

Uso de ferramentas digitais para a avaliação da resiliência urbana: o impacto das áreas suscetíveis a inundações na conectividade urbana

Using digital tools to assess urban resilience: the impact of areas susceptible to flooding on urban connectivity

Leonardo Sanches*, José Ripper Kós**

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, leosanxes@yahoo.com.br

**Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, jose.kos@ufsc.br

usjt
arq.urb

número 39 | abr-dez de 2024

Recebido: 22/04/2023

Aceito: 02/04/2024

DOI: [10.37916/arq.urb.vi39.658](https://doi.org/10.37916/arq.urb.vi39.658)



Palavras-chave:

City Information Modeling (CIM).
Resiliência urbana.
Áreas de suscetibilidade à inundação.

Keywords:

City Information Modeling (CIM).
Urban resilience.
Inundation susceptibility areas.

Resumo

Com o aumento dos eventos climáticos extremos, a resiliência das cidades, entendida como a busca pela redução de riscos de desastres e por ambientes capazes de se adaptar às mudanças climáticas, tem se tornado um tema cada vez mais presente em debates sobre planejamento urbano. Ferramentas digitais, por sua vez, ganham relevância na análise do espaço urbano, contribuindo significativamente para a gestão de cidades, seja através do georreferenciamento ou da modelagem tridimensional. Neste cenário, a pesquisa apresentada explora a possibilidade da construção de uma ferramenta para avaliar o impacto das áreas com risco de inundação na conectividade do espaço urbano e no acesso às escolas da cidade de Juiz de Fora/MG. A partir da integração entre os softwares QGIS, para registro dos dados do ambiente, e a composição do modelador 3D Rhinoceros e seu plugin Grasshopper. para criação do ambiente virtual e análise, o sistema foi capaz de calcular métricas da paisagem capazes de avaliar a resiliência local, confirmando, assim, a aplicabilidade de ferramentas digitais para avaliação do espaço urbano, bem como a escalabilidade da solução, seja em termos territoriais ou temáticos.

Abstract

With increasing extreme weather events, resilient cities – cities that managed to create climate change-adapted environments and reduce disaster risks – have become a constant theme for debate on urban planning. On the other hand, digital tools significantly impacted the cities' management systems whether through georeferencing tools or three-dimensional modeling. In this scenario, the study explores the possibility of building a tool to assess the impact of areas at risk of flooding on urban space connectivity and access to schools in the city of Juiz de Fora, Brazil. A composition of QGIS software, for recording environmental data, and the Rhinoceros 3D modeler plus its Grasshopper plugin, created the virtual tridimensional space and the analysis required to calculate landscape metrics for assessing local resilience. The results confirm the applicability of digital tools for assessing the urban space and the scalability of the solution, whether in territorial thematic or terms.

Introdução

Com o aumento dos eventos climáticos extremos, os impactos da crise climática na vida urbana estão cada vez mais perceptíveis. Seja por alagamentos, inundações, ou por movimentos e corridas de massas a conectividade do espaço urbano tende a ser impactada de forma direta. Acessos a escolas, hospitais ou mesmo regiões inteiras são, interrompidos, ou no mínimo dificultados. Nesse contexto, a ideia de resiliência, ou seja, a capacidade de adaptação às mudanças climáticas e de redução de riscos de desastre, tem tomado cada vez mais espaço nos debates sobre cidades e o uso de ferramentas digitais de análise do espaço urbano pode contribuir para detectar ou mensurar o impacto de tais ocorrências.

Com evolução tecnológica das últimas décadas, estão cada vez mais presentes as ferramentas cartográficas digitais, que possibilitam, além do registro visual de características geográficas, a criação de espaços de análise e projeto. Sistemas de Informação Geográfica (GIS) e modeladores tridimensionais, entre outros, contribuem para que coleta, armazenamento e manipulação de dados tenham o suporte de ferramentas capazes de ampliar significativamente a produção de informações. Ainda no cenário tecnológico, sistemas generativos digitais e lógicas algorítmico-paramétricas se apresentam como agentes possivelmente capazes de ampliar as potencialidades dos modelos de cidade à medida em que contribuem no processo de geração de formas e na criação de instrumentos de avaliação.

Uma das características dos métodos de avaliação utilizados em ferramentas digitais é a possibilidade de transformar temas em critérios identificáveis e, principalmente, mensuráveis diretamente. Definição que se aproxima do conceito de métricas ligado ao desenvolvimento de medidas quantificáveis para analisar o resultado de um processo, limites ou referências do aceitável, em geral, estabelecidos através de classificações ou consenso no meio técnico e científico (ROCHA et al., 2016). Sendo que, no caso da ecologia da paisagem, as métricas estão relacionadas ao desenvolvimento de métodos para descrever e medir em termos quantificáveis a relação entre padrões espaciais e os processos ecológicos que neles se desenvolvem (cf. FORMAN, 1995; ANTROP e VAN EETVELDE, 2017).

Nesse contexto, este artigo tem por objetivo investigar a integração entre sistemas de informações geográficas e lógicas algorítmico-paramétricas para avaliação da resiliência de espaços urbanos, usando como critério, as métricas da paisagem,

mais especificamente aquelas voltadas à conectividade, entendida aqui, como “a capacidade da paisagem facilitar ou impedir o fluxo de recursos biológicos entre os fragmentos” (TAYLOR et al. 1993). O trabalho se inicia com uma breve revisão bibliográfica explorando os conceitos de resiliência, métricas da paisagem, ferramentas digitais e lógicas algorítmico-paramétricas e, posteriormente, se apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta digital, tendo como plataforma QGIS, Rhinoceros e seu plugin Grasshopper. A ferramenta é então aplicada em um cenário real, mais especificamente a cidade de Juiz de Fora/MG, explorando a relação entre vias, áreas suscetíveis à inundação e as escolas locais. Por fim, um relato de seu uso e os resultados obtidos são apresentados visando contribuir para possíveis estratégias de modelagem, avaliação, planejamento e gestão da urbana, bem como para o desenvolvimento de ferramentas digitais.

Materiais e Métodos

Este trabalho explora a possibilidade da construção de um modelo de informação de cidades composto por um modelo GIS ampliado pela exploração espacial das lógicas algorítmico-paramétricas a fim de avaliar a resiliência de um espaço urbano. Em consonância com o viés experimental do campo de estudo, o trabalho visa gerar conhecimento a partir de uma relação intrínseca com oportunidades ou problemas da vida real e, portanto, se pauta no desenvolvimento de um artefato capaz de solucionar um problema definido no contexto teórico escolhido. A seguir, se apresentam materiais e métodos capazes de conduzir o processo.

