



## Contribuição de Aspectos Naturais e Antropogênicos para Análise do Perigo à Inundação em Campinas-SP

### *Contribution of Natural and Anthropogenic Aspects for the Analysis of Flood Hazard in Campinas- SP*

Vinícius Marques Müller Pessôa<sup>1</sup>, Camila Frandi Cecagno<sup>2</sup>, Danilo Mangaba de Camargo<sup>3</sup> e Mara Lúcia Marques<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Fac. Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, Brasil. [vipessoa73@gmail.com](mailto:vipessoa73@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0757-7489>

<sup>2</sup> Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Fac. Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, Brasil. [camilacecagno@hotmail.com](mailto:camilacecagno@hotmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-9457>

<sup>3</sup> Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Lab. Geoprocessamento, Campinas, SP, Brasil. [danilo.mangaba@gmail.com](mailto:danilo.mangaba@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7971-1248>

<sup>4</sup> Pontifícia Universidade Católica de Campinas, CEATEC Fac. Geografia, Campinas, SP, Brasil. [marques.maralucia@gmail.com](mailto:marques.maralucia@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1478-565X>

Recebido: 06.2019 | Aceito: 08.2021

**Resumo:** As inundações são fenômenos naturais, que podem causar impacto ambiental conforme as alterações de cobertura e uso do solo, com a intensificação demográfica e crescimento urbano. Assim, o propósito deste estudo foi incluir a relação entre os sistemas naturais e antrópicos na elaboração dos modelos de análise do perigo à inundação. A partir de análise espacial foram gerados modelos de perigo à inundação, empregando o método de sobreposição ponderada e a análise pareada de critérios pelo Processo Analítico Hierárquico (AHP), considerando os parâmetros hipsometria, densidade, tipos de solos, densidade de drenagem, pluviometria, tipos de solos, cobertura vegetal original e uso e cobertura, nas datas 1975 e 2018. As classes de uso e cobertura do solo (urbano, agrícola, solo exposto, vegetação arbórea e rasteira, água e outros) foram obtidas pelo processo de classificação por regiões das imagens LANDSAT, utilizando o classificador por máxima verossimilhança. Observou-se alterações das classes Alto e Muito Alto, ao comparar as alterações entre os modelos de perigo natural e antropogênico à inundação de 1975 e de 2018, que passaram a ocupar 225,7km<sup>2</sup> (28,63%) e 26,59km<sup>2</sup> (3,37%) em 1975, e 260,97km<sup>2</sup> (33,09%) e 22,88km<sup>2</sup> (2,90%) em 2018. Destaca-se que as maiores alterações das áreas de perigo Alto foram observadas nas bacias do Rio Capivari de 34,3km<sup>2</sup> (1975) e 56,8km<sup>2</sup> (2018), Ribeirão Anhumas de 28,4km<sup>2</sup> (1975) e 35,4km<sup>2</sup> (2018), Ribeirão Quilombo de 14,1km<sup>2</sup> (1975) e 22,8km<sup>2</sup> (2018), e Rio Atibaia 20,6km<sup>2</sup> (1975) e 13,4km<sup>2</sup> (2018). Atribui-se a variação do perigo alto de inundação nessas bacias ao adensamento populacional e impermeabilização do solo, como consequência da expansão urbana em áreas de planícies fluviais, que alteram o escoamento e infiltração das águas superficiais.

**Palavras-chave:** Análise Espacial. Sistemas de Informação Geográfica. Bacias Hidrográficas. Sensoriamento Remoto.

**Abstract:** Floods are natural phenomena, which can cause environmental impact according to land cover and use changes, due to demographic intensification and urban growth. Therefore, this study aimed to include the relationship between natural and anthropogenic systems into the elaboration of models for the analysis of flood hazard. Flood hazard models were generated using weighted overlay method and multicriterial Analytic Hierarchy Process (AHP), considering the following parameters: elevation, drainage density, slope, rainfall, soils, natural vegetation cover and land use and land cover for the dates 1975 and 2018. The classes of land use and cover (urban, agricultural land, bare soil, arboreal cover, grasslands, water and others) were classified by region method from LANDSAT images and the maximum likelihood classifier. It was observed that High and Very High classes changed when natural and anthropogenic hazard floods models for 1975 and 2018 were compared regarding area extension, which growth to 225.7km<sup>2</sup> (28.63%) and 26.59km<sup>2</sup> (3.37%) in 1975, and 260.97km<sup>2</sup> (33.09%) and 22.88km<sup>2</sup> (2.90%) in 2018. These alterations for High hazard area were larger for the basins of Rio Capivari changing 34.3km<sup>2</sup> (1975) and 56.8km<sup>2</sup> (2018), Ribeirão Anhumas changing 28.4km<sup>2</sup> (1975) and 35.4km<sup>2</sup> (2018), Ribeirão Quilombo changing 14.1km<sup>2</sup> (1975) and 22.8km<sup>2</sup> (2018), and Rio Atibaia changing 20.6km<sup>2</sup> (1975) and 13.4km<sup>2</sup> (2018). The variation in the high risk of flooding in these basins is attributed to population density and soil impermeability as a result of urban expansion in areas of river plains, which alter the flow and infiltration of surface waters.

**Keywords:** Spatial Analysis. Geographic Information Systems. Hydrographic Basins. Remote Sensing.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização pode estar associado a problemas ambientais pela intervenção humana sobre o sistema natural. Nesse processo, a impermeabilização do solo pelo adensamento de áreas construídas tende a alterar a dinâmica natural do escoamento de águas superficiais, intensificando a ocorrência de áreas de inundações (AMARAL; RIBEIRO, 2009). As inundações são fenômenos naturais do sistema hidrológico, com impacto ambiental relativos às alterações de cobertura e uso do solo, intensificação demográfica e aglomeração urbano-industrial, cujo perigo traz por consequência distintas tendências locais dos agentes urbanos: desinteresse pela iminência do risco de perdas e interesse de ocupação pelos setores da sociedade com menor renda, devido à desvalorização destas áreas (BATHRELLOS et al., 2017).

Nas últimas décadas, as inundações têm ocorrido com maior frequência e magnitude, em praticamente todas as regiões do Brasil. Essa problemática ocorre, principalmente, em razão do processo de ocupação das margens de rios e impermeabilização do solo de bacias urbanas (HORA; GOMES, 2009). Conforme dados disponibilizados pelo EM-DAT (*International Disaster Database*), em 2018 ocorreram 119 desastres de eventos de inundação, que afetaram 34,25 milhões de pessoas e provocaram cerca de 2.832 mortes em todo o mundo (CRED, 2019). Perante esta realidade, tem-se discutido medidas preventivas e estratégias de planejamento que possam diminuir os impactos dos eventos de inundação, sendo o mapeamento das áreas de perigo ou susceptíveis à inundação, uma medida que contribui com a prevenção, controle e gestão das inundações (TUCCI; BERTONI, 2003; AMARAL; RIBEIRO, 2009).

A operacionalização da avaliação do perigo à inundação, considerando a dinâmica própria do sistema ambiental em associação à atividade humana, deve abordar o natural (fatores físicos) e o antropogênico (representado pelo uso e cobertura do solo), em constante interação (CHRISTOFOLETTI, 1999). No estudo realizado por Marques, Silva e Camargo (2017) empregou-se aspectos físicos ambientais (uso e cobertura do solo, declividade, altimetria e tipos de solos) e socioeconômicos (população, densidade demográfica, taxa de dependentes, taxa de responsáveis com renda baixa, taxa analfabetismo e IDHM) por setor censitário, para elaboração de um índice com o potencial de identificação da vulnerabilidade socioambiental à inundação do município de Campinas. Os autores observaram que há maior vulnerabilidade nas planícies fluviais, onde reside cerca de 60% da população do município (656 mil pessoas), com 64,31% desses residentes apresentando renda média entre um e dois salários mínimos.

Porém, a identificação das áreas de inundação requer que seja considerada a contribuição da densidade de drenagem e distribuição de chuvas, pois tornam o diagnóstico mais próximo à realidade (VILLELA; MATTOS, 1975; CHRISTOFOLETTI, 1979). Ao incluir tais parâmetros na elaboração dos modelos de perigo à inundação, bem como a comparação do potencial natural com o potencial emergente provocado pelas mudanças de uso e cobertura do solo, evidencia-se a suscetibilidade à inundação perante a relação entre os sistemas naturais e antrópicos, que possibilita melhor dimensionamento dos problemas associados às inundações e direcionamento das ações de planejamento territorial. Portanto, o presente estudo tem por objetivo analisar o perigo de inundação no município de Campinas – SP, empregando modelos cartográficos de perigo à inundação natural e antropogênicos nas datas de 1975 e 2018, fundamentando-se na abordagem e princípios da Ecodinâmica (TRICART, 1977), como também nos modelos de Fragilidades do Ambiente proposto por Ross (1994).

A estrutura do presente estudo foi delineada para atender a proposta de gerar modelos de avaliação do perigo à inundação, empregando a análise espacial. Primeiramente, elaborou-se uma base de dados cartográfica, que incluiu os parâmetros hipsometria, densidade, tipos de solos, densidade de drenagem, pluviometria, tipos de solos, cobertura vegetal original e uso e cobertura, nas datas 1975 e 2018. A partir desse conjunto de dados pode-se definir os mapas critérios de análise do perigo à inundação pelo método de sobreposição ponderada e a análise pareada de critérios pelo AHP. Dessa forma, o diagnóstico da suscetibilidade à inundação pode ser obtido pela integração das transformações do ambiente natural e das ações antrópicas entre diferentes cenários, que podem ser comparados para retratar a distribuição espacial do perigo à inundação.

## 2 GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO PERIGO DE INUNDAÇÃO

A análise empírica dos ambientes naturais e antropizados, baseada na abordagem espacial, é importante na realização de diagnósticos que contribuem para compreensão das relações da sociedade e natureza (ROSS, 1994; MENDONÇA, 2009). O emprego de modelos de análise espacial em Sistema de Informação Geográfica (SIG) possibilita caracterizar as atividades que intervêm na construção do espaço, sejam fenômenos antrópicos ou naturais (LONGLEY, 2000; TORRENS, 2001; MENDONÇA, 2004). Os modelos cartográficos consideram a representação de uma realidade espacial integrando fatores como a simultaneidade de correlação na análise temporal, a base de observação empírica e conjunção de análises qualitativas e quantitativas, considerando os elementos socioeconômicos como componentes do próprio sistema (MONTEIRO, 2001).

Kim e Newman (2019) propuseram um modelo cartográfico baseado em SIG e Redes Neurais para avaliar o risco de inundação associado ao crescimento urbano de Houston (USA) e Amsterdam (Holanda) e ao aumento do nível do mar, a partir do Modelo de Transformação Terrestre. Houston apresentou maior propensão a inundações de alto risco em comparação com Amsterdam, pois verificaram que na Holanda, a segurança contra as inundações é uma questão nacional, por ser um país que está abaixo do nível do mar. Assim, desde 1953, foi criado o Plano Delta em Amsterdam, que construiu uma série de anéis de represas, ou unidades geográficas delimitadas por estruturas de proteção contra inundações como diques e dunas. Por outro lado, em Houston, mesmo com a tomada de medidas como modificação de canais, detenção de águas pluviais, modificação de derivação e dique, houve ausência de um plano de zoneamento e adequação ao uso do solo, permitindo que a cidade crescesse sem restrição, concomitantemente ao impulsionamento do desenvolvimento urbano pelos setores privados e organizações empresariais que por consequência aumentou o risco de inundação, ocorrendo como medidas mitigadoras iniciativas do setor público em infraestrutura, como redes de destinação de efluentes, estradas, saúde, educação e parques.

Para elaboração de modelos ambientais, adotam-se métodos que possam reduzir a subjetividade na integração dos dados. Dentre os diversos métodos de integração e análise, os modelos multicritérios de auxílio à tomada de decisão ganham destaque, principalmente em contextos de planejamento e gestão ambiental (MEIRELLES et al., 2007). As técnicas multicritérios permitem análise conjunta de dados qualitativos e quantitativos que envolvem o processo decisório, buscando avaliar alternativas que auxiliam na proposição de um cenário ideal (KEENEY, 1992, GREGORY et al., 2005, KÖKSALAN; WALLENIUS; ZIONTS, 2013). Em geotecnologias essas técnicas estão associadas à integração de informações em SIG, principalmente envolvendo temáticas de conservação e recuperação ambiental (MALCZEWSKI, 2006; ALLAIN; PLUMECOCQ; LEENHARDT, 2017; ESMAIL; GENELETTI, 2017).

