

ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE PREVISÃO POTENCIAL PARA CIDADES BRASILEIRAS

Marcos Roberto Martines¹
Rogério Hartung Toppa²
Júlio Cesar Pedrassoli³
Ricardo Vicente Ferreira⁴
Eduardo Felix Justiniano⁵
Marcel Fantin⁶
Marina Pannunzio Ribeiro⁷
Fernando Shinji Kawakubo⁸

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas referem-se às alterações que ocorrem no clima da Terra ao longo do tempo, especialmente em relação ao aumento da temperatura média global (NDA et al., 2018). Essas mudanças são causadas principalmente pela intensificação do efeito estufa devido às atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento, entre outros (HANSEN et al., 1981). Assim, essas alterações climáticas podem levar a uma diversidade de formas de impactos, além do aumento das temperaturas, alterações nos padrões de precipitação, aumento do nível do mar e eventos climáticos extremos, como tempestades mais intensas e secas prolongas (STOTT et al., 2016).

Desse modo, as mudanças climáticas têm impactado significativamente no meio ambiente, o que inclui as áreas urbanas (COMARAZAMY et al., 2013). De acordo com RAMACHANDRAN et al. (2019), as mudanças no clima também têm efeito sobre áreas de alagamentos e inundações urbanas, resultando em um maior risco desses eventos nas cidades, causando danos materiais e afetando diretamente a qualidade de vida das pessoas. Além disso, o aumento da frequência e intensidade das chuvas também contribui para o aumento das áreas alagáveis e inundações urbanas, tornando as cidades mais vulneráveis especialmente em áreas de planície (EIGENBROD et al., 2011), podendo estas áreas serem afetadas por alagamentos e inundações durante eventos climáticos extremos, como fortes chuvas ou tempestades (SILVA et al., 2017). No contexto das mudanças climáticas, esse processo aumenta o risco e a

¹ Doutor em Geografia Física pela Universidade de São Paulo - SP, mmartines@ufscar.br;

² Doutor em Ecologia e Recursos Naturais pela Universidade Federal de São Carlos- SP, toppa@ufscar.br;

³ Doutor em Geografia Humana pela Universidade de São Paulo - SP, jpedrassoli@ufba.br;

⁴ Doutor em Geografia Física pela Universidade de São Paulo - SP - ricardo.ferreira@uftm.edu.br;

⁵ Doutorando pela Geografia Física pela Universidade de São Paulo - SP - e.justiniano@usp.br;

⁶ Doutor em Geociências pela Universidade Estadual de Campinas - mfantin@sc.usp.br;

⁷ Doutoranda em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis pela Universidade Federal de São Carlos- SP - marinapr@estudante.ufscar.br

⁸ Doutor em Geografia Física pela Universidade de São Paulo - SP, fsk@usp.br

frequência desses alagamentos e inundações urbanas, pois são influenciadas pelos padrões alterados de precipitação (MILLER; HUTCHINS, 2017).

Consideram-se áreas de inundação urbana as que estão inseridas dentro de um ambiente urbano e são propensas a inundações durante eventos climáticos extremos (GÜNERALP et al., 2015), sendo geralmente caracterizadas por baixa altitude, proximidade de rios ou córregos e normalmente com falta de infraestrutura adequada para gerenciar o fluxo de água (HINTZ, 2011). Segundo a Portaria Conjunta ANA/MMA, CEMADEN/MCTI, CENAD/MI, CPRM/MME n.º 148, 18 de dezembro de 2013 classifica alagamentos como a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas, isso significa que, quando ocorrem chuvas intensas, essas áreas têm uma maior probabilidade de serem inundadas e alagadas sofrendo danos significativos (JHA et al., 2011). No contexto das mudanças climáticas, espera-se que essas áreas de alagamentos e inundação urbana sejam cada vez mais afetadas pelo aumento da intensidade e frequência das chuvas, isso destaca a importância do planejamento urbano adequado, infraestrutura resiliente e medidas de adaptação para minimizar os impactos das inundações e alagamentos urbanos (YADAV; DIWAKAR, 2023).