O artefato proposto para solucionar o problema é um conjunto de algoritmos capazes de sistematizar as informações espaciais de uma região e gerar análises de dados pautadas nas métricas da paisagem a fim de simular os impactos das áreas suscetíveis a inundações na conectividade urbana.

O recorte espacial para desenvolvimento do estudo é a cidade de Juiz de Fora/MG. De acordo com os dados do Censo demográfico 2022, a cidade tem aproximadamente 540.000 habitantes, sendo 16% (85.972 pessoas), desse total composto por pessoas de 0 a 14 anos. Ocupando uma área de 1.435,75km², a cidade apresenta uma densidade de 376,64hab/km² (IBGE, 2023). A cidade se caracteriza como polo econômico da Zona da Mata Mineira, uma região com aproximadamente um milhão e meio de habitantes, e com isso, pode ser considerada uma das principais cidades do interior de Minas Gerais (Figura 1).

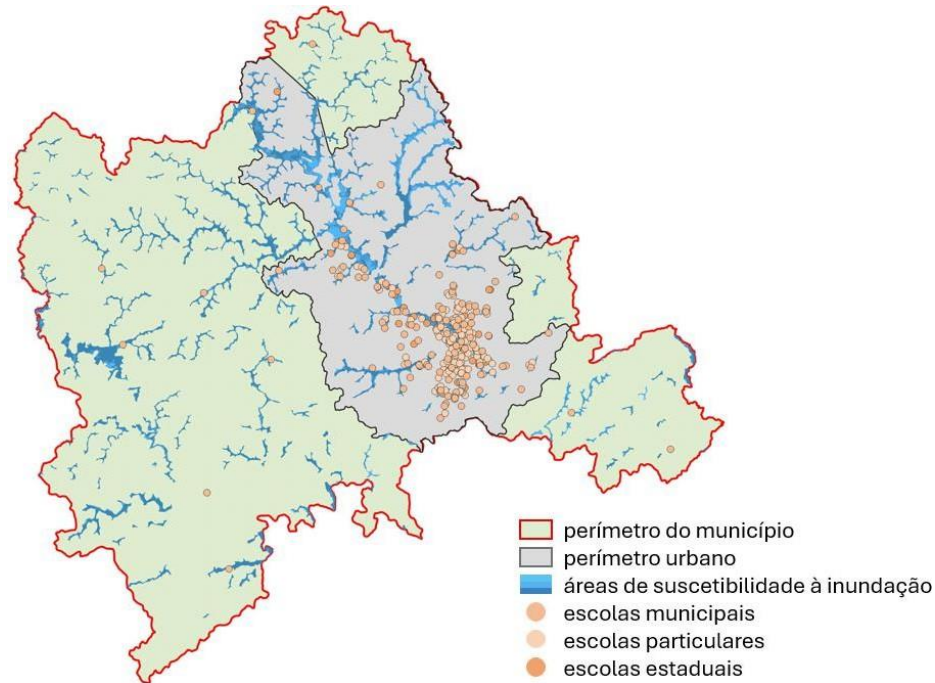


Figura 1. Limites territoriais, escolas e áreas de suscetibilidade. Fonte: autor

A conversão das métricas da paisagem em algoritmos de avaliação foi desenvolvida em cinco fases: [1] identificação de métricas de avaliação, [2] seleção de métricas passíveis de parametrização, [3] ordenação por complexidade e disponibilidade de dados, [4] sistematização individualizada das métricas adotadas e [5] programação e testagem.

A simulação apresentada tem como base o software QGIS, plataforma em que os dados georreferenciados da cidade de Juiz de Fora/MG, obtidos junto à prefeitura municipal e ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM 2022), são registrados. Para o estudo, foi utilizado todo o perímetro do município, visando identificar a ocorrência dos eventos de interesse e o impacto nas dinâmicas urbanas. A ferramenta desenvolvida estabelece o cruzamento de [1] vias, caminhos e estradas vicinais, [2] áreas de suscetibilidade à inundação, disponibilizados pelo governo federal, [3] escolas

municipais, estaduais e particulares, e [4] perímetro urbano e regiões de planejamento, a fim de se identificar os efeitos em relação à conectividade do espaço urbano e as possibilidades de acesso à infraestrutura social local.

Para este estudo foram utilizadas como referência as Regiões de Planejamento do município, divisões administrativas estabelecidas pelo Plano Diretor da cidade com características semelhantes em relação aos aspectos socioeconômicos, geoambientais e culturais. A Figura 2 apresenta um recorte da área de estudo, especificamente na RP Centro, para uma melhor visualização da relação entre os elementos explorados.

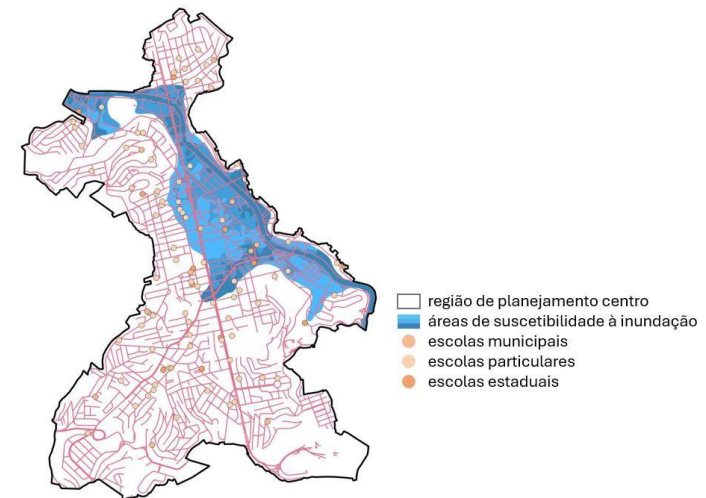


Figura 2. Escolas, vias e áreas de suscetibilidade na região de planejamento centro

O suporte computacional para o desenvolvimento da solução digital, é a composição entre QGIS e Rhinoceros/Grasshopper (Figura 3). O QGIS – versão 3.24.3 –, é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto capaz de criar bancos de dados com referência geográfica e conta com amplas fontes de dados secundários fornecidos, entre outros, pelos portais de geoprocessamento de diversas autoridades municipais. Sua função na composição foi estabelecer uma plataforma de entrada e armazenamento de dados.