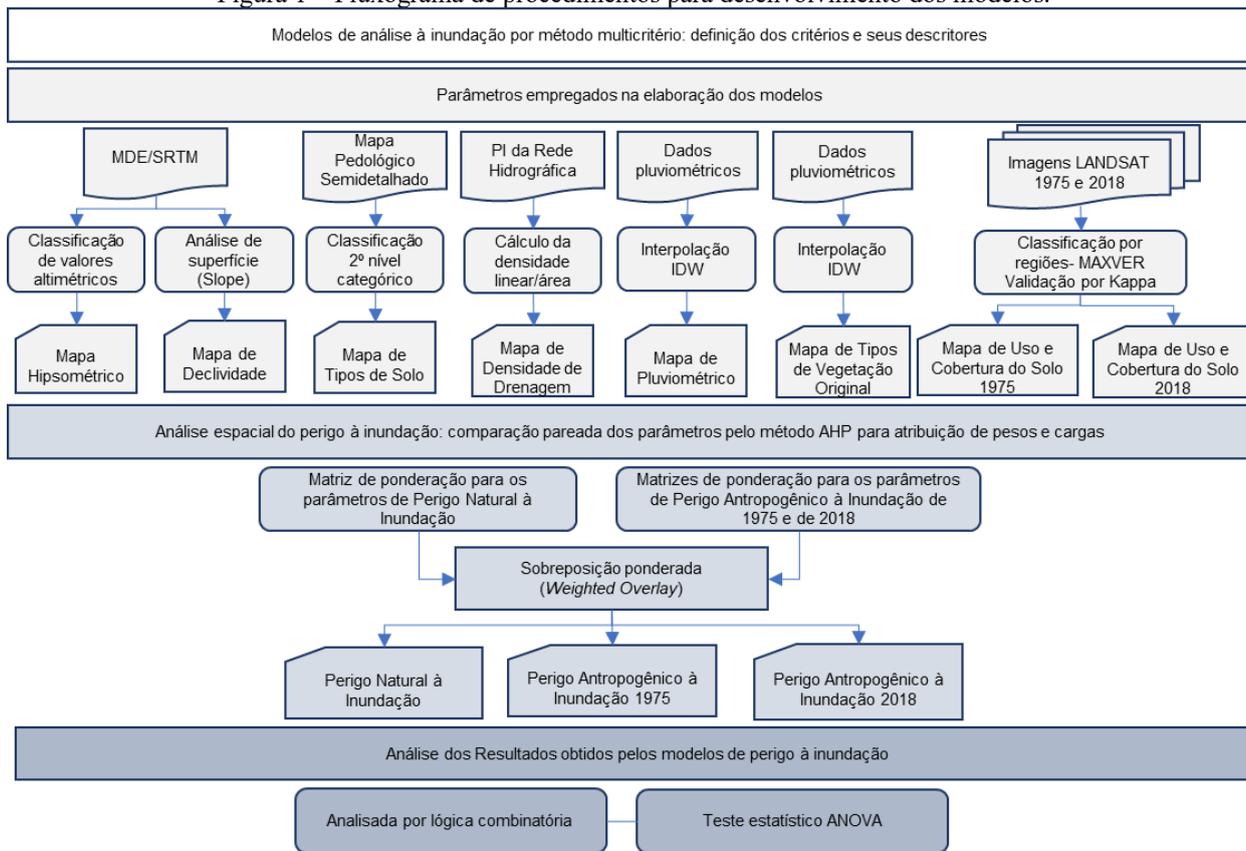
Um dos principais métodos para análise multicritério é o Processo de Hierarquia Analítica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), que consiste na elaboração de uma escala de importância entre os parâmetros analisados por comparação pareada, a partir dessa escala, uma matriz de comparação é gerada com a variação entre 1 a 9 para o grau de importância, com a seguinte escala: 1 - igual importância; 2 - importância igual a moderada; 3 - importância moderada; 4 - moderada a forte importância; 5 - forte importância; 6 - importância forte a muito forte; 7 - importância muito forte; 8 - importância muito a extremamente forte; e 9 - extrema importância (SAATY, 1990). Após atribuição desses valores, os autovalores e autovetores são calculados para ordenar a importância em um conjunto de critérios e um conjunto de alternativas segundo critérios e subcritérios, definindo a hierarquia (BERGER; SILVA; SALDANHA, 2007; MAGALHÃES et al., 2011).

## 3 MÉTODO

O método adotado no presente estudo estabelece o mapeamento exploratório dos dados pela abordagem da análise espacial, utilizando a sobreposição ponderada multicritério para a elaboração dos modelos cartográficos (UNWIN, 1981). Os procedimentos empregados para elaboração dos modelos de perigo natural e antropogênicos à inundação foram realizados no SIG ArcGIS – ESRI (2018), padronizando os produtos em escala 1:50.000, com a da resolução espacial em 10 m, baseando-se na proposta de Lu et al. (2010) para mapeamento multitemporal, e na determinação de escala sugerida por Boggione et al. (2009) para

produtos cartográficos obtidos por sensoriamento remoto. A organização das etapas para o desenvolvimento dos modelos está apresentada no fluxograma de procedimentos metodológicos (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma de procedimentos para desenvolvimento dos modelos.



Fonte: Os autores (2020).

### 3.1 Caracterização da área de estudo

No Brasil, o aumento da população urbana ocorreu no início do século XX, influenciado pelo crescente processo de industrialização e consequente intensificação da urbanização. A partir da década de 1930 o processo de urbanização aumenta em todo o país, a taxa de urbanização passou de 11,2%, para 36,2% em 1950 e para 45% em 1960 (COSTA, 1982; CORRÊA, 2001). Em 2010, a escala de urbanização dos municípios brasileiros alcançou o grau de 84,36% (MOURA; OLIVEIRA; PÊGO, 2018). O município de Campinas (Figura 2), objeto deste estudo, apresentou a partir de 1930 intenso processo de modernização dos setores industrial, devido à transferência de investimento do setor agrícola para o da construção civil, proporcionando a reestruturação da área urbana e se constituindo em um polo industrial e tecnológico de referência no estado de São Paulo, principalmente após a década de 1970 (IBGE, 2011). Porém, o parcelamento e melhorias de infraestrutura urbana concentraram-se no núcleo central, promovendo a valorização dessas áreas e, por consequência, o deslocamento da população para as áreas periféricas (BADARÓ, 1996). A cidade de Campinas atingiu 1.080.113 habitantes em 2010, sendo 98,3% residentes em áreas urbanas e apresentando uma densidade demográfica de 2.520 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2011).

O município encontra-se em uma área de contato entre duas unidades morfoestruturais, sendo a área majoritária inserida na Depressão Periférica Paulista, onde o relevo é suave, composto por colinas, planícies e terraços fluviais, embasado por rochas de origem sedimentar com ocorrência de intrusões magmáticas; e o setor leste no Planalto Atlântico, com predomínio de relevo composto por morros e morrotes, com substrato formado por rochas magmáticas e metamórficas (IPT; CPRM, 2014). As bacias dos rios Jaguari e Atibaia situam-se, predominantemente, no Planalto Atlântico e apresentam maior densidade de drenagem e menor densidade urbana em comparação com as demais do município. A Bacia do Ribeirão Anhumas está na zona de contato entre as duas províncias geomorfológicas, de modo que sua porção mais ao leste possui maior densidade urbana e de drenagem, já a porção oeste, em comparação, é relativamente menos densa. Na faixa

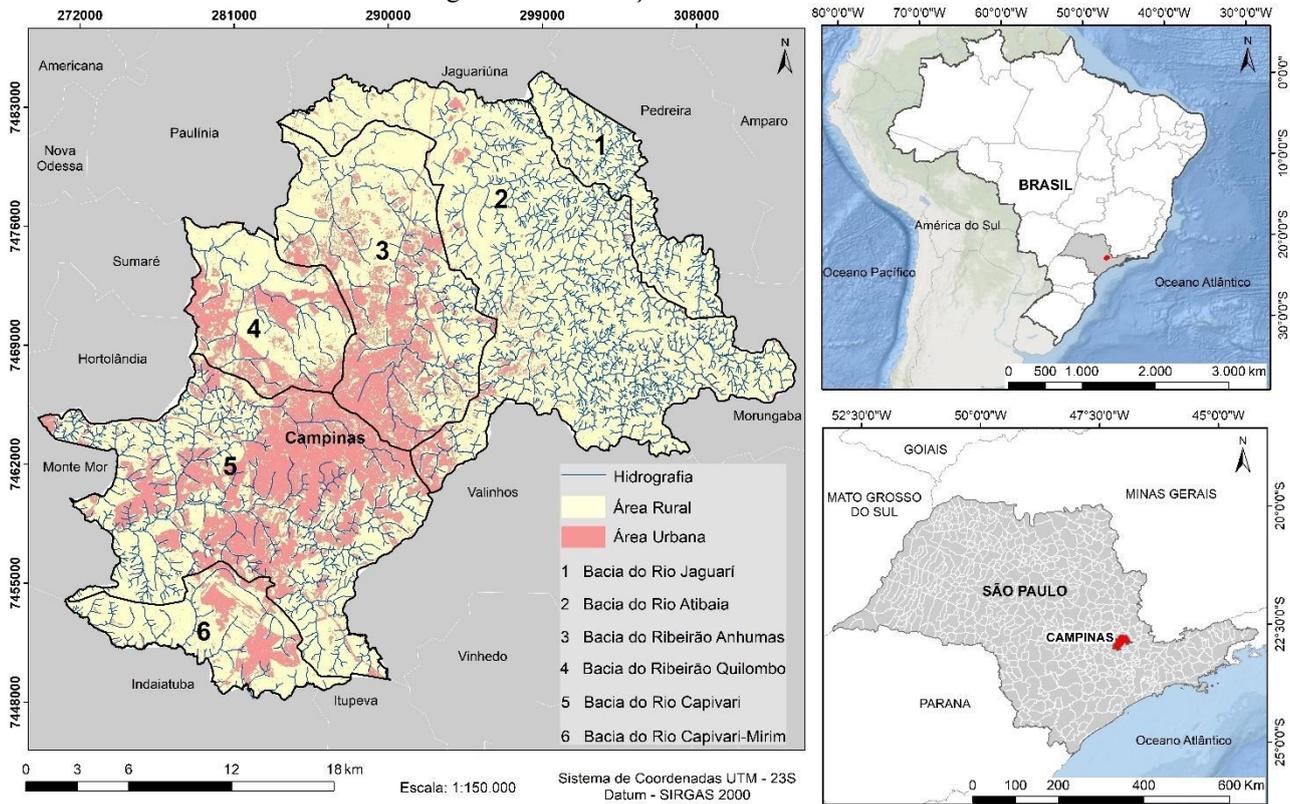
leste do município encontra-se a bacia do Ribeirão Quilombo, que está totalmente inserida na Depressão Periférica, é menos densa do ponto de vista da drenagem natural, todavia, apresenta alta concentração de áreas urbanas em faixas próximas ao núcleo central do município, bem como no eixo de conurbação com os municípios de Sumaré e Hortolândia. Na região sul do município, localizam-se as bacias dos Rios Capivari e Capivari-Mirim, a primeira tem maior densidade de ocupação urbana e de drenagem, possui uma pequena área no Planalto e sua maior porção inserida na zona da depressão. Por sua vez, a segunda está inteiramente na Depressão Periférica e apresenta menor densidade de drenagem (IG, 2009).

O tipo climático de Campinas é classificado como Cwa (clima subtropical de inverno seco e verão quente) de acordo com o sistema de Köppen, apresentando precipitação média anual de 1.424,5 mm (CEPAGRI, 2017). O município apresenta recorrentes eventos de inundação e um processo de ocupação do espaço urbano que, iniciou nos topos aplainados de colinas e morrotes e com a expansão urbana passou a ocupar as áreas de vertentes e várzeas fluviais (HOGAN et al., 2001).

