CENÁRIOS FUTUROS DE INUNDAÇÃO COSTEIRA NO LITORAL NORTE DE SANTA CATARINA: UMA ABORDAGEM POR AUTÔMATOS CELULARES

Ana Clara Medeiros da Silva, Pedro Oscar Pizetti Mariano, Patrícia Turazzi Luciano.

INTRODUÇÃO

Diante da intensificação das mudanças climáticas, a elevação do nível do mar e as inundações costeiras tornam-se desafios relevantes para o planejamento das áreas litorâneas (Jin et al., 2024). Nesse contexto, ferramentas de modelagem espacial permitem simular cenários futuros e possíveis transformações territoriais (Oliveira, 2019). Entre elas, os autômatos celulares (AC) representam o espaço por células que alteram seus estados conforme regras de transição e vizinhança, possibilitando gerar cenários espaciais (Clarke; Hoppen; Gaydos, 1997). Assim, este estudo tem como objetivo simular, por meio de autômatos celulares, áreas potencialmente suscetíveis à inundação no litoral norte de Santa Catarina, comparando cenários de baixas e altas emissões para 2050, 2075, 2100 e 2125. Os resultados demonstram diferenças crescentes entre os cenários, sobretudo após 2075, com maiores áreas potencialmente inundadas sob altas emissões, reforçando a importância da mitigação climática e do planejamento urbano sustentável.

DESENVOLVIMENTO

Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre mudanças climáticas, fundamentos dos autômatos celulares e suas aplicações em transformações urbanas e ambientais, estabelecendo a base teórica para as simulações. Em seguida, foram levantados os dados necessários à elaboração do mapa-base do litoral norte de Santa Catarina. No software QGIS, as camadas foram recortadas e padronizadas quanto à resolução, extensão e alinhamento, além de convertidas para o formato *Raster*, tornando os dados compatíveis com o modelo de autômato celular. Foram utilizadas camadas de áreas urbanizadas e limites municipais de 2015, disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido no OpenTopography; representação do oceano, proveniente do OpenStreetMap; e hidrografia, disponibilizada pela Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Após a preparação do mapa-base, os dados foram processados em linguagem Python, com auxílio de ferramentas de Inteligência Artificial (IA), como ChatGPT, na elaboração e no aprimoramento dos códigos. A IA foi utilizada apenas como apoio à programação, enquanto os parâmetros, as regras do modelo e a análise dos resultados foram definidos de acordo com as etapas da pesquisa. As regras do AC combinaram altitude e conectividade: uma célula foi classificada como potencialmente inundada quando apresentava altitude igual ou inferior ao nível do mar definido para o cenário e estava conectada ao mar, à hidrografia ou a outra célula já inundada, evitando a inclusão de depressões isoladas (Gesch, 2018). A propagação ocorreu pelo método de vizinhança de Moore, que considera as oito células adjacentes, permitindo a expansão nas direções ortogonais e diagonais (Clarke; Hoppen; Gaydos, 1997).

As simulações foram realizadas para 2050, 2075, 2100 e 2125, considerando duas trajetórias climáticas do IPCC: SSP1-1.9, associado a emissões muito baixas de gases de efeito estufa e fortes esforços de mitigação, compatíveis com a meta de limitar o aquecimento global a aproximadamente 1,5 °C estabelecida pelo Acordo de Paris (UNFCCC, 2015; IPCC, 2021); e SSP5-8.5, relacionado a emissões muito altas. A comparação entre os cenários permitiu analisar diferentes condições de inundação costeira. Para definir a elevação do nível do mar em cada período, foram utilizadas projeções regionalizadas do IPCC AR6 disponibilizadas pelo

Sea Level Projection Tool da NASA, adotando Imbituba (SC) como referência por ser o ponto de projeção disponível mais próximo da área de estudo. O litoral catarinense foi dividido em três setores proporcionalmente iguais, sendo o setor Norte selecionado como teste piloto para posterior aplicação da metodologia às demais áreas. Como os anos definidos para as simulações não coincidiam integralmente com os intervalos das projeções disponíveis, os valores correspondentes foram obtidos por interpolação linear.