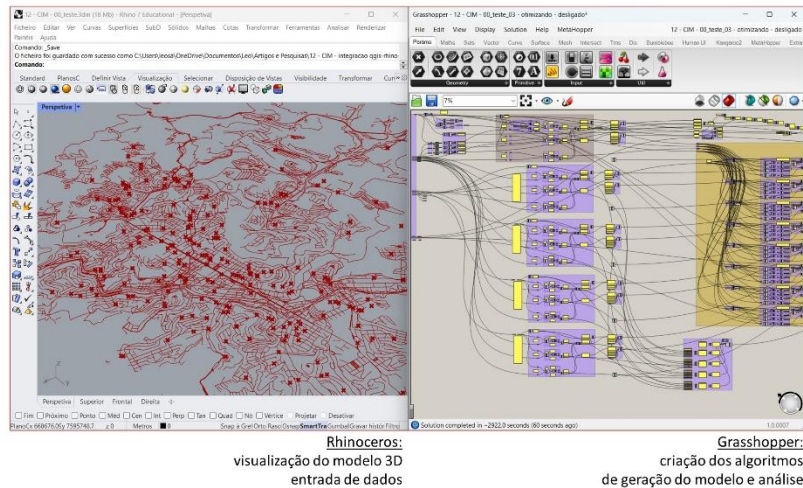


Figura 3A. Relação entre os diferentes suportes operacionais: composição entre QGIS e Rhinceros/Grasshopper. Fonte: autor.

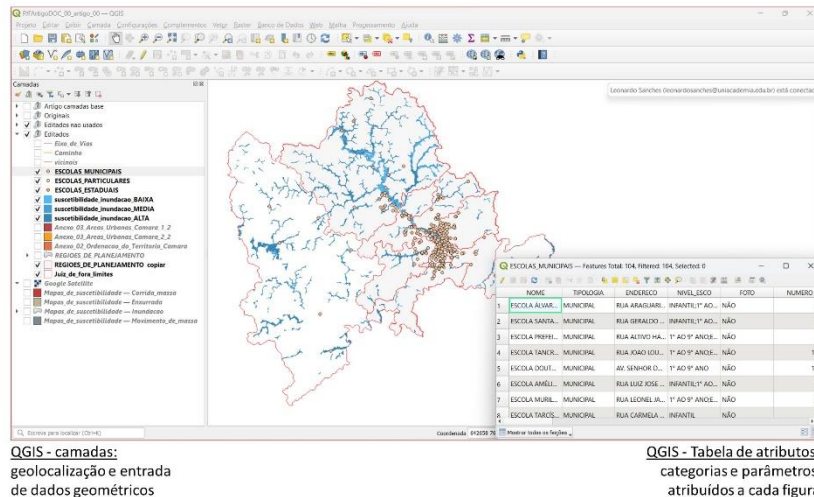


Figura 3B. Relação entre os diferentes suportes operacionais: composição entre QGIS e Rhinceros/Grasshopper. Fonte: autor.

Como plataforma para a programação foi utilizado o software Rhinceros como modelador 3d – versão 7, licença educacional –, em conjunto com o plug-in Grasshopper – versão 1.0.0007 –, utilizado para editar algoritmos graficamente, a relação entre os programas se dá de forma direta, com o plug-in GHSHP *Shapefile Import* para importação de dados georreferenciados no Grasshopper. Esta composição tem como principal função a modelagem tridimensional de objetos de forma indireta, através de uma linguagem visual de programação (VPL).

A possibilidade de utilização de uma VPL, foi determinante para a opção pelo conjunto, softwares GIS, em geral contam com suporte para programação em linguagens textuais, porém, estas são consideravelmente mais complexas. Com isso, o Grasshopper foi considerado um suporte mais acessível e de uso relativamente simplificado, capaz de automatizar a identificação das relações espaciais entre os elementos e as operações de cálculo necessárias.

O objetivo da integração entre as ferramentas foi ampliar as possibilidades de entrada de dados e aproveitamento das fontes secundárias disponíveis, maior facilidade de programação e manipulação dos algoritmos. Desta forma, se fez possível construir uma ferramenta digital de análise da paisagem urbana que pode contribuir na investigação do conceito de CIM. A seguir se apresenta a exploração conceitual do cenário de atuação para a pesquisa.

Resiliência Urbana

Definido inicialmente sob um ponto de vista ecológico, como a capacidade de um sistema de absorver mudanças e manter suas funções e relações internas (Gunder-son e Holling, 2002), o termo resiliência passou a ser adotado em diversos campos de estudo. Esse conceito se apresenta como uma contrapartida à vulnerabilidade, não apenas como forma de enfrentar mudanças ou choques externos, mas também de responder ativa e positivamente aos riscos, ela representa um processo contínuo relacionado aos preparativos para minimizar os distúrbios (ou mudança) e às ações para lidar com esses distúrbios depois que eles ocorreram (LU & STEAD, 2013). Os riscos em questão são definidos pelo Marco de Ação de Hyogo de 2005, como:

Evento físico, fenômeno ou atividade humana potencialmente prejudicial que pode causar a perda de vidas humanas ou ferimentos, danos à propriedade, ruptura social e econômica ou degradação ambiental. Os perigos incluem condições latentes que podem representar ameaças futuras e podem ter diferentes origens:

naturais (geológicas, hidrometeorológicas e biológicas) ou induzidas por processos humanos (degradação ambiental e perigos tecnológicos) (UNDRR, 2017).

Cidades resilientes, por sua vez, podem ser entendidas como um sistema complexo e multidisciplinar capaz de reagir a problemas ecológicos, lidar com riscos e desastres, resistir a choques na economia urbana e que buscam ativamente por essas características através de estratégias pautadas na governança (DE JONG, 2015). Godschalk (2003), define esse tipo de cidade como um conjunto de redes sustentáveis de sistemas físicos e comunidades humanas. Em termos práticos, estradas, edifícios, infraestrutura, comunicações e energia; escolas, bairros, organizações e empresas, entre outros, devem permanecer em funcionamento, mesmo sob tensões extremas ou estresses contínuos. UNDRR (2017), cita como tensões extremas: inundações, terremotos, furacões, incêndios florestais, derramamento dos produtos químicos, falhas de energia, e como estresses contínuos desmatamento ou esgotamento da água subterrânea, além de questões socioeconômicas como desalojamento ou desemprego.