Em Campinas, foi proposto em 2013 um plano municipal de saneamento básico para atendimento a Lei Federal (11.445/07), que define os serviços de saneamento básico, as infraestruturas e instalações operacionais do abastecimento de água potável; esgotamento sanitário; limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Nesse plano, o item que aborda o manejo das águas pluviais urbanas identifica e mapeia os pontos críticos de ocorrência de enchentes, inundações e alagamentos. A partir dessa identificação foram propostas metas de adequação da microdrenagem e macrodrenagem nos pontos críticos, como ampliação da fiscalização para prevenção e controle de ocupações em áreas irregulares (planícies de inundações, áreas de preservação permanente); fomento de projetos de arborização urbana, parques lineares e compensações ambientais referentes à recomposição florestal; implantação das medidas estruturais e não estruturais necessárias para prevenir e mitigar os impactos ambientais; como também elaborar o Plano Diretor de Drenagem Urbana (CAMPINAS, 2013).

O aumento da impermeabilização do solo, devido à expansão de adensamento urbano, se constitui em uma preocupação presente na gestão urbana de Campinas, desde os planos diretores 1996 e 2006, que apontavam o controle das inundações pelo estabelecimento de percentuais mínimos de áreas permeáveis. De fato, entre o período de 1958 a 2007, os episódios de eventos extremos de inundação foram excepcionais em 1970 e 1983, mantendo-se, relativamente estáveis nos demais momentos, que ocasionaram, principalmente, os impactos de alagamento de imóveis e vias, risco de desabamento e queda de árvores (CASTELLANO, 2010). Esses impactos foram atribuídos pelo autor ao crescimento populacional, afetando majoritariamente os extratos sociais de baixa renda. Em relação às medidas estruturais para minimizar os impactos da inundação a população, Castellano (2010) notou no plano diretor de 2006 propostas que envolveram: execução de obras nos sistemas de drenagem, a implantação de um programa de Combate a Enchentes, o constante desassoreamento e limpeza de cursos d'água, a substituição de galerias e a remoção e reassentamento de famílias ocupantes de áreas de risco.

Figura 2 – Localização da área de estudo.



Fonte: IBGE (2015).

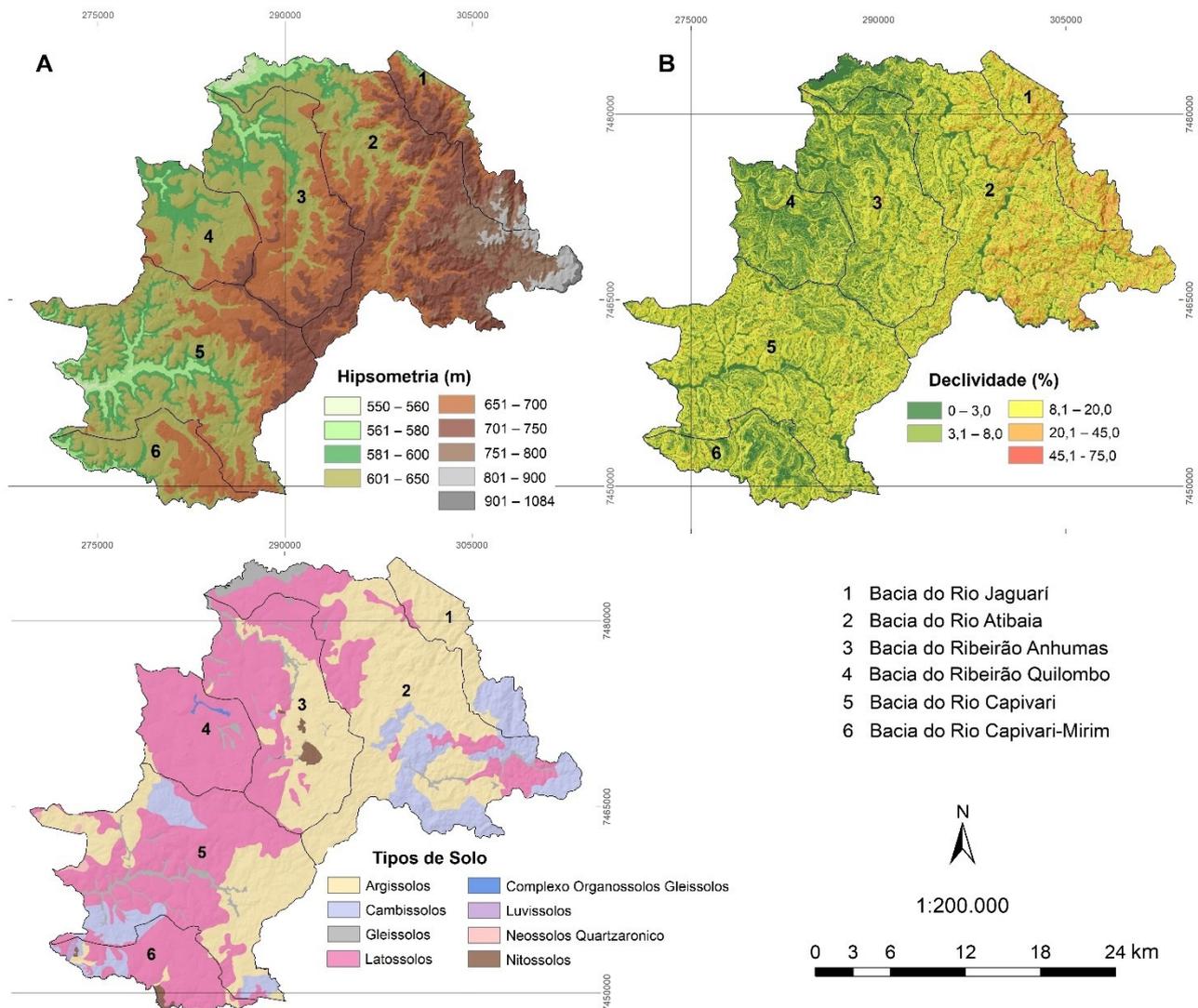
### 3.2 Parâmetros empregados na elaboração dos modelos de perigo à inundação

Para a elaboração dos modelos de perigo à inundação foi considerada a abordagem ecodinâmica na geração dos modelos cartográficos. Essa abordagem viabiliza a identificação de unidades espaciais com dinâmicas semelhantes, levando em consideração a fragilidade do meio físico e potencialidade para suportar intervenções, possibilitando definir riscos associados aos processos de uso e ocupação do solo (TRICART; KILIAN, 1979). Assim, foram definidos para esse estudo os parâmetros hipsometria, declividade, tipos de solos, densidade de drenagem, pluviometria, tipo de vegetação original e uso e cobertura do solo. A seleção desses parâmetros teve por intenção obter conhecimento das potencialidades do meio natural e antrópico, pois a identificação de fatores que influenciam na fragilidade à inundação, ou seja, que atuam de forma direta no escoamento de água superficial e podem interferir no acúmulo de água e, conseqüentemente, provocar um evento de inundação (ROSS, 1994; AMARAL; RIBEIRO, 2009).

#### 3.2.1 MAPA HIPSOMÉTRICO E MAPA DE DECLIVIDADE

Os parâmetros hipsometria e declividade do município de Campinas (Figura 3) foram obtidos empregando o Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução de 30m. Os valores de altimetria apresentados em cada célula da imagem do MDE foram classificados em intervalos de 09 classes: 550 – 560 m; 561 – 580 m; 581 – 600 m; 601 – 650 m; 651 – 700 m; 701 – 750 m; 751 – 800 m; 801 – 900m; 901 – 1084 m.

Figura 3 – Parâmetros empregados nos modelos de perigo à inundação: (A) Mapa Hipsométrico; (B) Mapa de Declividade e (C) Mapa de Tipos de Solo.



Fonte: Shuttle Radar Topography of Mission (2015); Valladares, Coelho, Chiba (2008).

O mapa de declividade foi gerado pela ferramenta *Slope* no ArcGIS, que aplica o algoritmo de cálculo de declividade em cada janela de nove células do MDE, sendo os valores altimétricos das oito células adjacentes à célula central empregados na razão entre equidistância vertical e a variação de distância horizontal, determinando o valor de declividade da célula central (BURROUGH; MCDONNELL, 1998). A imagem de declividade resultante foi classificada em 05 classes: 0 a 3,0%, 3,1 a 8%; 8,1 a 20,0%; 20,1 a 45,0% e 45,1 a 75,0%, conforme proposta elaborada por Santos et al. (2018) para estudos e mapeamentos referentes ao uso do solo, que foi considerada no presente estudo aquela que melhor se ajustou à análise de áreas com baixa declividade, como são as planícies fluviais. Os mapas temáticos hipsométrico e de declividade foram, em seguida, reamostrados para resolução espacial de 10 m.

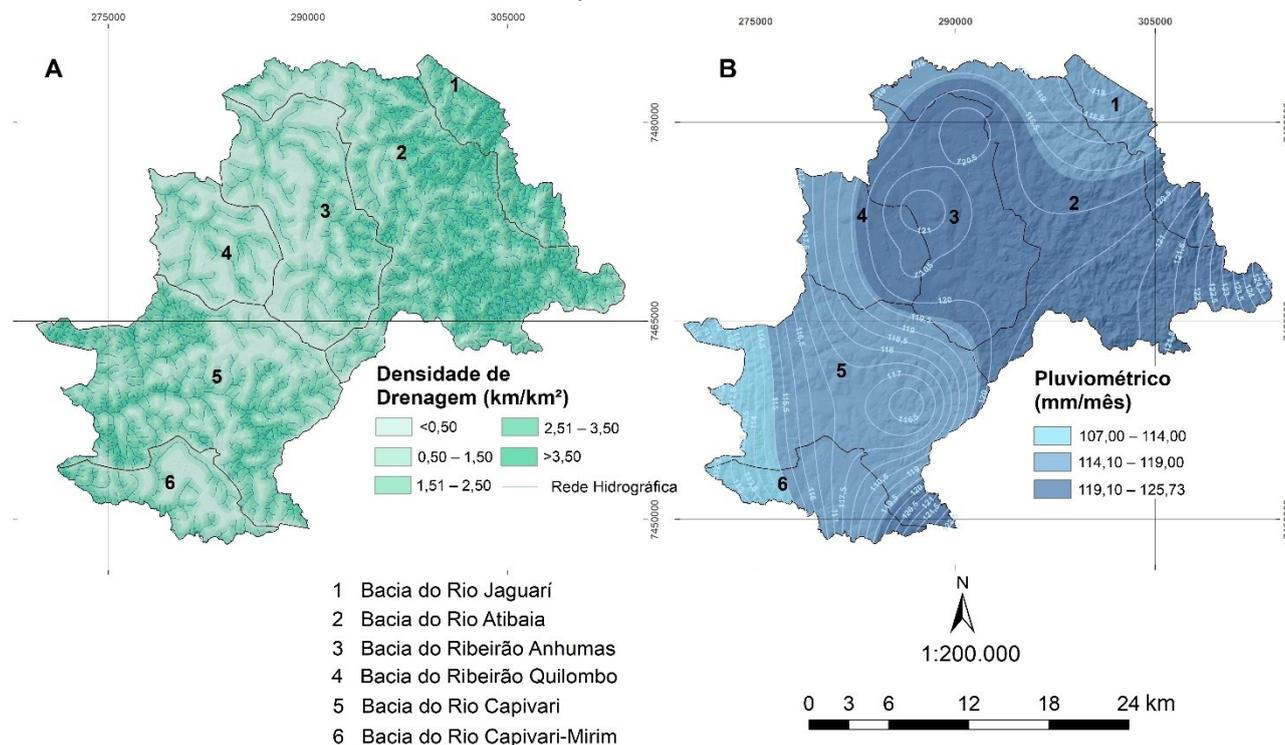
### 3.2.2 MAPA DE TIPOS DE SOLO

O mapa de tipos de solo foi obtido por digitalização e reclassificação das feições do Mapa Pedológico Semidetalhado do município de Campinas, na escala 1:50.000 (VALLADARES; COELHO; CHIBA, 2008). Para a reclassificação adotou-se o segundo nível categórico do sistema brasileiro de classificação de solos, proposto por Santos et al. (2018). Também, foi realizada a adaptação da nomenclatura ao sistema mundial de solos, resultando nas classes: Argissolos; Cambissolos; Gleissolos; Complexos Organossolos/ Gleissolos; Latossolos; Luvissolos; Neossolos Quartzarônico e Nitossolos. Posteriormente, o plano de informação vetorial foi rasterizado em resolução espacial de 10m (Figura 3).