Assim, no cenário do planejamento urbano, aspectos ligados ao potencial de inundações e alagamentos, a implementação de medidas para mitigar os riscos são necessários, dentre elas destaca-se a construção de sistemas de drenagem adequados para gerir o excesso de água durante chuvas fortes (KONRAD, 2003), a redução do desenvolvimento urbano em zonas propensas a inundações e alagamentos e a implementação de infraestruturas verdes, como zonas húmidas e superfícies permeáveis (VICUÑA; ORMAZA, 2021). Essas soluções baseadas na natureza não apenas contribuem para a resiliência das cidades diante das mudanças climáticas, mas também trazem benefícios adicionais, como a melhoria da qualidade ambiental e a promoção de espaços públicos agradáveis (GÜRER et al., 2017).

Portanto, o estudo das áreas de alagamentos e inundação urbanas são essenciais para dar subsídios às políticas de planejamento urbano, a fim de promover a sustentabilidade das cidades e garantir a segurança e qualidade de vida dos seus habitantes em um contexto de mudanças climáticas em evolução. Neste contexto, essa pesquisa tem como objetivo desenvolver um aplicativo com parâmetros customizável, via computação em nuvem, de um modelo para a identificação de áreas potenciais alagáveis e de inundação nas áreas urbanas das cidades brasileiras, sendo, portanto, um instrumento exploratório e de suporte a decisão. Além disso, esse aplicativo está na forma de livre acesso on line e pode ser utilizado em

prefeituras/defesa civil de municípios que não tem recursos ou corpo técnico especializado em inundação e alagamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo porposto nessa pesquisa foram seguidas as seguintes etapas: definição das bases cartográficas, elaboração de script em linguagem *Java* a ser implementado na plataforma de computação *Google Earth Engine*, definição de área de validação, definição das amostragem de validação e desenvolvimento de plataforma *APP* (aplicativo) baseado na web.

Inicialmente foi gerado o modelo para áreas pontencias para alagamentos e inundação com base na estimativa em graus da declividade do *Forest And Buildings Removed Copernicus DEM* (FABDEM V1-2), que é um modelo de elevação global com resolução espacial de 30 metros. Trata-se de um modelo de superfície que remove a interferência de altura de edifícios e árvores do modelo digital de elevação (*DEM*) *Copernicus*, representando apenas o relevo terrestre, facilitando pesquisas ambientais e geográficas, e em especial aos modelos de inundação (HAWKER, 2022).

O segundo material utilizado na modelagem foi o *Height Above the Nearest Drainage* - (HAND) com resolução espacial de 30 metros, que é uma medida topográfica que representa a elevação de um ponto específico em relação ao nível do curso d'água mais próximo. Essa métrica é amplamente utilizada em modelagem de inundação, delimitação de bacias hidrográficas, planejamento urbano, etc. Assim, o HAND é uma métrica importante que fornece informações detalhadas sobre a relação entre a topografia de uma região e seus cursos d'água, sendo essencial para uma ampla gama de aplicações em estudos ambientais, planejamento e gestão de recursos hídricos (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011)

Por fim, foi utilizado como um recorte as áreas urbanas disponíveis no MapBiomias (dados de 2022), que é uma plataforma que realiza o mapeamento das mudanças na cobertura e uso da terra no Brasil (SOUZA et al., 2020).