A noção de resiliência surgiu no planejamento urbano na década de 1990 e, inicialmente, estava ligada às ações de preparação e mitigação em escala local, porém com o tempo, passou a abranger estratégias mais amplas de mitigação, como redução das emissões de gases de efeito estufa e a abordagem das mudanças climáticas (LU & STEAD, 2013). Hoje, adaptação, planejamento espacial e forma urbana sustentável estão entre as principais características de cidade resilientes (DE JONG, 2015). A suscetibilidade de uma comunidade ou sociedade aos efeitos prejudiciais de uma ameaça está diretamente ligada à composição entre risco e vulnerabilidade, portanto, avaliação de riscos, redução de perigos, diminuição da vulnerabilidade e melhoria da preparação fazem parte da construção de um processo capaz de mitigar tais ameaças (WAMSLER, et al. 2013). Por outro lado, a ideia de prevenção está diretamente ligada à proatividade, diz respeito à análise e planejamento de um ambiente, compreendendo suas especificidades e permitindo que os riscos e seus impactos sejam antecipados, protegendo pessoas, propriedades e o meio ambiente. As ações nesse sentido estão relacionadas tanto à gestão, quanto ao ambiente físico e aos objetos em si e, são adotadas entre outras, através da identificação de riscos, planos de crescimento inteligentes, fortalecimento de edificações e instalações, obras de controle de enchentes e estabilização de encostas,

além da própria conscientização das pessoas (GODSCHALK, 2003).

A resistência a distúrbios climáticos extremos tende a ser de difícil execução e a apresentar um custo elevado, com isso, estratégias de mitigação, adaptação e resiliência têm sido cada vez mais adotadas no contexto urbano, buscando uma abordagem de aprendizado e convivência com os fatores extremos (LU & STEAD, 2013). Para WAMSLER, et al. (2013), compreender a relação entre cidades e desastres passa por assimilar as características físicas, ambientais, socioculturais, econômicas e políticas distintas desse tipo de construção humana. Levando em conta a interdependência entre os fatores, verifica-se que o tecido urbano pode potencializar riscos e vulnerabilidades, aumentando a ocorrência de desastres e interferindo nos mecanismos e estruturas para resposta e recuperação.

Métricas para avaliação da paisagem – conectividade

Pautado nas definições de paisagem apresentadas por Forman e Godron (1981), DRAMSTAD et al. 1996; FORMAN 1995 e por Benedict e McMahon (2006), define-se paisagem para este trabalho, como um sistema vivo, em uma escala aproximada, composto por uma dimensão material, física, e uma dimensão imaterial, gerada pela percepção do ambiente, sempre ponderada pelos aspectos sociais e culturais. A dimensão física dá suporte à atividade humana e ao mesmo tempo é o espaço onde são projetados seus ideais, sendo, assim, fruto de uma relação cíclica de influência mútua entre humanidade e natureza.

Neste recorte, ao se buscar elementos passíveis de aplicação em ferramentas digitais, ou seja, aqueles caracterizados por critérios e parâmetros relativamente bem definidos e passíveis de quantificação, se identifica a ecologia da paisagem, e mais especificamente as métricas que visam estabelecer uma relação de feedback entre estrutura e função.

A ecologia da paisagem pode ser percebida como uma abordagem capaz de considerar a totalidade do ambiente de forma sistêmica, podendo ser definida como o estudo da relação entre o arranjo espacial, suas funções e dinâmicas e processos bióticos e abióticos que nele se desenvolvem em uma variedade de escalas espaciais e temporais (cf. FARINA, 2012; O'NEILL, 2005; DRAMSTAD et al., 1996; IALE, 2021). METZGER (2001), ou seja, ela busca combinar a abordagem espacial horizontal dos geógrafos com a abordagem vertical funcional dos ecologistas

(FARINA, 1998).

Hoje, tais ferramentas passam a ser utilizadas, com a mesma lógica, em estudos urbanos, analisando os fragmentos de forma adaptada às especificidades do uso e ocupação do solo, contribuindo para a compreensão da relação entre fragmento de mancha urbana e território, e para identificar suas potencialidades para atender diferentes funções na rede da ocupação urbana (ROCHA et al. 2016).

Em termos gerais, métricas estão ligadas a variáveis quantificáveis para analisar o resultado de um processo, limites ou referências do aceitável (ROCHA et al., 2016). O desenvolvimento das métricas da paisagem se apoia em métodos e conceitos da ciência da informação geográfica e da análise de imagens digitais para criar uma abordagem com potencial para contribuir para a elaboração de modelos para avaliação e para o seu planejamento e gestão, planejamento e gestão da paisagem (cf. LANG et al., 2009). Enquanto as estatísticas espaciais se pautam na quantificação, as métricas da paisagem registram a dependência espacial dos valores, caracterizando as propriedades geométricas e espaciais dos dados mapeados (FORTIN, 1999). Podendo assim, ser usadas para analisar a heterogeneidade espacial e compreender suas funções ecológicas (CSORBA e SZABÓ, 2012).

Em sistemas socioecológicos como as cidades, a conectividade da paisagem pode ser um indicador de sistemas resilientes. A ideia de conectividade da paisagem está ligada à facilidade de movimentação dos organismos e sua importância está em propiciar a dispersão, interações entre espécies e a própria evolução, entre outros. (LOOKINGBILL et al. 2022). Essa definição está diretamente ligada aos sistemas biofísicos e, mais especificamente, à forma como as espécies se movimentam no espaço. Nos sistemas urbanos, por sua vez, a conectividade entre os elementos possui estreita relação com o sistema viário.

Pode-se supor que uma maior conectividade pode contribuir para uma maior resiliência urbana, à medida em que oferece diferentes possibilidades de se chegar aos pontos de destino. Dill (2003), destaca que a conectividade pode reduzir as distâncias de viagem para qualquer modal, contribuindo para uma gama mais alta de opções a escolher. A partir do estudo de diversos campos, como transporte, planejamento urbano, geografia e ecologia da paisagem a autora estabelece uma série de métricas de conectividade passíveis de aplicação no espaço urbano, com focos diversos. As métricas mais voltadas para a conectividade das vias coletadas pela

autora foram [1] Densidade dos blocos, [2] Densidade de interseções, [3] Densidade de Ruas, [4] Taxa de nós conectados e [5] Proporção nó/ligação (Figura 4).

Broach (2018), também se utiliza de parte dessas métricas – Densidade de interseções, Taxa de nós conectados, Extensão dos blocos e Densidade da rede –, demonstrando que elas se mantêm significativas como referência para a medição da conectividade em redes multimodais. Seu estudo parte do princípio de que as medidas de densidade de rede avaliam as opções de deslocamento, permitindo a identificação das redes mais resilientes.