### 3.2.3 MAPA DE DENSIDADE DE DRENAGEM

O plano de informação da rede hidrográfica foi obtido no site da Agência Nacional das Águas (ANA, 2018), na escala 1:50.000. A partir desse plano de informação, o método de densidade linear por unidade de área foi utilizado para realizar a razão entre o somatório da extensão de toda a rede hidrográfica e a área do município. Por esse método obteve-se a densidade de extensão de drenagem a cada quilômetro quadrado, em uma resolução espacial de 10 m. Esses valores de densidade de drenagem foram classificados em intervalos de <math><0,50 \text{ km/km}^2</math>; <math>0,50 - 1,50 \text{ km/km}^2</math>; <math>1,51 - 2,50 \text{ km/km}^2</math>; <math>2,51 - 3,50 \text{ km/km}^2</math> e <math>>3,50 \text{ km/km}^2</math>, conforme proposta de Villela e Mattos (1975) para mapas de densidade de drenagem (Figura 4).

Figura 4 – Parâmetros empregados nos modelos de perigo à inundação: (A) Mapa de Densidade de Drenagem e (B) Mapa Pluviométrico.



Fonte: ANA (2018); DAEE (2018).

### 3.2.4 MAPA PLUVIOMÉTRICO

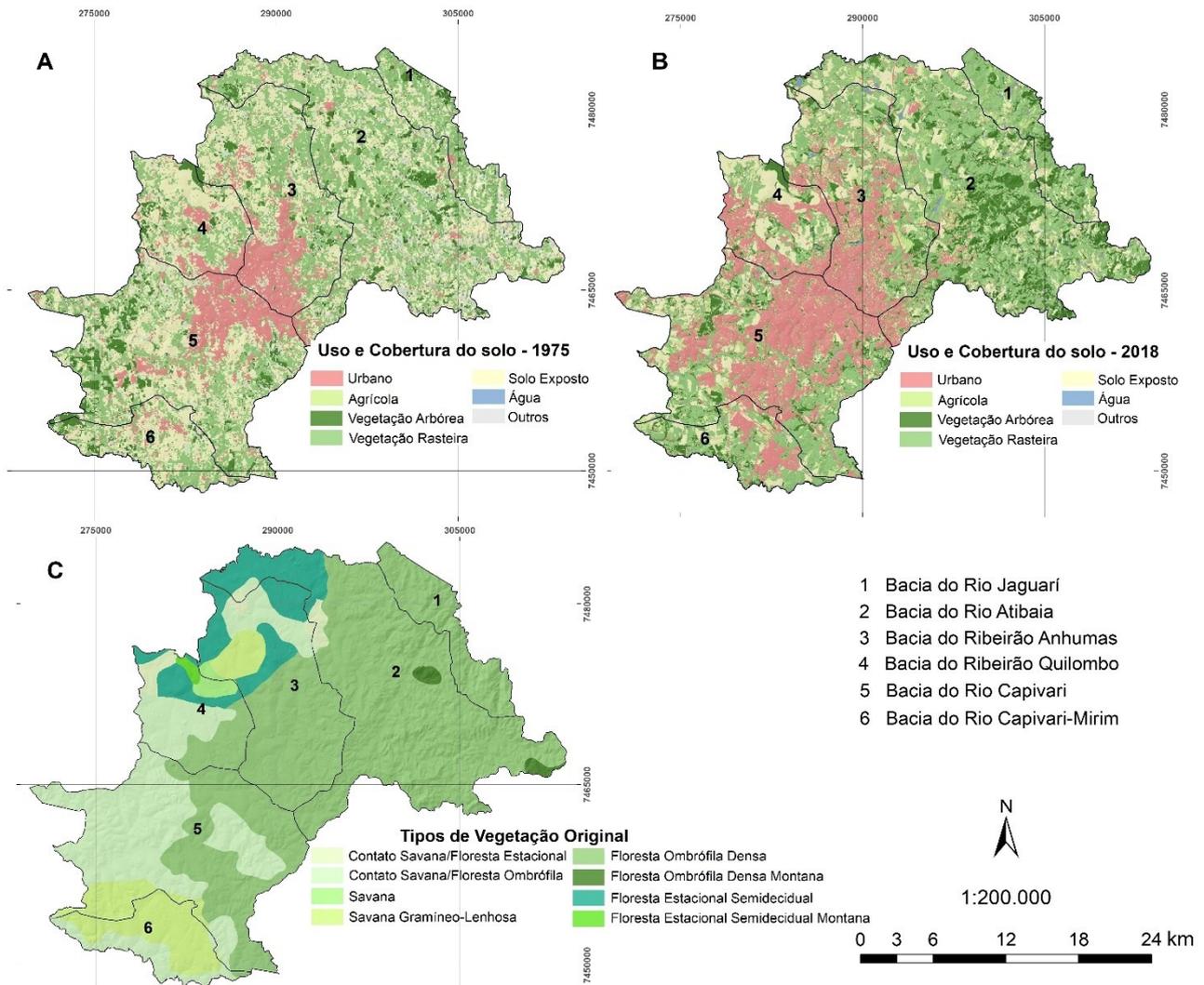
Os dados pluviométricos foram levantados na base de informações do DAEE (2018). Selecionou-se 16 postos hidrológicos da região metropolitana de Campinas que continham séries de dados do volume mensal de chuva correspondente ao período entre 1970-2017. A partir do volume mensal determinou-se a média anual de precipitação e, assim, obteve-se 47 valores de médias no período. Então, pode-se definir um valor de média de precipitação por posto hidrológico. Em seguida, os valores das médias anuais de precipitação foram espacializados e interpolados pelo método do Inverso da Distância Ponderada (IDW), gerando uma superfície de distribuição pluviométrica, com resolução espacial de 10m. Para melhor parametrização adotou-se o método quartil que definiu as classes de pluviometria em: 107,00–114,00 mm/mês; 114,10–119,00 mm/mês e 119,10–125,73 mm/mês (Figura 4).

### 3.2.5 MAPA DE TIPOS DE VEGETAÇÃO ORIGINAL

O mapa dos tipos de vegetação original do município de Campinas, foi adquirido a partir do recorte espacial da área de estudo sobre o plano de informação do mapa nacional de vegetação produzido pelo Projeto RADAMBRASIL, na escala 1:250.000 (BRASIL, 1983). A classificação do mesmo seguiu a proposta de Veloso, Rangel-Filho e Lima (1991), apresentando as classes: Contato Savana/Floresta Estacional; Contato Savana/Floresta Ombrófila; Floresta Estacional Semidecidual; Floresta Estacional Semidecidual Montana;

Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Densa Montana; Savana e Savana Gramíneo-Lenhosa. Em seguida, o plano de informação vetorial foi rasterizado em resolução espacial de 10m (Figura 5).

Figura 5 – Parâmetros empregados nos modelos de perigo à inundação: (A) Mapa de Uso e Cobertura do Solo – 1975; (B) Mapa de Uso e Cobertura do Solo – 2018 e (C) Mapa de Tipos de Vegetação Original.



Fonte: INPE (2018); Brasil (1983).

### 3.2.6 MAPAS DE USO E COBERTURA DO SOLO DE 1975 E DE 2018

Para análise e mapeamento dos contextos de ocupação territorial de 1975 e 2018, foram elaborados os mapas de uso e cobertura do solo do município, pela classificação digital das imagens orbitais do sistema LANDSAT- MSS (*Multispectral Scanner*) adquirida em 27/maio/1975, com resolução espacial de 80 m e LANDSAT – 8 OLI (*Operational Land Imager*), de 08/agosto/2018, com resolução espacial de 30 m (INPE, 2018). Inicialmente, foram realizados os processamentos de realce de imagem e georreferenciamento. Posteriormente, as classes de uso do solo: urbano, agrícola, solo exposto, vegetação arbórea, vegetação rasteira, água e outros, foram definidas pela foto-análise, considerando a diferença de resolução espacial das imagens e o sistema de classificação para cobertura e uso da terra do IBGE (2013), que define o nível de detalhamento de acordo com a escala de análise. Em seguida, o processamento de segmentação por crescimento de regiões foi aplicado para cada imagem (1975 e 2018), atribuindo os valores aos parâmetros: similaridade 20; área 2; tamanho 1, sendo o limiar de área em unidade de pixel. Sobre a imagem segmentada foram identificadas amostras de treinamento para cada classe, em seguida, o algoritmo de máxima verossimilhança (MaxVer) foi aplicado para classificação das imagens, em função dos atributos espectrais (tonalidade e média) e espaciais (compacidade e forma) dos segmentos (JENSEN, 1982; MENESES; ALMEIDA, 2012). Os resultados das classificações foram validados pela análise da matriz de confusão e índice Kappa, a partir de 1000 amostras de referência para cada classe, verificadas na ortofoto do município (CAMPINAS, 2018), por método aleatório

estratificado (CONGALTON; GREEN, 2009). As matrizes de confusão e coeficientes Kappa validaram a classificação, obtendo os valores de acerto geral 94% e Kappa 0,92, para 1975 e acerto geral 92% e Kappa 0,91, para 2018. Após a validação das classificações, realizou-se a reamostragem dos mapas temáticos de uso e cobertura do solo de 1975 e 2018 para uma resolução espacial de 10m (Figura 5).

### 3.3 Análise espacial do perigo à inundação

Na elaboração dos modelos de Perigo Natural à Inundação e de Perigo Antropogênico à Inundação em 1975 e em 2018 utilizou-se o método de sobreposição ponderada (*Weighted Overlay*) para a integração dos parâmetros que foram ponderados pelo Processo Analítico Hierárquico – AHP. As matrizes de ponderação para os parâmetros utilizados em cada modelo de análise de perigo à inundação foram produzidas pelo AHP, conforme a relação de importância pareada. Nessas matrizes, os pesos, de cada parâmetro, resultaram da atribuição de valores de preferência por julgamento pareado, baseando-se na ordem de importância e proeminência entre os parâmetros ou critérios: mapa de declividade (C1); mapa de tipo de vegetação original (C2-VO); mapa de uso e cobertura do solo (C2-US); mapa pluviométrico (C3); mapa de densidade de drenagem (C4); mapa de tipos de solo (C5); e mapa hipsométrico (C6), segundo as características físicas e ambientais descritas por Ross (1994), Amaral e Ribeiro (2009) e Kanani-Sadat et al. (2019), conforme comparação de importância apresentada na Tabela 1. Para diminuir o grau de subjetividade na atribuição destes pesos na mensuração do perigo à inundação natural e antropogênicos, adotou-se matrizes com índice de consistência menor que 0,10, considerado pelo AHP como um limiar confiável de tolerância de inconsistências (SAATY, 1990).

Tabela 1 – Ponderação por importância pareada.

Critério	Matriz comparação do Modelo Perigo Natural à Inundação Natural						Critério	Matriz comparação dos Modelos de Perigo Antropogênico à Inundação de 1975 e de 2018					
	C1	C2-VO	C3	C4	C5	C6		C1	C2-US	C3	C4	C5	C6
C1	1	3	3	4	5	6	C1	1	2	2	3	5	6
C2	1/3	1	2	2	4	5	C2	1/2	1	2	3	4	5
C3	1/3	1/2	1	3	5	7	C3	1/2	1/2	1	3	5	7
C4	1/4	1/2	1/3	1	3	4	C4	1/3	1/3	1/3	1	2	3
C5	1/5	1/4	1/5	1/3	1	2	C5	1/5	1/4	1/5	1/2	1	2
C6	1/6	1/5	1/7	1/4	1/2	1	C6	1/6	1/5	1/7	1/3	1/2	1
Índice de consistência 0,08.							Índice de consistência 0,04.						

Fonte: Os autores (2020).