Para a geração do modelo foi utilizado à combinação de lógica, seguindo as etapas: (i) baseado no modelo HAND criou-se uma máscara binária (imagem), na qual os pixels têm o valor 1 se a condição $HAND < elevationValue$ (valor atribuído pelo usuário para a elevação) for verdadeira, e 0 caso contrário. Esta máscara representa as áreas cuja altura acima do nível do fluxo HAND é menor que um determinado valor (*elevationValue*), indicando áreas potencialmente inundáveis e ou alagáveis; (ii) definiu-se uma máscara binária que representa áreas onde a declividade é menor que um valor especificado *slopeValue* (valor atribuído pelo usuário para o grau de declividade) correspondendo as áreas planas; (iii) aplicou-se uma

mascarará binária para destacar apenas o modelo dentro da área urbana de cada município; (iv) as máscaras foram multiplicadas, e o resultado é uma nova máscara binária cujo os pixels têm valor 1 somente se todas as condições forem verdadeiras, e 0 caso se pelo menos uma condição for falsa.

Desse modo, esse produto cria uma máscara que identifica os pixels que estão em áreas com altura acima do nível do curso fluvial menor que o valor definido pelo usuário, e que estão em áreas com declividade menor que a definida pelo usuário e contidas dentro das áreas urbanas municipais. Nessa máscara, assumimos que as áreas serão classificadas como inundação e alagamento. Embora esses sejam conceitos distintos, eles serão classificados sem diferenciação no APP, pois ambos são baseados no acúmulo de precipitação pluviométrica deflagrante. Assim, essa forma de abordagem classificatória se alinha a outras pesquisas, tais como DOS SANTOS (2014), LICCO; MAC DOWELL (2015), VESTENA (2020), entre outros, que classificam áreas de inundação e alagamentos sem diferenciação.

Para a validação do modelo foi utilizado a área urbana da cidade de Sorocaba – SP, adotando como parâmetros a declividade de 1,15 graus (equivale a declividade de 2%) considerada plana (IPT, 1981) e a cota de inundação 3,5 metros. Nesta validação foram utilizadas 178 informações coletadas junto a Secretaria de Segurança Urbana - Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC) de Sorocaba, sendo 76 pontos de alagamentos e 102 de inundação identificados nos anos de 2022 e 2023. Essas informações foram analisadas através de uma matriz de confusão, que é um método que utiliza a avaliação de um modelo de classificação. A matriz é uma tabela que permite visualizar o desempenho do modelo ao comparar os valores reais com as previsões feitas (BISHOP, 2006).

A análise do modelo foi realizada pelas métricas de precisão: exatidão global (Eq.1), que é a proporção de todas as classificações que foram corretamente identificadas; b) exatidão para alagamentos (Eq.2); e inundação (Eq.3) que mede a capacidade do modelo de identificar corretamente as amostras de uma classe específica (CONGALTON; GREEN, 2009).

Eq 1

$$EG = \frac{\sum_{i=1}^k C_{ii}}{N}$$

Sendo que:

k = número de classes;

C_{ii} = elemento na linha i e coluna i;

N = número total de amostras.

Eq 2

$$EP = \frac{P_{ii}}{\sum_{j=1}^k P_{ij}}$$

P_{ii} = número de amostras corretamente classificadas para a classe i;

$\sum_{j=1}^k P_{ij}$ = número total de amostras da classe i.

Eq3

$$EC = \frac{C_{ii}}{\sum_{j=1}^k C_{ij}}$$

C_{ii} = número de amostras corretamente classificadas para a classe i;

$\sum_{j=1}^k C_{ij}$ = número total de amostras classificadas como a classe i.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a matriz de confusão que avalia a precisão da classificação e as métricas de precisão exatidão global, exatidão do alagamento e inundação para o modelo estimado. Observa-se que exatidão global foi de 81%, sendo 80-90% considerada boa o que sugere uma classificação precisa. A exatidão dos alagamentos 85% e inundação com 81%, também estão na margem considerada como bom (CONGALTON; GREEN, 2009).