RESULTADOS

Os resultados para o litoral norte de Santa Catarina demonstram diferenças progressivas entre os cenários de baixas e altas emissões (Figura 1). Em 2050, o SSP1-1.9 apresentou elevação do nível do mar de 0,177 m e 8,7 km² de nova área potencialmente inundada, enquanto o SSP5-8.5 atingiu 0,256 m e 8,9 km², uma diferença de apenas 0,20 km². Em 2075, as áreas passaram para 9,10 km² e 11,72 km², respectivamente, ampliando-se em 2100 para 9,62 km² no cenário de baixas emissões e 15,63 km² no de altas emissões. A partir de 2075, a diferença entre os cenários torna-se mais expressiva, acompanhando a crescente divergência entre as projeções de elevação do nível do mar associadas às duas trajetórias de emissões (IPCC, 2021). As características topográficas do recorte estudado também contribuem para esse avanço, pois áreas costeiras de baixa altitude e conectadas ao mar favorecem a expansão da inundação mesmo diante de pequenas elevações adicionais do nível do mar. Em 2125, essa diferença se intensifica: a elevação alcança 0,499 m no SSP1-1.9 e 1,433 m no SSP5-8.5, correspondendo a 10,74 km² e 32,34 km² de novas áreas potencialmente inundadas. A diferença de 21,60 km² evidencia que a continuidade das altas emissões pode ampliar significativamente a exposição do território à inundação, conforme apresentado na Tabela 1 e na Figura 1.

Em relação às áreas urbanizadas, os resultados também evidenciam uma divergência progressiva entre os cenários. Em 2050, os valores foram semelhantes, com 0,58 km² de área urbana potencialmente inundada no SSP1-1.9 e 0,59 km² no SSP5-8.5. Ao longo dos períodos analisados, essa diferença se amplia: em 2075, os valores acumulados atingem 1,17 km² e 1,29 km², respectivamente, passando para 1,77 km² e 2,13 km² em 2100. Em 2125, a diferença torna-se mais expressiva, com 2,37 km² de área urbana potencialmente inundada no cenário de baixas emissões e 3,53 km² no de altas emissões, evidenciando maior exposição das áreas urbanizadas sob a trajetória de emissões mais elevada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do modelo de autômatos celulares permitiu representar possíveis cenários futuros de inundação no litoral norte de Santa Catarina decorrentes da elevação do nível do mar. Os mapas e as estimativas das áreas suscetíveis podem contribuir para o planejamento urbano ao indicar áreas urbanizadas e locais potencialmente expostos ao risco. A comparação entre os cenários de baixas e altas emissões indica que diferentes trajetórias climáticas podem gerar impactos territoriais distintos, reforçando a importância de práticas mais sustentáveis e dos compromissos climáticos internacionais.

Apesar disso, o modelo apresenta limitações relacionadas à precisão dos dados e à simplificação dos processos de inundação costeira, de modo que os resultados representam cenários possíveis, e não previsões exatas. Como continuidade, recomenda-se incorporar variáveis como marés e eventos extremos, além da aplicação do modelo em outras áreas do litoral catarinense

Palavras-chave: elevação do nível do mar; inundação costeira; autômatos celulares; mudanças climáticas; planejamento urbano.

ANEXOS

Figura 1. *Simulações de inundação costeira no litoral norte de Santa Catarina nos cenários SSP1-1.9 e SSP5-8.5 (2050–2125)*