As classes de cada parâmetro foram categorizadas por valores de carga entre 1 e 10, de acordo com sua relevância para ocorrência do evento de inundação, estabelecendo o nível 10 como importância máxima (Quadro 1). Os níveis de carga foram atribuídos de acordo as propriedades físicas inerentes a cada variável, que pode contribuir com a maior ou menor ocorrência do evento de inundação, levando em consideração a textura e granulometria dos tipos solo, a inclinação do terreno, capacidade de escoamento e impermeabilização do solo (TUCCI, 2007; IBGE, 2007, SANTOS et al., 2018). Após a definição de pesos e cargas, realizou-se sobreposição ponderada, pela ferramenta *Weighted Overlay* no ArcGIS, para a integração dos mapas e modelagem do perigo natural e do perigo antropogênico para 1975 e 2018. Em cada um dos modelos gerados, o perigo à inundação foi classificado em cinco intervalos pelo método quantil: Muito Baixo (1-3); Baixo (3,1-4,0); Moderado (4,1-6,0); Alto (6,1-7,0) e Muito Alto (7,1-10,0).

### 3.4 Análise dos resultados obtidos pelos modelos de perigo à inundação

A validação do perigo à inundação foi realizada pela comparação da localização dos pontos críticos de alagamento/inundação monitorados pela prefeitura de Campinas, desde 2014 (CAMPINAS, 2018), com as classes de ocorrência de inundação identificadas no modelo antropogênico de 2018. A coincidência espacial entre pontos críticos e as classes de perigo à inundação foi analisada empregando-se lógica combinatória por operador *OR*. O teste estatístico ANOVA (duas entradas e medidas repetidas, por bacia hidrográfica e por modelo de perigo à inundação) foi aplicado para comparar o efeito das alterações do uso e cobertura do solo apresentado pelos modelos de perigo à inundação (natural, antropogênico de 1975 e de 2018) sobre as médias de áreas (em percentual) para cada classe de perigo à inundação (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito

alto), por bacia hidrográfica do município.

Quadro 1 – Pesos e cargas para os modelos de perigo à inundação.

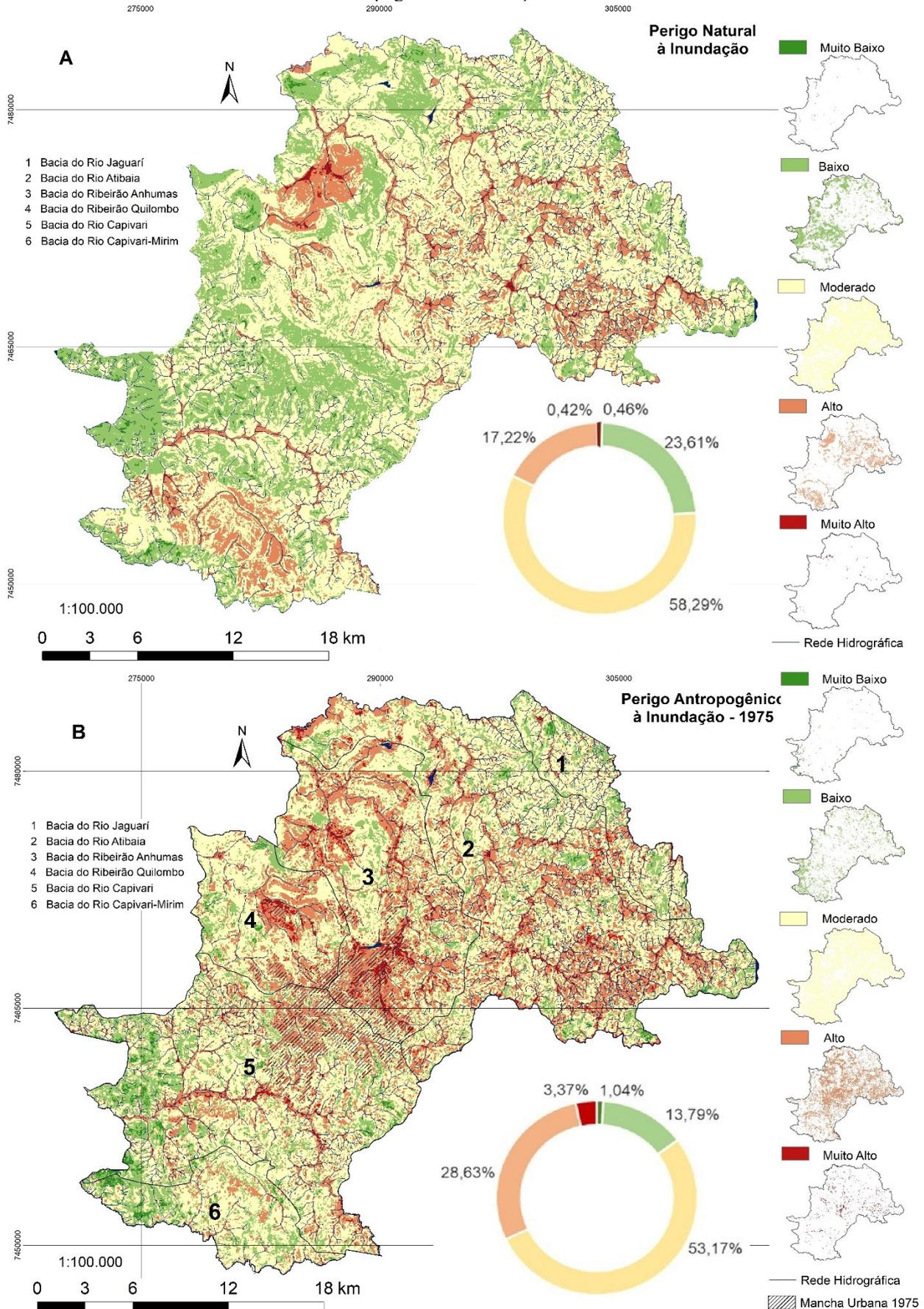
Parâmetros/Variáveis		Perigo Natural	Perigo Antropogênico 1975	Perigo Antropogênico 2018			
Mapa Hipsométrico (m)		Peso	Peso	Peso			
550 – 560	8	0,037	0,039	0,039			
561 – 580	7						
581 – 600	6						
601 – 650	6						
651 – 700	5						
701 – 750	5						
751 – 800	4						
801 – 900	2						
901 – 1084	2	Mapa de Densidade de Drenagem (km/km <sup>2</sup> )					
<0,50	2	0,111	0,099	0,099			
0,50 – 1,50	4						
1,51 – 2,50	6						
2,51 – 3,50	8						
>3,50	10				Mapa de Declividade (%)		
0 – 3,0	10	0,388	0,334	0,334			
3,1 – 8,0	9						
8,1 – 20,0	7						
20,1 – 45,0	5						
45,1 – 75,0	3				Mapa de Tipos de Solo		
Argissolos	6	0,055	0,059	0,059			
Cambissolos	3						
Gleissolos	10						
Complexo Organossolos Gleissolos	10						
Latossolos	5						
Luvissolos	7						
Neossolos Quartzar�nico	2						
Nitossolos	6				Mapa Pluviométrico (mm/mês)		
107,00 – 114,00	2	0,204	0,222	0,222			
114,10 – 119,00	4						
119,10 – 125,73	6				Mapa de Cobertura Vegetal Original		
Contato Savana/Floresta Estacional	4	0,206	—	—			
Contato Savana/Floresta Ombrófila	4						
Floresta Estacional Semidecidual	2						
Floresta Estacional Semidecidual Montana	2						
Floresta Ombrófila Densa	1						
Floresta Ombrófila Densa Montana	1						
Savana	10						
Savana Gram�neo-Lenhosa	9				Mapa de Uso e Cobertura do Solo		
Urbano	9				—	0,247	0,247
Agrícola	7						
Solo Exposto	6						
Vegeta�o Arb�rea	2						
Vegeta�o Rasteira	5						
�gua	10						
Outros	5						

Fonte: Os autores (2020).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelos modelos de Perigo Natural   Inunda o, Perigo Antropog nicos   Inunda o - 1975 e Perigo Antropogênico   Inunda o - 2018 permitiram avaliar a distribui o da suscetibilidade   inunda o, considerando as características naturais e antrópicas do município, como ilustram as Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Modelos de Perigo à inunda o (A) Mapa de Perigo Natural   Inunda o e (B) Mapa de Perigo Antropogênico   Inunda o – 1975.

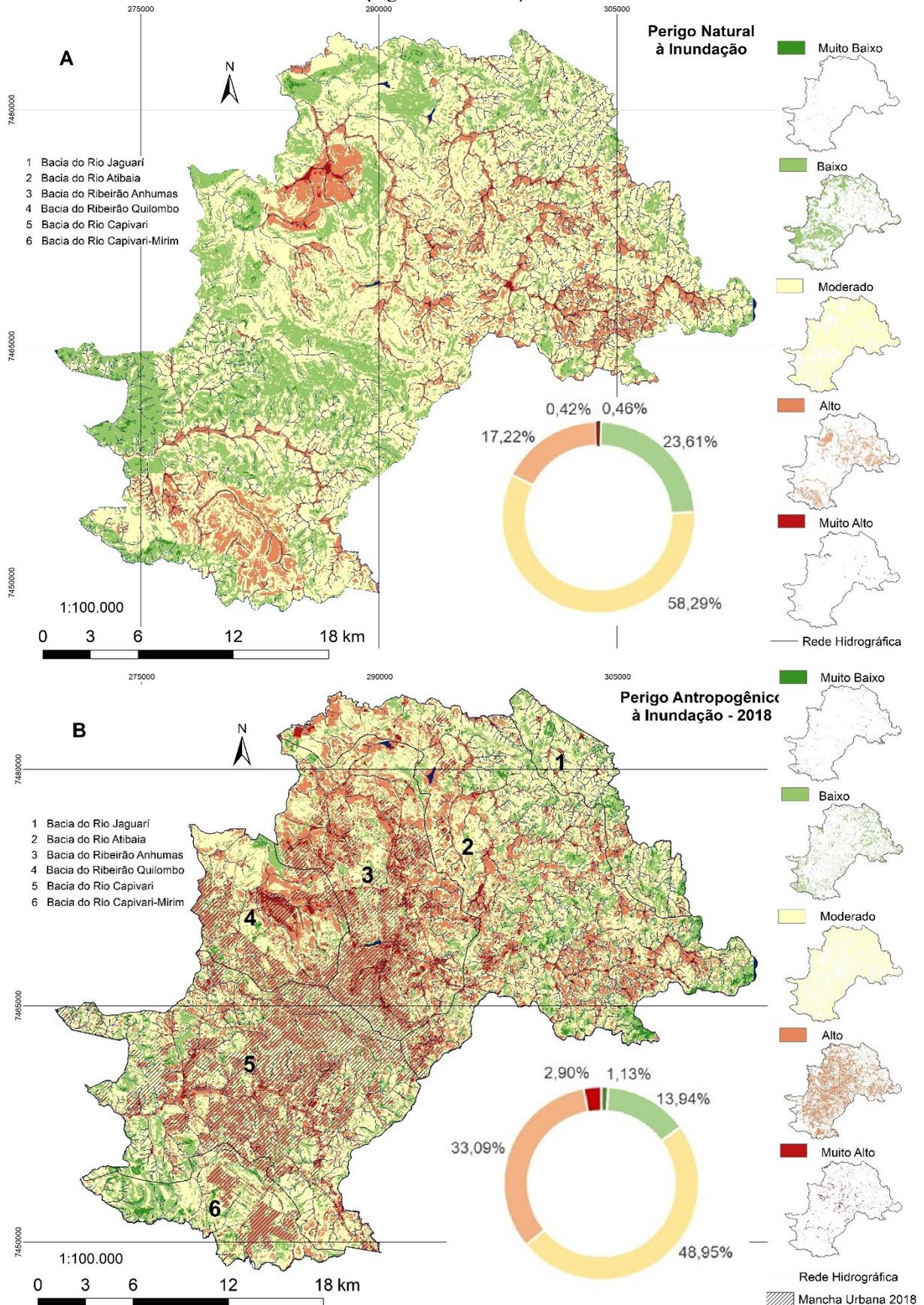


Fonte: Os autores (2020)

Observa-se, no Painel A de cada figura que 189,85 km<sup>2</sup> (24,07%) do município apresentam perigo natural   inunda o classificado como Muito Baixo e Baixo. Cerca de 459,80 km<sup>2</sup> (58,29%) da área do

município obteve a classificação de perigo Moderado, sendo a área de 139,12 km<sup>2</sup> (17,64%) classificada em Alto e Muito Alto perigo. Dentre essas classes, o perigo Moderado predomina em relação às demais ( $F=82,3$   $p<0,001$ ), ao comparar com as classes Muito Baixo, Baixo, Alto e Muito Alto.

