., MENDES, T. S. G., & NEGRI, R. G. (2018). Desafios para uma agenda de prevenção de desastres em sítios históricos: o caso de São Luiz do Paraitinga, SP/Challenges for a disaster prevention schedule at historic sites: the case of São Luiz do Paraitinga, SP. *Patrimônio e Memória*, 14(2), 375-400. <https://pem.assis.unesp.br/index.php/pem/article/view/800>
- MARENGO, J. A., & ALVES, L. M. (2005). Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(2), 215-226.
- MOMO, M. R., PINHEIRO, A., SEVERO, D. L., CUARTAS, L. A., & NOBRE, A. D. (2016). Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. *RBRH*, 21, 200-208. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p200-208>
- NEVES, L. V., DE DEUS, L. A. B., JÚNIOR, A. C. D. S. O., & DO COUTO FERNANDES, M. (2019). Mudanças de Uso e Cobertura da Terra e Áreas Suscetíveis à Inundação—Estudo de Caso do Município de Duque de Caxias/RJ. *Revista do Departamento de Geografia*, 37, 30-43. <https://doi.org/10.11606/rdg.v37i0.149051>
- OZKAYA, A., & AKYUREK, Z. (2019). Evaluating the use of bias-corrected radar rainfall data in three flood events in Samsun, Turkey. *Natural Hazards*, 98, 643-674. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03723-z>
- PARSIAN, S., AMANI, M., MOGHIMI, A., GHORBANIAN, A., & MAHDAVI, S. (2021). Flood hazard mapping using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and multi-source geospatial datasets. *Remote Sensing*, 13(23), 4761. <https://doi.org/10.3390/rs13234761>
- PMSJC. Prefeitura Municipal de São José dos Campos. Secretaria de Governança. <https://www.sjc.sp.gov.br>
- PRADO, J. B., & DE ABREU, M. M. (1995). *Aspectos geográficos do vale do Paraíba e município de Taubaté*. Prefeitura Municipal de Taubaté.
- RENTSCHLER, J., AVNER, P., MARCONCINI, M., SU, R., STRANO, E., VOUSDOKAS, M., & HALLEGATTE, S. (2023). Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985. *Nature*, 622(7981), 87-92. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06468-9>

SANTOS, D. N., DE OLIVEIRA, M. A. M., FORMIGONI, A., MAIELLARO, J. R., SAAD, A. R., & FERNANDES, M. E. (2016). River Network and the Risk of Flooding for the Railway and Subway Systems in the City of São Paulo, Brazil. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 7, 328-334. <https://doi.org/10.17265/2328-2193/2016.07.002>

SANTOS, E. T. D., & HADDAD, E. A. (2014). Mapeamento das perdas econômicas potenciais dos pontos de alagamento do município de São Paulo, 2008-2012. *Ambiente & Sociedade*, 17, 77-94. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC969V1742014>

SILVA, R. C., FISCH, G., & SANTOS, T. A. (2019). Future scenarios (2011-2040) of temporal and spatial changes in precipitation in the Paraitinga and Paraibuna watersheds, São Paulo, Brazil. *Revista Ambiente e Agua*, 14, 1-12. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2302>

UNISDR. United Nation Office for Disaster Risk Reduction. Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres. 2015.

WANG, Y., FANG, Z., HONG, H., & PENG, L. (2020). Flood susceptibility mapping using convolutional neural network frameworks. *Journal of hydrology*, 582, 124482. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124482>

YOU, X. (2023). Flood-prone areas are hotspots for urban development. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/d41586-023-03128-w>