O desenvolvimento de métricas de paisagem foi possibilitado pelo desenvolvimento do GIS, de técnicas de análise espacial e da geoestatística (cf. ANTROP e VAN EETVELDE 2017; FARINA, 2006; CARDILLE e TURNER, 2002; CSORBA e SZABÓ, 2012), tendo assim, uma relação intrínseca com as ferramentas digitais. Em um contexto em que as mídias espaciais estão cada vez mais presentes, as ferramentas cartográficas digitais possibilitam não apenas um registro visual das características geográficas, mas também geram possibilidades de análise e se mostram como importantes bases de dados para identificar transformações ao longo do tempo (CRAMPTON, 2009), e podem ampliar as capacidades de avaliação com simulações de longo prazo ou experimentos que comprometeriam a integridade dos sistemas em estudo (GREEN et al., 2006). Nesse cenário, softwares especializados e geotecnologias têm sido cada vez mais utilizados na avaliação das métricas da paisagem (cf. SIQUEIRA et al. 2013).

Ferramentas Digitais: GIS e Lógicas Algorítmico-paramétricas

A busca por um equivalente ao BIM para o contexto da cidade, ainda não tem um resultado definido, no entanto, parece haver um direcionamento conceitual no sentido de definir CIM como um banco de dados espacializado capaz de contribuir na análise, planejamento, projeto, gestão e monitoramento dos sistemas urbanos, servindo como suporte tecnológico à gestão de cidades.

Xu et al. (2014), apontam o CIM como uma estrutura de integração para o grande volume de dados produzidos para as cidades, permitindo que dados geográficos, de edificações, infraestrutura e propriedade, entre outras, sejam coordenados para a extração de informações. Desta forma, o uso de Sistemas de Informações Geográficas (GIS) no planejamento urbano como ferramentas de apoio à decisão e,

seria ampliado através da integração com CAD (Computer Aided Design), se tornaria uma ferramenta de suporte à análise e projeto (GIL, ALMEIDA e DUARTE, 2011).

Os Sistemas de Informações Geográficas (GIS) partem do princípio de que o armazenamento de informações geográficas pode ser mais interessante do que a planificação apresentada nos mapas existentes até então (LAURINI, 2019), são definidos como sistemas de computador que permitem coleta, manutenção, armazenamento, análise de dados e informações espaciais baseados em mapas e outros

dados geográficos (DEMERS 2009, BOLSTAD, 2019). Esse tipo de sistema consegue atribuir dimensionalidade e descrições aos elementos representados. A maioria deles contém tabelas de banco de dados que permitem armazenar todos os tipos de informações descritivas sobre os pontos, linhas, áreas e superfícies representadas (DEMERS, 2009).

Métrica	Definição	Forma de aferição	Referência
Densidade de blocos	áreas de terreno cercadas por ruas. menor polígono totalmente fechado delimitado por recursos como estradas ou riachos por todos os lados.	o aumento da densidade de blocos represente maior conectividade – mais blocos significam blocos menores e mais interseções.	Cervero e Kockelman (1997) Cervero e Radisch (1995) Frank et al. (2000)
Densidade de interseção	número de interseções por unidade de área, por ex. milha quadrada.	Um número maior indicaria mais interseções e, presumivelmente, maior conectividade.	Cervero e Radisch (1995) Cervero e Kockelman (1997) Reilly (2002)
Densidade da Ruas	número de milhas lineares de ruas por milha quadrada de terra (ou quilômetros por quilômetro quadrado).	Um número maior indicaria mais ruas e, presumivelmente, maior conectividade	Handy (1996) Mately et al. (2001)
Taxa de nós conectados	número de cruzamentos de ruas dividido pelo número de cruzamentos mais becos sem saída. O valor máximo é 1,0.	Números mais altos indicam que há relativamente poucas vias sem saída e, teoricamente, um maior nível de conectividade. Valores abaixo de 0,5 são insuficientes e acima de 0,7 são desejáveis.	Allen (1997) Song (2003)
Proporção nó/ligação	número de ligações dividido pelo número de nós dentro de uma área de estudo.	As ligações são definidas como segmentos de estrada ou caminho entre dois nós. Os nós são pontos de interseção ou terminais das ligações. Sugere-se uma relação nó/ligação de 1,4	Ewing (1996)

Figura 4. Métricas de conectividade. Fonte: Dill (2013) compilado pelo autor

Sistemas GIS não são exclusivamente bidimensionais, mas ainda encontram dificuldades em processar e manipular mais de duas dimensões (ABDUL-RAHMAN e PILOUK, 2007), softwares populares como o QGIS ou o ArcGIS, já contam com suporte tridimensional, porém, a estrutura de organização dos bancos de dados e a capacidade de processamento ainda são limitadores para aplicação deste tipo de tecnologia em grandes escalas e com alto grau de detalhamento.

Ferramentas CAD, e mais especificamente aquelas pautadas nas lógicas algorítmico-paramétricas contam com um suporte tridimensional nativo que pode ser capaz de ampliar as possibilidades do GIS aliando armazenamento de dados à produção de informações, além da automação de processos, e dos sistemas generativos.

A modelagem paramétrica surge na década de 1980 modificando a forma de se criar objetos e permitindo a automatização de modificações e ajustes de acordo com o controle do usuário ou mudança do contexto. Tais possibilidades surgem da mudança da lógica de modelagem. Objetos construídos a partir da atuação direta em sua geometria, são substituídos pela descrição processual a partir da composição de regras e parâmetros que determinam a geometria, somando-se a isso, a especificação de propriedades e recursos não geométricos. Assim, surgem novas possibilidades de interação, ajustes e variações permitindo que objetos paramétricos gerem geometrias complexas, até então impossíveis ou impraticáveis (EASTMAN et al 2014). Além disso, com a capacidade de modificação de parâmetros e de alterações constantes, modelos paramétricos podem contribuir para a criação de propostas flexíveis e para a geração de variações de projeto dentro de um ambiente controlado, fazendo com que os processos de projeto e de planejamento urbano possam ser beneficiados por métodos computacionais (LIMA et al. 2020).

Composição do Sistema Computacional

O artefato proposto para solucionar o problema de pesquisa é um conjunto de algoritmos capazes de sistematizar os dados espaciais de uma região e gerar os cruzamentos necessários para demonstrar o potencial da modelagem de informações na escala das cidades.

O processo (Figura 5) se inicia a partir da obtenção dos dados referentes aos elementos que compõem a estrutura de circulação da cidade – vias, caminhos e estradas vicinais –, as referências de posicionamento dos riscos de interesse para o estudo – áreas de suscetibilidade à inundação – os pontos de localização dos equipamentos a serem avaliados – escolas municipais, estaduais e particulares – e, por fim, os limites usados como referência para o planejamento urbano local – perímetro urbano e regiões de planejamento –, todos em formato *shapefile* específico de ferramentas GIS. Com o apoio de ferramentas específicas para leitura deste tipo de arquivo, esses dados são importados no Grasshopper/Rhinoceros. A partir dessa importação e da classificação das entradas por tipos, os dados passam a estar disponíveis no ambiente para as manipulações necessárias ao estudo.