Figura 7 – Modelos de Perigo à inundação (A) Mapa de Perigo Natural   Inundação e (B) Mapa de Perigo Antropogênico   Inundação – 2018.



Fonte: Os autores (2020).

Em relação aos modelos de Perigo Antropogênico à Inundação – 1975 (Figura 6, Painel B) e Perigo Antropogênico à Inundação – 2018 (Figura 7, Painel B), verificou-se variação espacial da distribuição das áreas potenciais à inundação, como também, a extensão de área sujeita a ocorrência de inundação no município. Pela comparação dos resultados obtidos nesses modelos antropogênicos com o Perigo Natural à Inundação, destacam-se as alterações das classes Alto e Muito Alto, que passaram a apresentar maior ocorrência de perigo. Tais alterações foram verificadas com o aumento das áreas de perigo Alto ( $F=2,4$   $p=0,198$ ) e Muito Alto ( $F=4,03$   $p=0,019$ ) à inundação, que passaram a ocupar 225,7 km<sup>2</sup> (28,63%) e 26,59 km<sup>2</sup> (3,37%), no modelo de 1975; e 260,97 km<sup>2</sup> (33,09%) e 22,88 km<sup>2</sup> (2,90%) no modelo de 2018, cujo aumento das classes Alto e Muito Alto apresentou significância estatística de  $p=0,047$  e  $p=0,039$ . Observou-se, também uma tendência de redução do perigo Baixo nos modelos antropogênicos de perigo à inundação de 1975 e de 2018, que passaram a apresentar valores correspondentes à 13,79% (108,73 km<sup>2</sup>) e 13,94% (109,92 km<sup>2</sup>), com significância de  $p=0,114$  e  $p=0,116$ .

A variação da configuração das áreas de inundação pode ser entendida pelo processo de urbanização de Campinas, que passou por um período de intensa expansão, principalmente a partir de 1970, devido ao desenvolvimento industrial e crescimento populacional da cidade, que possuía 375.864 habitantes em 1970, passando para 1.194.094 habitantes, em 2018 (IBGE, 2018). Além do adensamento populacional, a análise multitemporal do uso e cobertura do solo do município identificou um considerável aumento da área urbanizada de aproximadamente 99,72 km<sup>2</sup>, em 1975, para 191,03 km<sup>2</sup>, em 2018. Esse aumento, se deve ao processo de crescimento horizontal da área urbana e, portanto, o aumento de área impermeabilizada, considerando que a cobertura da superfície por materiais como concreto, asfalto ou edificações impedem a infiltração de água no solo, promovendo o aumento de água nos esgotos pluviais e, eventualmente, nos principais sistemas de drenagem. Como evidenciado nos resultados obtidos, o processo de urbanização e consequentes mudanças na cobertura do solo alteram a relação de escoamento e infiltração das águas superficiais. Essa observação está de acordo com Nelson (2018), cujo estudo indicou que a urbanização extensiva também diminui o tempo de latência e aumenta ainda mais a descarga de pico, levando a uma maior incidência de inundações repentinas.

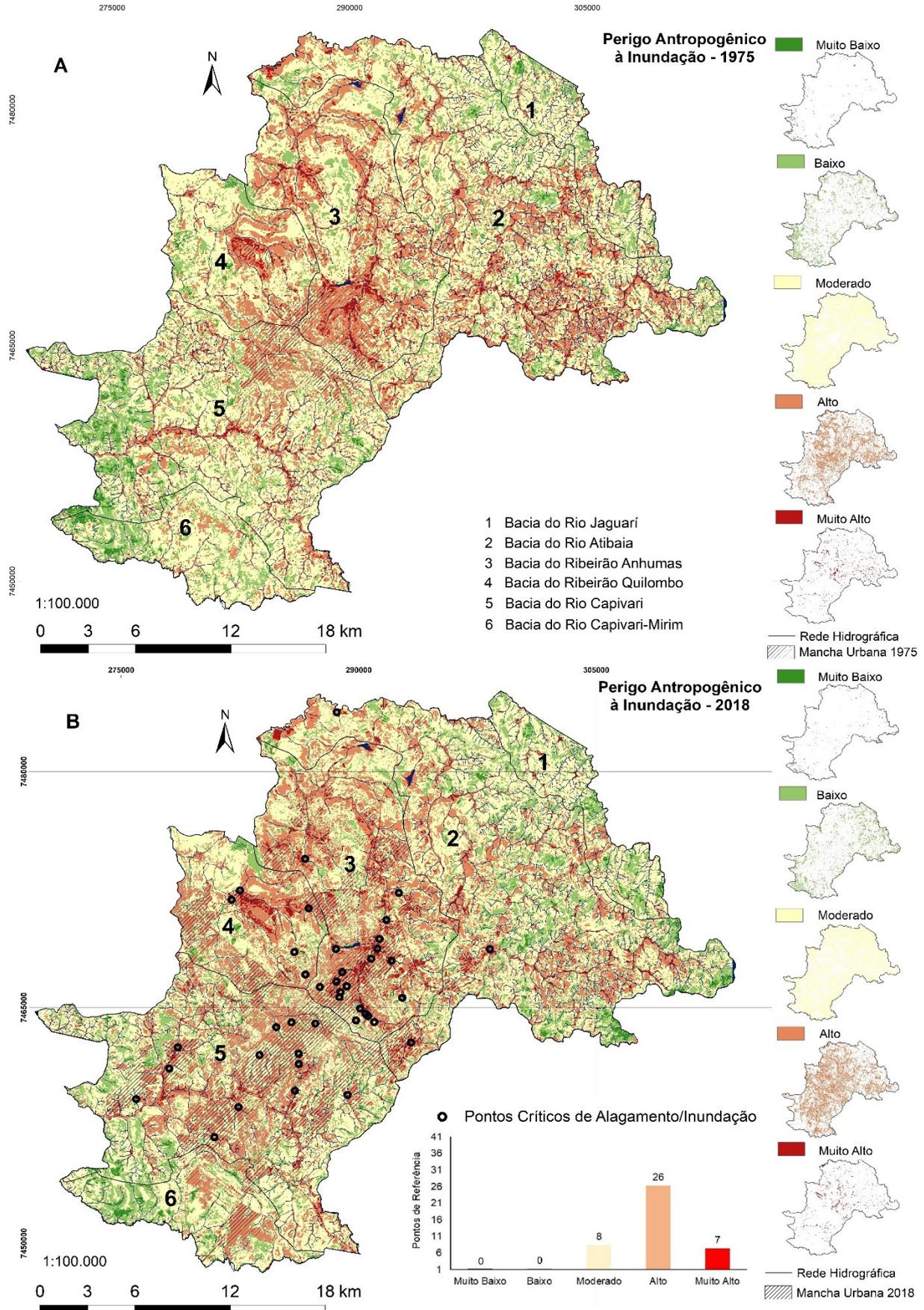
A partir da identificação de cinco classes de perigo à inundação, os parâmetros de entrada dos modelos mostraram-se suficientes para estratificar o perigo e observar os extremos de sua ocorrência. As classes de perigo Muito Baixo e Muito Alto não apresentaram diferença entre si no modelo de Perigo Natural ( $p=0,961$ ) e modelos de Perigo Antropogênico de 1975 ( $p=0,633$ ) e de 2018 ( $p=0,786$ ). Porém, essas classes extremas diferenciam-se, significativamente, das demais com  $p<0,01$  para todos os modelos. As características geográficas que elevam o perigo à inundação se constituem em áreas planas, com densidades altas de drenagem e de pluviometria, assim como maior percentual de solo impermeabilizado (TUCCI, 2007; NELSON, 2018).

Adicionalmente, as áreas classificadas como perigo Alto e Muito Alto coincidiram com cerca de 80,49% do total de 41 pontos críticos de alagamento/inundação disponíveis pela prefeitura do município. A Figura 8 (Painel B) apresenta os resultados obtidos pela comparação entre modelo Antropogênico à Inundação – 2018 com esses pontos críticos, validando a estratificação realizada para as classes perigo e assegurando a confiabilidade no método de modelagem. Ao considerar a validade dos modelos de análise do perigo à inundação, destaca-se ainda a implementação dos planos de informação de densidade de drenagem, pluviometria e cobertura vegetal original que podem explicar a elevação do potencial dos modelos em identificar as áreas críticas de perigo à inundação, quando comparada a proposta de Marques, Silva e Camargo (2017). Esses autores demonstraram uma precisão de 68%, para áreas classificadas como de alto e médio alto risco potencial à inundação, enquanto que no presente estudo o potencial de identificação do perigo aumentou em 17,9%, considerando apenas áreas classificadas como Alto e Muito Alto perigo à inundação.

Ao analisar as alterações das classes de perigo à inundação por bacias hidrográficas do município, pode-se observar a variação de área em cada classe face às características fisiográficas dessas bacias. A Figura 8 ilustra a variação em área das classes de Perigo Antropogênico à Inundação de 1975 (Painel A) e de 2018 (Painel B), evidenciando inversões de localização das áreas propensas às inundações, cujos percentuais de variação estão apresentados na Figura 9 (Painéis A, B e C). Ao representar esses percentuais de alterações em áreas ocupadas, as bacias hidrográficas com maior proporção de área alterada, ao comparar o modelo de perigo natural quanto à variação em relação aos modelos antropogênicos à inundação foram: (a) Bacia do Rio

Capivari, com redução de 44,3 km<sup>2</sup> (1975) e 56,1 km<sup>2</sup> (2018) da classe de perigo Baixo e aumento de 34,3 km<sup>2</sup> (1975) e 56,8 km<sup>2</sup> (2018) na classe de perigo Alto; (b) Bacia do Ribeirão Anhumas, com redução do perigo Baixo em 16,6 km<sup>2</sup> (1975) e 16,7 km<sup>2</sup> (2018), e também do perigo Moderado em 19,3 km<sup>2</sup> (1975) e 26,1 km<sup>2</sup>

Figura 8 – Modelos de Perigo à inundação (A) Mapa de Perigo Antropogênico à Inundação – 1975. e (B) Mapa de Perigo Antropogênico à Inundação – 2018, comparação com os pontos críticos de alagamento/inundação.



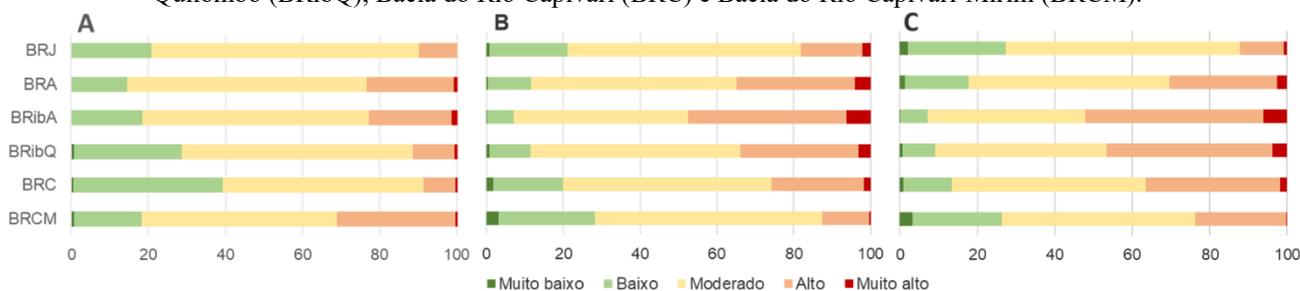
Fonte: Os autores (2020).