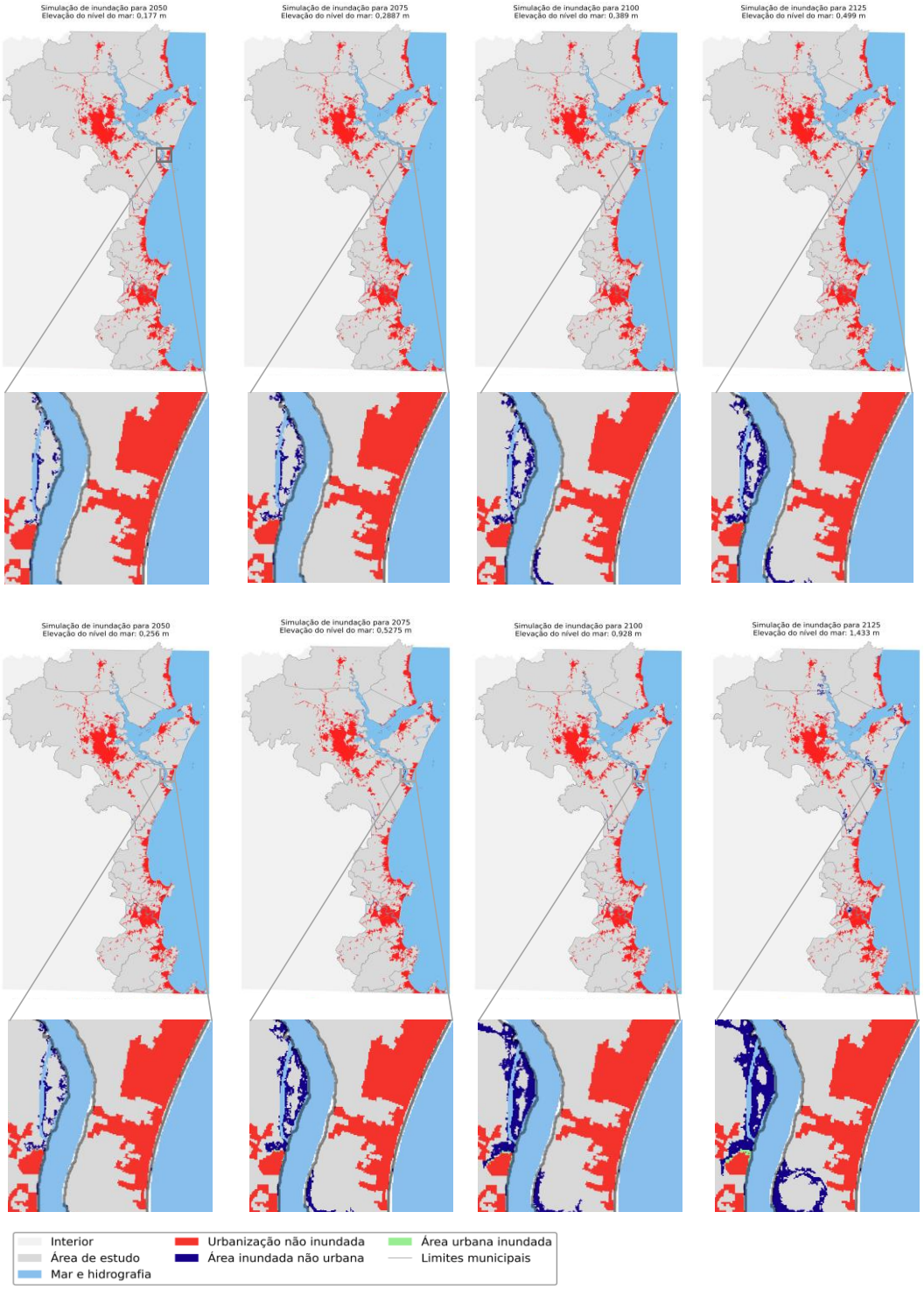
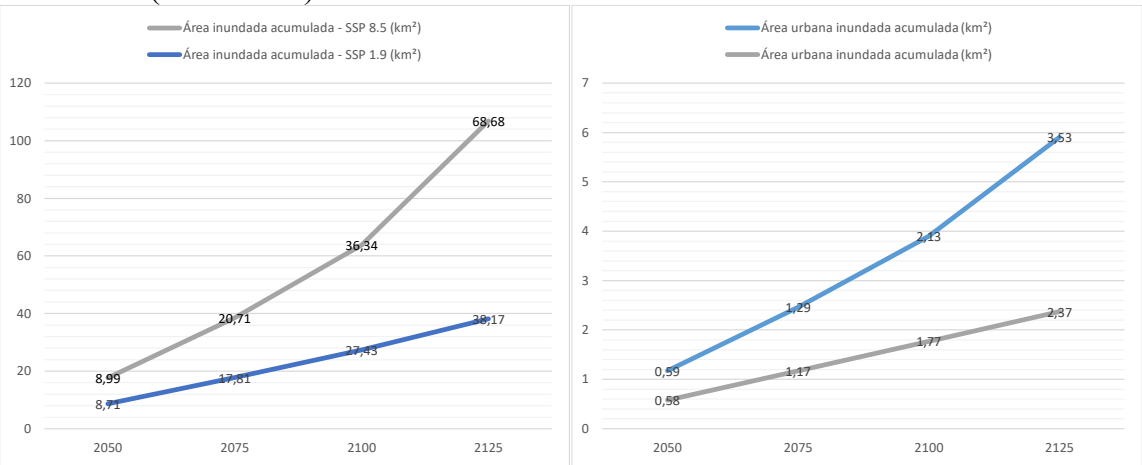


Figura 2. Evolução da área total e urbana inundada acumulada nos cenários SSP1-1.9 e SSP5-8.5 (2050–2125)



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLARKE, Keith C.; HOPPEN, Stacy; GAYDOS, Leonard J. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 24, p. 247–261, 1997.

JIN, Hu; YUAN, Jiacan; KULP, Scott; WANG, Hui; LI, Dawei; WANG, Guihua. Substantial reduction in population exposure to sea level changes along the Chinese mainland coast through emission mitigation. *Environmental Research Letters*, v. 19, n. 11, 114044, 2024.

GESCH, Dean B. "Best practices for elevation-based assessments of sea-level rise and coastal flooding exposure". *Frontiers in Earth Science*. v. 6, 2018, art. 230.

UNITED NATIONS. *Paris Agreement*. Paris: United Nations, 2015.

IPCC. *Climate Change 2021*: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

OLIVEIRA, Laís Marques de. *Modelagem dinâmica e cenários urbanos de demanda de água: simulações em Campina Grande - PB*. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.