Tabela 1 – Matriz de Confusão

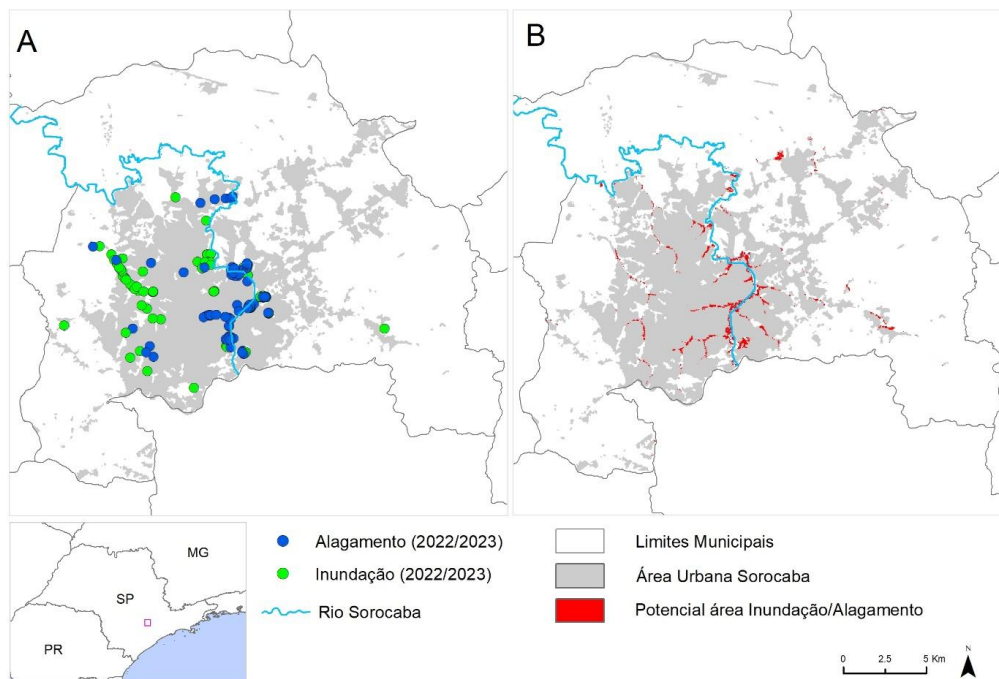
Classe	Positivo	Negativo	Total
Alagamento	65	11	76
Inundação	83	19	102
Total	144	34	178

Mátricas de precisão

Exatidão Global	0,81
Exatidão do Alagamento	0,85
Exatidão do Inundação	0,81

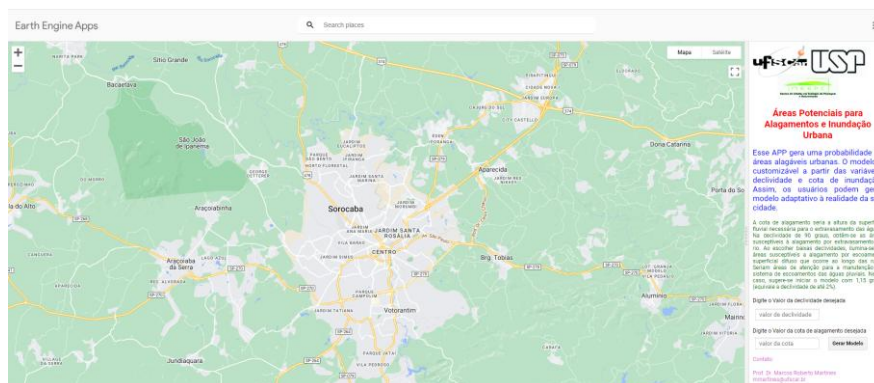
O modelo desenvolvido identificou áreas com potencial para inundação e alagamentos, e de forma geral, as áreas indicadas pelo modelo estão em consonância com os pontos de ocorrência. Observa-se na Figura 1A há ocorrências dos pontos de validação concentrados na porção sudeste, com predomínio de alagamentos, associadas à presença do rio Sorocaba e predomínio de inundações na porção Leste. Na Figura 2B apresenta a classificação das áreas alagáveis e de inundação pelo modelo, verifica-se uma associação espacial entre as ocorrências do modelo e dos pontos de validação. Assim como a maioria das cidades brasileiras, Sorocaba cresceu no entorno do principal rio do município, o rio Sorocaba, que percorre grande e importante parte urbana do município (MANFREDINI et al., 2015). Contudo, ainda que seja uma realidade brasileira ela vem repleta de problemática socioambiental urbana decorrente da ocupação irregular das margens dos rios (SILVA; FERREIRA, 2018). O planejamento urbano das cidades deve sempre buscar preservar as áreas próximas aos rios, visto que são fontes de importantes serviços ecossistêmicos urbanos, tais como a regulação climática e o controle das cheias dos rios (RIBEIRO; BRAGA, 2019). A falta desse olhar para os recursos hídricos nos trouxe para essa realidade de constantes problemas relacionados a inundações urbanas.