(2018), mas com aumento do perigo Alto de 28,4 km<sup>2</sup> (1975) e 35,4 km<sup>2</sup> (2018); (c) Bacia do Ribeirão Quilombo com redução de 12,4 km<sup>2</sup>(1975) e 14,0 km<sup>2</sup> (2018) do perigo Baixo e aumento do perigo do Alto em 14,1 km<sup>2</sup> (1975) e 22,8 km<sup>2</sup> (2018); e (d) Bacia do Rio Atibaia com redução de 22,0 km<sup>2</sup> (1975) e 26,8 km<sup>2</sup> (2018) do perigo Moderado e aumento de 20,6 km<sup>2</sup> (1975) e 13,4 km<sup>2</sup> (2018) do perigo Alto.

Os resultados dos modelos indicaram que o perigo acentuado pode ser explicado pelas características geográficas como maior densidade de drenagem, maior índice de pluviometria média mensal e a topografia com vertentes apresentando declividades maiores que 15% e amplitudes entre 100 à 300 m, que predominam na Bacia do Rio Atibaia e porção leste da Bacia do Ribeirão Anhumas, assim os cursos de água possuem rápido escoamento das precipitações, gerando vazão mais intensa à jusante. Desta forma, ao considerar os fatores de vazão e velocidade de escoamento de uma rede de drenagem proporcionais à quantidade de precipitação e às declividades da área (PINHEIRO, 2007), justifica-se a ocorrência de perigo Alto e Muito Alto nessas áreas.

Salienta-se também que as bacias do Rio Capivari, do Ribeirão Quilombo e Ribeirão Anhumas apresentam variações das classes de perigo Baixo e Alto que podem ser explicadas pela constatação da maior densidade de área construída e, portanto, maior impermeabilização do solo, que tendem a promover aumento do volume de águas e da velocidade de escoamento superficial, como também redução do tempo de resposta das bacias. Considera-se que o tempo de resposta de uma bacia urbanizada pode tornar as áreas mais suscetíveis às inundações, pois o escoamento e a infiltração podem estar 5 a 20 vezes menor se comparado a uma bacia natural (PINHEIRO, 2007), que é provavelmente o que ocorreu com a intensificação da impermeabilização do solo com a expansão e adensamento urbano nas áreas dessas bacias. Todavia, outra explicação possível, é o aumento da suscetibilidade pelo escoamento deficitário da infraestrutura de drenagem urbana, que está associado, de acordo com Tucci (2007), ao subdimensionamento de pontes e bueiros, aterramentos de áreas de planícies fluviais, provocando a redução da seção transversal, o aumento dos níveis de água à montante e o aumento das velocidades do escoamento à jusante.

Figura 9 – Percentual de perigo à inundação por bacia hidrográfica do município, em cada modelo: (A) Perigo Natural à Inundação, (B) Perigo Antropogênico à Inundação – 1975 e (C) Perigo Antropogênico à Inundação – 2018. Bacia do Rio Jaguari (BRJ), Bacia do Rio Atibaia (BRA) Bacia do Ribeirão Anhumas (BRibA), Bacia do Ribeirão Quilombo (BRibQ), Bacia do Rio Capivari (BRC) e Bacia do Rio Capivari-Mirim (BRCM).



Fonte: Os autores (2020).

Se, por um lado, sugere-se que os estudos que aplicaram modelos hidrológicos não levaram em consideração as características individuais de cada sub-bacia, como também não analisam a distribuição espacial das características de impermeabilização do solo (TUCCI, 2007), o presente estudo empregou essas informações, porém não realizou a associação com modelos hidrológicos. Portanto, essa associação é uma sugestão para estudos futuros, visando a proposição de um modelo de inundação melhorado, que pode também ser integrado, conforme sugestão de Zhao et al. (2019), aos modelos hidrológicos urbanos para uma efetiva gestão da água e da estimativa da extensão de área da inundação, de forma rápida e precisa. Outro fator a ser destacado é a compatibilidade de escala das diversas fontes de informação, uma vez que essas podem interferir na qualidade do processamento, mas no presente estudo a escala de análise (1:50.000) foi considerada adequada para padronizar os parâmetros cartográficos empregados na geração de modelos, pois a proposta não visou a análise detalhada das estruturas intraurbanas, como por exemplo a definição de taxas de impermeabilização por lotes e quadras e dimensionamento dos sistemas de drenagem intraurbana.

Os resultados do presente estudo são úteis ao planejamento de estratégias urbanas de redução dos riscos de inundação, uma vez que a avaliação dos processos históricos da dinâmica do uso e ocupação do solo consiste em um importante instrumento de prevenção de circunstâncias futuras, auxiliando na implementação

de planos de proteção que consistem, de acordo com Kim e Newman (2019), em projetos sustentáveis de gerenciamento de desastres, como diques e represas, implementação de infraestruturas verdes para controlar as futuras áreas de preservação e limitar as novas áreas de construção.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados dos modelos antropogênicos de perigo à inundação sugerem que a integração de aspectos morfométricos, pluviometria, tipos de solo e cobertura e uso do solo contribuem com a elevação do potencial de análise de áreas suscetíveis à inundação. Destacam-se como fatores determinantes do perigo à inundação a capacidade de escoamento e de infiltração das bacias, que podem ser afetados pela impermeabilização e pelas ineficiências das estruturas de drenagem urbana. Esses determinantes são intensificados nas áreas de maior adensamento urbano, onde situam-se as classes de Alto e Muito Alto perigo à inundação.

Enquanto possíveis aplicações, a proposta de modelagem é eficiente para o monitoramento das áreas suscetíveis, podendo se constituir em um instrumento de apoio ao planejamento de ações mitigadoras e de prevenção na gestão municipal e órgãos públicos de assistência e proteção civil. Adicionalmente, ressalta-se que o processo de modelagem pode ser aplicado em diferentes contextos espaciais, considerando a escala adequada ao nível de detalhamento da análise e complexidade dos aspectos físicos, uma vez que os dados de entrada dos modelos estão disponíveis em bases de acesso público. Por isso, os cenários resultantes da modelagem podem contribuir para adequar o processo decisório às necessidades dos ambientes urbanos, principalmente aqueles referentes à implementação de ações de readequação da macrodrenagem e microdrenagem das águas pluviais nos pontos mais críticos.

Desta forma, o método de integração multicritério cumpriu, satisfatoriamente, com a função de analisar conjuntos de dados qualitativos e quantitativos para avaliar a suscetibilidade à ocorrência de enchentes, inundações e alagamentos no município de Campinas – SP; e assim, os modelos contribuem para analisar o efeito da expansão urbana, apontando propostas para inter-relacionar o processo do uso e ocupação do solo urbano aos aspectos físicos e ambientais com a vistas à verificação da influência do grau de impermeabilização do solo sobre o perigo de inundação e riscos à população residente. Uma síntese dos principais resultados e discussões estão apresentados no Quadro 2. Há, contudo, necessidade de explorar a associação entre as características geomorfológicas, modelos hidrológicos e indicadores demográficos para um diagnóstico integrado das áreas e da população potencialmente expostas ao risco de inundação.

Quadro 2 – Síntese dos resultados, discussões e conclusões do estudo.

	Resultado	Discussão/ Conclusão
Modelo Perigo Natural à inundação	O perigo Moderado predomina em relação às demais, ocupando cerca de ~460 km <sup>2</sup> (~58%) da área do município.	As alterações das classes Alto e Baixo perigo aos fatores: adensamento populacional, aumento da área urbanizada (de ~100km <sup>2</sup> em 1975 para ~191 km <sup>2</sup> em 2018), devido ao seu crescimento horizontal, ao aumento de área impermeabilizada e da carga sobre o sistema de drenagem, que tendem a aumentar a incidência de inundações repentinas.
Modelo Perigo Antropogênico à Inundação – 1975	Extensão de área sujeita a ocorrência de inundação no município, destacando-se as alterações das classes Alto e Muito Alto perigo, que passaram a ocupar ~226 km <sup>2</sup> (~29%) e ~27 km <sup>2</sup> (~3%).	Os modelos mostraram-se suficientes para estratificar o perigo e identificar os extremos de sua ocorrência.
Modelo Perigo Antropogênico à Inundação – 2018	Aumento da classe Alto, que passou a ocupar ~261 km <sup>2</sup> (~33%) e redução do perigo Baixo, que passou a apresentar ~14% (~110 km <sup>2</sup> ).	
Bacia hidrográfica	Rio Capivari: Destaca-se pela redução do perigo Baixo (~44 km <sup>2</sup> em 1975 e ~56 km <sup>2</sup> em 2018) e aumento do perigo Alto (~34 km <sup>2</sup> em 1975 e ~57 km <sup>2</sup> em 2018). Ribeirão Anhumas: Destaca-se pela redução do perigo Baixo (~17 km <sup>2</sup> em 1975 e em 2018) e Moderado (~19 km <sup>2</sup> em 1975 e ~26 km <sup>2</sup> em 2018), com aumento do perigo Alto (~28 km <sup>2</sup> em 1975 e ~35 km <sup>2</sup> em 2018). Ribeirão Quilombo: Destaca-se pela redução do perigo Baixo (~12 km <sup>2</sup> em 1975 e ~14 km <sup>2</sup> em 2018) e aumento do perigo do Alto (~14 km <sup>2</sup> em 1975 e ~23 km <sup>2</sup> em 2018). Rio Atibaia: Destaca-se pela redução do perigo Moderado (~22 km <sup>2</sup> em 1975 e ~27 km <sup>2</sup> em 2018) e aumento do perigo Alto (~21 km <sup>2</sup> em 1975 e ~13 km <sup>2</sup> em 2018).	As bacias Rio Capivari, Ribeirão Anhumas e Ribeirão Quilombo apresentam variações de perigo Baixo e Alto explicadas pela maior densidade de área construída, afetando a impermeabilização do solo, o volume de águas e velocidade de escoamento superficial, como também redução do tempo de resposta das bacias. Bacia do Rio Atibaia e porção leste da Bacia do Ribeirão Anhumas apresentam perigo Alto e Muito Alto explicado pela maior densidade de drenagem e índice de pluviometria média mensal e declividades maiores que 15%, que promovem rápido escoamento e geram vazão mais intensa à jusante. Corrobora-se que a urbanização pode tornar as bacias hidrográficas mais suscetíveis às inundações ao alterar a relação entre escoamento e a infiltração, quando comparado a uma bacia natural.

continua

		conclusão
	<b>Resultado</b>	<b>Discussão/ Conclusão</b>
Validação	As áreas classificadas como perigo Alto e Muito Alto coincidiram com ~80% de 41 pontos críticos de alagamento/inundação, validando a estratificação realizada para as classes perigo e assegurando a confiabilidade no método de modelagem.	O potencial de precisão aumentou em ~18% na identificação do perigo Alto e Muito Alto à inundação, se comparado a outras propostas, que não implementaram os parâmetros de densidade de drenagem, pluviometria e cobertura vegetal original. Enfatiza-se que os cenários modelados contribuem para a implementação de intervenções para readequar a macrodrenagem e microdrenagem das águas pluviais em pontos críticos.

Fonte: Os autores (2020).

## Agradecimentos

Os autores V.M.M.P. e C.F.C. agradecem as bolsas de Iniciação Científica fornecidas pela Pontifícia Universidade de Campinas (PUC-Campinas).

## Contribuição dos Autores

Conceptualização: V.M.M.P, C.F.C; D.M.C. e M.L.M; Curadoria dos dados: M.L.M.; Análise formal: V.M.M.P, C.F.C; D.M.C. e M.L.M; Investigação: V.M.M.P, C.F.C; D.M.C. e M.L.M; Metodologia: V.M.M.P, C.F.C; D.M.C. e M.L.M; Administração do projeto: V.M.M.P e M.L.M; Recursos: D.M.C. e M.L.M; Supervisão: M.L.M; Validação: V.M.M.P, C.F.C; D.M.C. e M.L.M; Visualização: V.M.M.P, C.F.C; D.M.C. e M.L.M; Redação -minuta inicial: .M.M.P, C.F.C; D.M.C. e M.L.M; Redação -revisão e edição: .M.M.P, C.F.C; D.M.C. e M.L.M.

## Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

## Referências

- ALLAIN, S.; PLUMECOCQ, G.; LEENHARDT, D. How D. O. Multi-criteria Assessments Address Landscape-level Problems? A Review of Studies and Practices. **Ecological Economics**, v.136, p.282-295, jun. 2017. DOI. 10.1016/j.ecolecon.2017.02.011.
- AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. Inundação e Enchentes. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J. (Ed.); AMARAL, R. (ed.) **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p. 39-52.
- ANA—Agência Nacional das Águas. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas de Bacias do Atlântico Sul e Sudeste**. 2018. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>. Acesso em: 02 jul. 2018.
- BADARÓ, R.S.C. **Campinas: o despontar da modernidade**. Campinas: CMU/UNICAMP, 1996.
- BATHRELLOS, G.D.; SKILODIMOU H.D.; CHOUSIANITIS K.; YOUSSEF A.M.; PRADHAN B. Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. **Science of The Total Environment**, v. 575, p.119-134, jan. 2017. DOI. 10.1016/j.scitotenv.2016.10.025.
- BERGER, M.V.S.; SILVA, M.C. DA.; SALDANHA, J.C.S. Análise de vulnerabilidade da RPPN Cafundó. In: MORAES, A.C.; SANTOS, A.R. dos. (Ed.). **Geomática e análise ambiental**. Vitória: EDUFES, 2007. p. 32-46.
- BOGGIONE, G. A.; SILVA, M. V. A; CARVALHO JUNIOR, N. R. TELES, T. L. NAZARENO, N. R. X. Definição da escala em imagens de sensoriamento remoto: uma abordagem alternativa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 1739-1746.

- BRASIL. Projeto RADAMBRASIL - Folhas SF23/24 Rio de Janeiro e Vitória. IBGE, Rio de Janeiro, 1983. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/Projeto%20RADAMBRASIL/Projeto%20RADAMBRASIL%20v24%20\(Suplemento\).pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/Projeto%20RADAMBRASIL/Projeto%20RADAMBRASIL%20v24%20(Suplemento).pdf)>. Acesso em: 22 mar. 2019.
- BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press: New York, 1998.
- CAMPINAS. **Plano municipal de saneamento básico**. Prefeitura Municipal de Campinas. Campinas, 2013. Disponível em: <<http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/meio-ambiente/plano-saneamento/p4-relatorio-final.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2018.
- CAMPINAS. **Geoambiental informações ambientais especializadas**. Campinas, 2018. Disponível em: <[https://geoambiental.campinas.sp.gov.br/pmapper/map\\_svds.phtml?config=svds](https://geoambiental.campinas.sp.gov.br/pmapper/map_svds.phtml?config=svds)>. Acesso em: 06 nov. 2018.
- CASTELLANO, M.S. **Inundações em Campinas (SP) entre 1958 e 2007: tendências sócioespaciais e as ações do poder público**. 182 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- CEPAGRI. **Clima dos Municípios Paulistas**. Campinas, 2017. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>> Acesso em: 10 out. 2018.
- CHRISTOFOLETTI, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**, Rio Claro, v. 4, n.8. p.23-42, 1979.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Blucher, 1999.
- CONGALTON, R. G; GREEN K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 2009.
- CORRÊA, R. L. **Trajetórias Geográficas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.
- COSTA, M. A. **Expansão urbana e organização espacial**. Recife: Ed. Universitária, 1982.
- CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **Disasters 2018: Year in Review**. EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, 2019. Disponível em: <<http://www.emdat.be/publications>>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- DAEE – Departamento de Água e Esgoto. **Banco de Dados Hidrológicos**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- ESMAIL, B. A.; GENELETTI, D. Multi-criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. **Methods in Ecology and Evolution**, v.9, p.42-53, jan. 2017. DOI. [org/10.1111/2041-210X.12899](https://doi.org/10.1111/2041-210X.12899).
- ESRI. **ArcGis advanced: release 10.5.1**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2018.
- GARNER, B.J. Modelo de Geografia urbana e localização de povoações. In: CHORLEY, R. J (Ed.). **Modelos integrados em Geografia**. Rio de Janeiro: USP, 1975. p.124-174.
- GREGORY, A, K. et al. Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making. **Integrated Environmental Assessment and Management**. v.1, n.2, p. 95-108, 2005.
- HOGAN, D. J.; CUNHA, J. M. P.; CARMO, R. L.; OLIVEIRA, A. A. B. Urbanização e vulnerabilidade sócio-ambiental: o caso de Campinas. In: HOGAN, D. J.; BAENINGER, R.; CUNHA, J.M.P.; CARMO, R. L. (Ed.) **Migração e ambiente nas aglomerações urbanas**. Campinas: NEPO/UNICAMP, 2001. p. 395-418.
- HORA, S. B.; GOMES, R. L. Mapeamento e Avaliação do risco a inundações do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA. **Sociedade & Natureza**. Uberlândia v.21, n.2. p. 57-75, ago. 2009.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Pedologia. nº4, Rio de Janeiro: IBGE, 2007. **Série Manuais Técnicos em Geociências**. Disponível em:

- <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Resultados do universo por setores censitários, 2011. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em: 22 nov. 2018.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Uso da Terra. nº7, Rio de Janeiro: IBGE, 2013. **Série Manuais Técnicos em Geociências**. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas Territoriais 2015**. Malhas Municipais, 2015. Disponível em: <[http://geoftp.ibge.gov.br/organizacao\\_do\\_territorio/malhas\\_territoriais/malhas\\_municipais/municipio\\_2015/](http://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_municipais/municipio_2015/)>. Acesso em: 07 fev. 2018.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades. Brasil em Síntese**, 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/campinas/panorama>>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- IG – Instituto Geológico (SMA). **Subsídios do Meio Físico-Geológico ao Planejamento do Município de Campinas (SP)**. Mapa Geológico do Município de Campinas. São Paulo. 2v. Relatórios Técnicos, 2009. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutogeologico/1993/01/subsidios-do-meio-fisico-geologico-ao-planejamento-no-municipio-de-campinas/>>. Acesso em: 20 nov. 2018.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Geração de Imagens (DGI), Imagens do Sistema/Sensor LANDSAT**. Orbita/Ponto: 219/076. Cachoeira Paulista: INPE/DGI, 2018. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/>>. Acesso em: 10 out. 2018.
- IPT; CPRM. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações**: município de Campinas-SP. 2014. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15163>>. Acesso em: 18 set. 2018.
- JENSEN, J.R Urban/Suburban Land Use and Analysis. In: COWELL, R.N. (Ed.) **Manual of Remote Sensing**. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1983. p.1571-1666.
- KANANI-SADAT, Yousef et al. A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on GIS-based hybrid multi criteria decision-making method. **Journal of Hydrology**, v. 572, p. 17-31, mai. 2019. DOI. 10.1016/j.jhydrol.2019.02.034.
- KEENY, R. L. **Value-focused thinking**: a path to creative decision-making. Cambridge: Harvard University Press, 1992.
- KIM, Y; NEWMAN, G. Climate Change Preparedness: Comparing Future Urban Growth and Flood Risk in Amsterdam and Houston. **Sustainability**, v.11, n.4, 1048, fev. 2019. DOI. 10.3390/su11041048.
- KÖKSALAN, M.; WALLENUS, J.; ZIONTS, S. An Early History of Multiple Criteria Decision Making. **Journal of Multi-criteria Decision Analysis**, v.20, p.87-94, mar. 2013. DOI. 10.1002/mcda.1481.
- LONGLEY, P; MESEV, V. On the measurement and generalisation of urban form. **Environment and Planning A: Economy and Space**, v. 32, n.3, p. 473-488, mar. 2000. DOI. 10.1068/a3224.
- LU, D.S., MAUSEL P, BRONDÍZIO, E.; MORAN E. Change detection techniques. **International Journal Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365–2401, jun. 2010. DOI. 10.1080/0143116031000139863.
- MAGALHÃES, I.L.; THIAGO, C.R.L.; AGRIZZI, D.V.; SANTOS, A.R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, v. 8, n. 2, p. 63-70, nov. 2011.
- MALCZEWSKI, J. GIS-based decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n.7, p. 703-726, fev. 2006. DOI. 10.1080/13658810600661508.
- MARQUES, M. L.; SILVA, M. C.; DE CAMARGO, D. M. Análise Geoespacial no Mapeamento da Vulnerabilidade Socioambiental em Campinas, SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 9, p. 1711-1723, nov/dez. 2017.
- MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G. Técnicas de inferência espacial. In: MORAES, A.C.; SANTOS, A.R. dos. (Ed.). **Geomática e análise ambiental**, Vitória: EDUFES, 2007. pp.107-189.

- MENDONÇA, F. Riscos, vulnerabilidade e abordagem socioambiental urbana: uma reflexão a partir da RMC e de Curitiba. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 10, p. 139-148, jul./dez. 2004.
- MENDONÇA, Francisco. Geografia, geografia física e meio ambiente: uma reflexão à partir da problemática socioambiental urbana. **Revista da ANPEGE**, v. 5, n. 05, p. 123-134, 2009. DOI. 10.5418/RA2009.0505.0010
- MENESES, P.R. ALMEIDA T.D. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB, 2012.
- MONTEIRO, C. A. F. Derivações Antropogênicas dos Geossistemas Terrestres no Brasil e Alterações Climáticas: perspectivas urbanas e agrárias ao problema de elaboração de modelos de avaliação. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 5, n. 1, 2001. DOI. 10.5380/raega.v5i1.18325.
- MOURA, R.; OLIVEIRA, S.; PÊGO, B. Escalas da urbanização brasileira. **Texto para discussão - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. Rio de Janeiro: IPEA, 2018.
- NELSON, S.A. **Natural Disasters**. Tulane University, Dept. Earth & Environmental Sciences. 2018. Disponível em: <[http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural\\_Disasters/index.html](http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/index.html)>. Acesso 28 mar. 2019.
- PINHEIRO, A. Enchente e Inundação. In: SANTOS, R. F. dos (Ed.) **Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2007. p.95-106.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v.8, p. 63-74, nov.1994. DOI. 10.7154/RDG.1994.0008.0006.
- SAATY, T. L. How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, 1990.
- SANTOS, H.G. DOS; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. DOS; OLIVEIRA, V.A. De; OLIVEIRA, J.B. DE; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 2018.
- TUCCI, C. E. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, v. 11, 2007.
- TUCCI, C.E.M.; BERTONI J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- TORRENS, P.M. Can Geocomputation save urban simulation? Throw some agents into the mixture, simmer, and wait... Center for Advanced Spatial Analysis. **Working Paper Series**, v. 32, p. 3-37, abr. 2001.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.
- TRICART, J.; KILIAN, J. **L'éco-géographie et l'aménagement du milieu naturel**. Paris: Maspéro, 1979.
- VALLADARES, G. S.; COELHO, R.M.; CHIBA, M.K. **Mapa pedológico do Município de Campinas, SP**. Campinas: CNPM, 2008. Escala 1:50.000.
- VELOSO, H. P., RANGEL-FILHO, A. L. R; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. IBGE: Rio de Janeiro, 1991.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- UNWIN, D. **Introductory spatial analysis**. London: Methuen & Co, 1981.
- ZHAOA, G.; XU, Z., PANGA, B., TU, T., XU, L., DU, L. An enhanced inundation method for urban flood hazard mapping at the large catchment scale. **Journal of Hydrology**, v.571, p. 873-882, abr. 2019. DOI. 10.1016/j.jhydrol.2019.02.008.

## Biografia do autor principal



Vinícius Marques Müller Pessoa, nascido em Esp. Sto. do Pinhal, em 1997. Graduação em Arquitetura e Urbanismo pela PUC-Campinas-SP, em 2020. Exerce a profissão em Campinas-SP. Publicações científicas em destaque: CECAGNO CF, PESSOA VMM, CAMARGO DM, MARQUES ML. Sustentabilidade do desenvolvimento urbano de Campinas-SP: uma abordagem multicritério. URBE. REVISTA BRASILEIRA DE GESTÃO URBANA, 12, p.20190178, 2020. MARQUES ML, PESSOA VMM, CAMARGO DM, CECAGNO CF. Simulación de escenarios urbanos mediante autómatas celulares para modelar el crecimiento de Campinas - SP, Brasil. EURE Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales, 47, p.207-227, 2021. Tem interesse científico na área de planejamento urbano e ambiental.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.