Após reconhecimento e classificação dos dados, são estabelecidas operações para identificar as figuras geométricas e suas características básicas, como vértices e arestas e a coincidência entre pontos e superfícies. Os graus de risco são apresentados como polígonos distribuídos ao longo do perímetro do município. A linhas que configuram o sistema viário são formadas por conjuntos de segmentos, os pontos terminais de cada uma dessas linhas são identificados e considerados os pontos de conexão. Através de ferramentas que identificam a coincidência entre esses pontos e os polígonos que conformam as áreas de suscetibilidade identificam-se as conexões afetadas por cada grau de risco. Processo semelhante foi programado para as escolas, através dos pontos que representam cada uma delas, identificam-se por coincidência geométrica, identificam-se quais os tipos de escolas, afetados por cada grau de risco.

Posteriormente, a partir dos dados dos limites de território são aplicadas as métricas da paisagem, sendo que, das cinco métricas sugeridas, quatro foram possíveis de aplicação no modelo com os dados de entrada disponíveis, [1] Densidade de interseções, [2] Densidade da Ruas, [3] Taxa de nós conectados e [4] Proporção nó/lição. Por fim, são gerados os relatórios.

A [1] Densidade de interseções é calculada a partir da identificação dos polígonos que conformam as regiões de planejamento da cidade e da identificação dos pontos de conexão geometricamente coincidentes. A partir da contagem desses pontos e da divisão pela área da região de planejamento se determina o número de interseções por unidade de área. A [2] Densidade de Ruas é definida a partir da identificação

das vias pertencentes a cada região de planejamento, a medição de sua extensão e a divisão pela área total da RP. Para o cálculo da [3] Taxa de nós conectados, são identificados os pontos terminais isolados das linhas do sistema viário, ou seja, aqueles que não coincidem com outros pontos terminais. A partir da contagem des-

ses pontos e da relação com o total de conexão na área de estudo se estabelece o valor da taxa. Por fim, a [4] Proporção nó/ligação é calculada através da contagem das linhas que compõem o sistema viário e do número de conexões existentes na

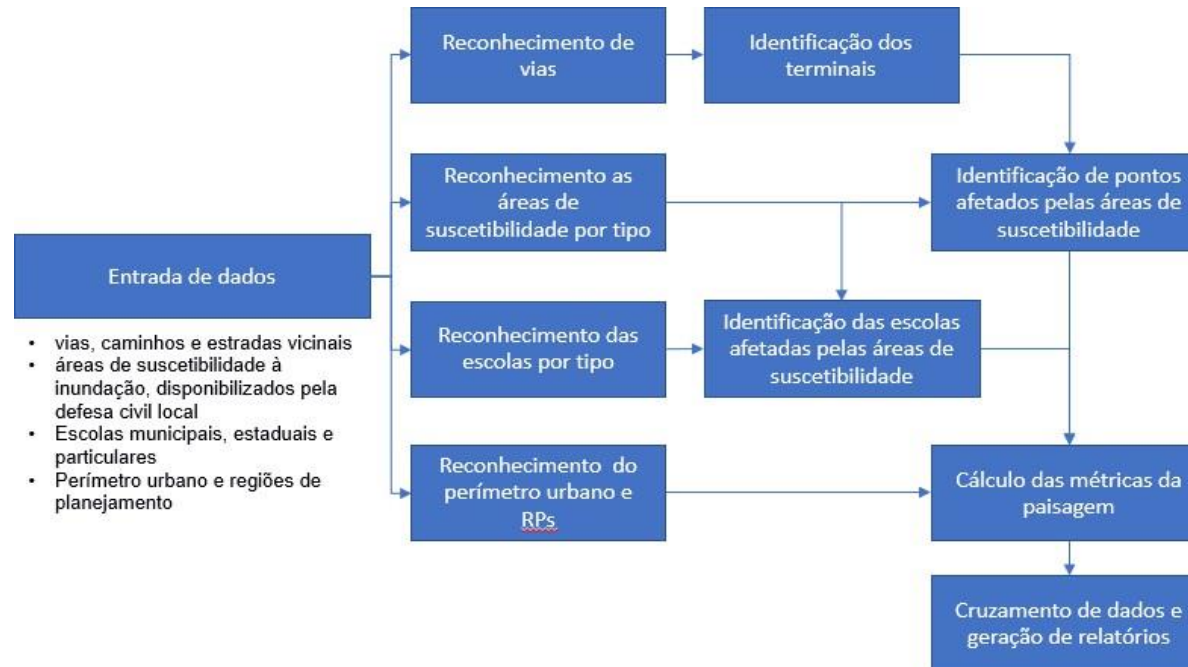


Figura 5. Fluxo de ações nos algoritmos de análise. Fonte: autor

Resultados obtidos

A partir das análises desenvolvidas com os algoritmos, foi possível identificar que 309,36Km de vias do município estão localizadas em áreas suscetíveis à inundação, sendo que, nessas áreas estão localizadas 24,2% das 24358 conexões existentes (Figura 6).

Complementando a análise, foram calculadas as métricas apresentadas por Dill (2003): [1] Densidade de interseção – número de interseções por unidade de área –, [2] Densidade da Ruas – extensão das vias por unidade de área –, [3] Taxa de nós conectados – total de cruzamentos divididos por cruzamentos mais vias sem saída – e [4] Proporção nó/ligação – número de conexões totais dividido pelo número de nós dentro de uma área de estudo, os resultados podem ser verificados na Figura 7, abaixo.

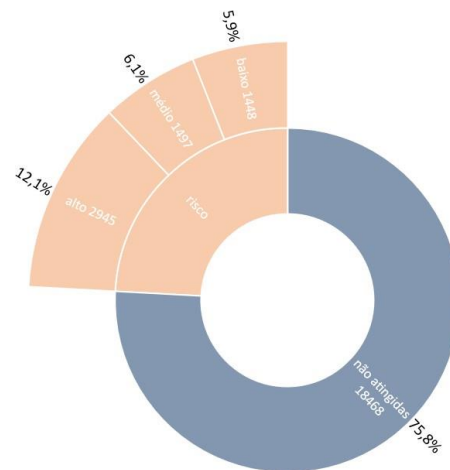


Figura 6. Nós da rede viária do município e zonas de suscetibilidade. Fonte: autor