Figura 1A – Pontos de alagamento e inundação; **B** – Modelo com áreas pontencias para alagamentos e inundação



A interface gráfica do APP desenvolvido na plataforma GEE (Figura 2), traz de forma fácil e gratuita a opção de selecionar o município de interesse e optar pela declividade e altura mais adequadas para a área urbana do seu município e assim, o modelo resulta na indicação de áreas potenciais para alagamentos e inundações. O APP fornece uma interatividade e um modelo customizável para cada realidade local, e pode ser acessado gratuitamente pela URL: <https://ee-mmartines.projects.earthengine.app/view/floodableareas>. Na escolha dos parâmetros deve-se considerar que a cota de alagamento seria a altura da superfície fluvial necessária para o extravasamento das águas. Na declividade de 90 graus, obtêm-se as áreas susceptíveis à alagamento por extravasamento do rio. Ao escolher baixas declividades, classifica-se as áreas susceptíveis a alagamento por escoamento superficial difuso que ocorre ao longo das ruas. Essas seriam áreas de atenção para a manutenção do sistema de escoamentos das águas pluviais. Neste caso, sugere-se iniciar o modelo com 1,15 graus (equivale a declividade de até 2%).

Figura 2 – Interface gráfica do APP de modelagem de áreas urbanas alagáveis e inundáveis.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo aqui desenvolvido para identificar áreas inundáveis e alagáveis nas áreas urbanas, através do desenvolvimento de aplicativo via computação em nuvem a partir de parâmetros customizáveis apresentou altos índices de acertos com os pontos de verdade terrestre (acima de 80%). Assim, foi gerado um modelo que permite a identificação de áreas críticas em zonas urbanas, oferecendo um instrumento valioso para apoiar o planejamento urbano sustentável e a tomada de decisões. No entanto, há espaço para avanços adicionais como a integração de dados climáticos e hidrológicos em modelos de previsão de inundação urbana, permitindo uma avaliação mais ampla dos riscos associados às mudanças climáticas. Além disso, pesquisas acerca da importância da infraestrutura verde na mitigação dos impactos das inundações e alagamentos urbanos, bem como, a valorização de abordagens interdisciplinares aplicadas ao planejamento urbano são possibilidades de avanços nesse campo de conhecimento.

Palavras-chave: Planejamento urbano; Inundações urbanas, Alagamentos, Modelagem computacional, Computação em Nuvem; Google Earth Engine.

REFERÊNCIAS

- BISHOP, C. M. Pattern recognition and machine learning. **Springer google schola**, v. 2, p. 1122-1128, 2006. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-45528-0>
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Portaria Conjunta nº 148**, de 18 de dezembro de 2013. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 24 dez. 2013. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=24/12/2013&jornal=1&pagina=58&totalArquivos=168>. Acesso em: 22 julho. 2022.
- COMARAZAMY, D. E. et al Quantification and mitigation of long-term impacts of urbanization and climate change in the tropical coastal city of San Juan, Puerto Rico. **International Journal of Low-Carbon Technologies**,10(1), 87-97, 2015. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt059>
- CONGALTON, R. G., & GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices** (2nd ed.). CRC Press, 2009.
- DOS SANTOS, F.A.A.; DA ROCHA, E.J.P. Alagamento e inundação em áreas urbanas. Estudo de caso: cidade de Belém. *Revista GeoAmazônia*, v. 1, n. 02, p. 33-55, 2014.
- EIGENBROD, F. et al. The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 278, n. 1722, p. 3201-3208, 2011. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.2754>
- GÜNERALP, B., et al. Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. **Global environmental change**, v. 31, p. 217-225, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.002>
- GÜRER, N., et al Evaluation on Living Public Spaces and Their Qualities - Case Study from Ankara Konur, Karanfil and Yüksel Streets, In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2017. p. 072038. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/245/7/072038>
- HANSEN, J E. et al Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, **Science**, v. 213, n. 4511, p. 957-966, 1981. <https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957>

- HAWKER, L. et al A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, 17(2), 024016, 2022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- HINTZ, W. D. Reconnecting floodplains. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 9, n. 8, p. 431-431, 2011. <https://doi.org/10.1890/11.wb.023>
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Carta de Uso Potencial da Terra do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981.
- JHA, A K. et al Five Feet High and Rising: Cities and Flooding in the 21st Century World Bank Policy Research Working Paper, n. 5648, 2011. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-5648>
- KONRAD, C P. Effects of Urban Development on Floods, 2003. <https://doi.org/10.3133/fs07603>
- LICCO, E. A.; MAC DOWELL, S. F. Alagamentos, Enchentes Enxurradas e Inundações: Digressões sobre seus impactos sócio econômicos e governança. **Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística**, v. 5, n. 3, p. 159-174, 2015.
- MANFREDINI, F. N. et al A história ambiental de Sorocaba. Sorocaba: **Unesp-Campus Experimental de Sorocaba**. 180p, 2015.
- MILLER, J D., HUTCHINS, M. The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.006>
- NOBRE, A. D. et al Height Above the Nearest Drainage a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, 404(1-2), 13-29, 2011 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- RAMACHANDRAN, A. et al Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian coastal city, **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 7783, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-438593>
- RENNÓ, C. D. et al. A new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, 112(9), 3469-3481, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- RIBEIRO, M. C., & BRAGA, R. Planejamento urbano e serviços ecossistêmicos: o caso dos rios urbanos no Brasil. Urbana: **Revista Eletrônica do Centro Interdisciplinar de Estudos sobre a Cidade**, 11(1), 56-75, 2019.
- SILVA, C. A., FERREIRA, L. C. Ocupação urbana irregular e impactos socioambientais: um estudo de caso sobre os rios urbanos em Belo Horizonte. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, 20(1), 87-106, 2018
- SILVA, M. A. B. et al Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife-PE. **RBRH**, v. 22, n. 00, p. e19, 2017 <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716040>
- SOUZA JR, C. M. et al Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, 12(17), 2735, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- STOTT, P A. et al Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change.. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v.7, n. 1, p. 23-41, 2016. <https://doi.org/10.1002/wcc.380>
- VESTENA, L.R.; et al Análise espacial e temporal da distribuição dos alagamentos e inundações na cidade de Guarapuava, Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 24923-24941, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-082>
- VICUÑA, S., ORMAZA, M. V. The utilization of green roofs and walls “ecosystem services” as a strategy to mitigate climate change. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, p. 012003, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1148/1/012003>
- YADAV, P K., DIWAKAR, S. Planning Interventions to Develop Blue Green Infrastructure on the Verge of Water Sensitivity: A Case of Lucknow, **Uttar Pradesh**, 2023. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-11807>
- NDA, M., et al. (2018). A Review on the Causes, Effects and Mitigation of Climate Changes on the Environmental Aspects. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 10, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.04.027>