	Norte	Nordeste	Oeste	Centro oeste	Centro	Leste	Sudeste	Sul
Conexões totais	4348	3414	3196	2843	3823	2299	2068	2359
Conexões/Km²	11,012	68,566	46,002	48,474	297,865	39,899	47,159	37,287
Conexões Afetadas	1925	923	421	1179	975	88	207	172
Percentual de conexões afetadas	44,27	27,04	13,17	41,47	25,50	3,83	10,01	7,29
Conexões Afetadas/Km²	4,875	18,537	6,059	20,102	75,966	1,527	4,720	2,719
Densidade de Vias	0,0006	0,0037	0,0032	0,0028	0,0157	0,0025	0,0032	0,0026
Taxa de nós conectados	0,871	0,834	0,850	0,881	0,937	0,864	0,874	0,847
Proporção nós/ligações	0,607	0,597	0,607	0,603	0,645	0,602	0,632	0,638

Figura 7. Métricas identificadas para as regiões de planejamento. Fonte: o autor

Escolas	Risco Baixo	Risco Médio	Risco Alto	Total
Municipais	6	6	10	104
Estaduais	5	6	6	49
Particulares	12	10	12	159
Total	23	22	28	312

Figura 8. Escolas locais por tipo e zonas de suscetibilidade. Fonte: o autor

Ao apresentar tais métricas, Dill (2003) não estabelece valores de referência, para [1] Densidade de interseção e [2] Densidade da Ruas, porém, define que, números maiores significam melhor qualidade do espaço à medida em que significam mais elementos em uma área e, por consequência, presumivelmente, maior conectividade. Para [3] Taxa de nós conectados, números mais altos indicam poucas vias sem saída e, teoricamente, um maior nível de conectividade, no caso, valores abaixo de 0,5 são insuficientes e acima de 0,7 são desejáveis, já para a [4] Proporção nó/ligação o valor de referência é aproximadamente 1,4.

No geral, a região central, se confirma como a que apresenta os melhores resultados, em grande parte devido às características comuns a essas regiões, com ocupações consolidadas e distribuição de infraestrutura de forma mais homogênea. Além dela, Nordeste, Oeste e Sudeste são, nesta ordem, as de melhores índices. Com relação à [3] Taxa de nós conectados, todas as regiões estão acima do nível desejado. Por fim, quanto à [4] Proporção nó/ligação, os valores são significativamente menores do que a referência sugerida. Desta forma, percebe-se que as regiões de planejamento analisada oferecem boas condições de conectividade. Conectividade esta, fator importante quando incluímos nas análises a infraestrutura social, mais especificamente as escolas, que somam um total de 73, equivalente a 23,39% do total, em áreas suscetíveis a inundações (Figura 8).

Como se vê, aproximadamente uma a cada quatro escolas locais estão em áreas com algum grau de risco de inundações. Especificamente por tipos, em números relativos, percebe-se que 21,2% das escolas municipais, 34,7% das escolas estaduais, e 21,4% das escolas particulares (Figura 9). Vale ressaltar que o sistema educacional do ensino básico local é composto por [1] escolas municipais, normalmente focadas no ensino fundamental 1 – de 6 a 10 anos –, e [2] escolas estaduais,

direcionadas ao ensino fundamental 2 e ensino médio – de 11 a 14 anos e de 15 a 17 anos, respectivamente –. As [3] escolas particulares podem ser especializadas, mas usualmente englobam todos os ciclos do fundamental e médio.

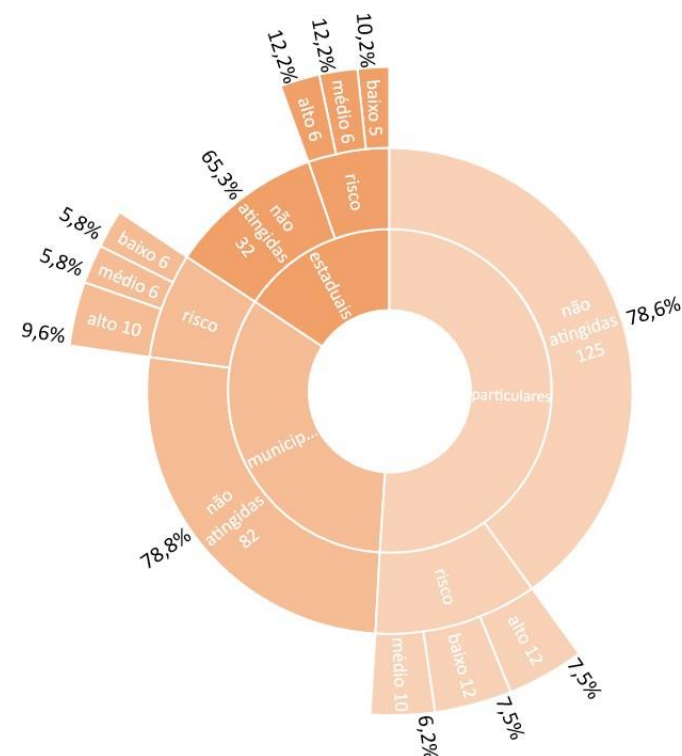


Figura 9. Escolas locais por tipo e zonas de suscetibilidade. Fonte: autor

Considerações finais

Percebe-se, ao se analisar o processo de desenvolvimento da ferramenta, que a integração entre GIS e lógicas algorítmico-paramétricas traz diversas possibilidades diferentes. Para o caso específico das relações entre áreas de suscetibilidade e localização de escolas, a verificação visual poderia trazer resultados semelhantes, sem a necessidade de especialização da programação, ainda que o tempo necessário para o estudo, em si, possa ser mais estendido nos métodos tradicionais. Já na questão relacionada a conectividade do sistema viário, devido ao volume de dados e ao conjunto de contagens e operações necessárias, a ferramenta desenvolvida se apresenta como uma solução a ser considerada em trabalhos semelhantes.

Vale ressaltar que a forma como a ferramenta foi produzida permite a alteração de elementos de análise, desde que disponíveis em suportes semelhantes. Seria possível, apenas com a mudança do arquivo shapefile base, estabelecer as mesmas análises para creches, equipamentos de saúde ou qualquer outro equipamento apresentado em forma de pontos geolocalizados. O mesmo vale para áreas de suscetibilidade a diferentes tipos de risco, se disponíveis em shapefiles compostos na forma de polígonos. Reafirmando a importância do desenvolvimento de tais ferramentas, mesmo com o nível de conhecimento e tempo necessários para tal.

Outro ponto a ser considerado é o potencial de expansão do sistema, visto que, territorialmente, sua utilização independe da escala do estudo, implicando apenas em tempo de processamento. E em relação ao recorte temático, existe a possibilidade de inclusão de novos aspectos e funcionalidades complementando sua utilidade, na direção da construção de sistemas de modelagem de cidades mais complexos, seja pela ampliação dos equipamentos de interesse ou das redes de suporte a eventos extremos. O fato de utilizar um suporte capaz de tratar o ambiente em análise tridimensionalmente, também apresenta um considerável potencial de ampliações futuras reconhecendo a grande diversidade de possibilidades abertas neste campo para integração dos processos humanos aos digitais

Um ponto a ser melhor aferido é a precisão tanto dos dados de entrada quanto das informações produzidas, visto que os resultados são gerados de forma automatizada e, com o volume de dados utilizados, a conferência ponto a ponto pode ser inviável. Em função disso, para este estudo, foram adotadas medidas de controle geral, aplicando comandos de eliminação de dados duplicados e, principalmente o

desenvolvimento da ferramenta usando espaços reduzidos favorecendo os testes, para posterior aplicação no cenário de análise completo.

Em relação às informações produzidas, foram identificados pontos interessantes para a discussão, seja pela identificação do volume considerável de vias e equipamentos afetados, ou pelas especificidades das interferências por tipo de escola, podendo indicar estudos futuros para uma melhor compreensão da relação entre as condições sociais e a distribuição espacial dos equipamentos em áreas de risco.

Referências

- ABDUL-RAHMAN, A e PILOUK, M. **Spatial data modeling for 3D GIS**. Berlin: Springer, 2007.
- ALLEN, E. **Measuring the New Urbanism with Community Indicators**. In: PABLE B., MCCLENDON, B. W. (ed.). **Planning 1997: Contrasts and Transitions**. Proceedings of the APA National Planning Conference. San Diego: American Planning Association, 1997
- ANTROP, M. Van EETVELDE, V. **Landscape Perspectives, The Holistic Nature of Landscape**. Dordrecht: Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1183-6_8
- BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T. **Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities**. Washington: Islands Press, 2006. Pp. 109-14.
- BOLSTAD, P. **GIS Fundamentals - A First Text on Geographic Information Systems**. Ann Arbor: XanEdu, 6a. ed., 2019.
- TWADDELL, H. et al. **Guidebook for Measuring Multimodal Network Connectivity**. Washington D.C: U.S. Department Of Transportation, 2018. 76 p.
- CARDILLE, J. A. e TURNER, M. G. Understanding Landscape Metrics I. in: GERGEL, S. E. e TURNER, M. G. **Learning Landscape Ecology: a Practical Guide to Concepts and Technique**. New York: Springer-Verlag, 2002.
- CERVERO, R. e KOCKELMAN, K. Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design. **Transportation Research D**, v.2, 1997, p. 199-219. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(97)00009-6)

- CERVERO, R. e RADISCH, C. Travel Choices in Pedestrian Versus Automobile Oriented Neighborhoods. **Transport Policy**, v.3, 1995, 127-141. [https://doi.org/10.1016/0967-070X\(96\)00016-9](https://doi.org/10.1016/0967-070X(96)00016-9)
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações da Cidade de Juiz de Fora**. Brasília: Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2022.
- CRAMPTON, J. Cartography: maps 2.0. **Progress in Human Geography**. n.33, v.1, 2009, Pp. 91–100. <https://doi.org/10.4135/9781446201046>
- CSORBA, P. e SZABÓ, S. The Application of Landscape Indices in Landscape Ecology. In: TIEFENBACHER, J. P. **Perspectives on Nature Conservation – Patterns, Pressures and Prospects**. London: IntechOpen, 2012.
- DE JONG, M., et al. Sustainable–smart–resilient–low carbon–eco–knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. **Journal of Cleaner Production**, v. 109, 2015, p. 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.004>.
- DEMERS, M.N. **GIS For Dummies®**. Hoboken: Wiley Publishing, 2009.
- DILL, J. Measuring Network Connectivity for Bicycling and Walking. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (org.). **Transportation Research Board 83rd Annual Meeting Compendium of Papers**. Transportation Research Board: Washington DC, 2004.
- DRAMSTAD, W. et al. **Landscape ecology principles in landscape architecture and land-use planning**. Washington DC: Island Press, 1996.
- EASTMAN, C. M. et al. **Manual de BIM: Um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- EWING, R. **Best Development Practices: Doing the Right Thing and Making Money at the Same Time**. American Planning Association: Chicago, 1996.
- FARINA, A. **Principles and methods in landscape ecology**. London: Chapman & Hall, 1998.
- FARINA, A. **Landscape ecology in action**. Dordrecht: Springer, 2012.
- FORMAN, R. **Land Mosaics: The Ecology of Landscape and Regions**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- FORMAN, R. T. T., e GODRON, M. Patches and structural components for a landscape ecology. **BioScience** n. 31, v. 10, 1981, Pp. 733-740. <http://dx.doi.org/10.2307/1308780>
- FRANK, L. D. et al. Linking land use with household vehicle emissions in the central Puget Sound: methodological framework and findings. **Transportation Research Part D**, v.5, 2000, p.173-196. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(99\)00032-2](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(99)00032-2)
- GIL, J.; ALMEIDA, J.; DUARTE, J. The backbone of a City Information Model (CIM): Implementing a spatial data model for urban design. In: **Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe**, 29., 2011, Ljubljana. Proceedings...Ljubljana, University of Ljubljana/ Faculty of Architecture, 2011.
- GODSCHALK, D. R. Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities. **Natural Hazards Review**, v. 4, n. 3, 2003, p. 136–143. [http://doi.org/10.1061/\(Asce\)1527-6988\(2003\)4:3\(136\)](http://doi.org/10.1061/(Asce)1527-6988(2003)4:3(136))
- GREEN, D. G. et al. **Complexity in Landscape Ecology**. Dordrecht: Springer, 2006.
- GUNDERSON, L. H. e HOLLING, C. S. **Panarchy: understanding transformations in human and natural systems**. Washington DC: IslandPress, 2002.
- HANDY, S. Urban form and pedestrian choices: Study of Austin neighborhoods. **Transportation Research Record**, v.1552, n.1, 1996, p.135-144.
- IALE - International Association for Landscape Ecology. **About IALE**. Acesso em 25/02/2021: <https://www.landscape-ecology.org/about-iale.html>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados**. Brasília: IBGE, 2023. Acesso em 03/03/2024: <https://censo2022.ibge.gov.br/apps/pgi/#/mapa/>
- LANG, S. et al. Landscape metrics - A toolbox for assessing past, present and future landscape structure. In: BENDER, O. et al. **Geoinformation Technologies for Geocultural Landscapes - European Perspectives**, Boca Raton: CRC Press, 2009.

LAURINI, R. Some Philosophical Issues Regarding Geometric Modeling for Geographic Information and Knowledge. In: TAMBASSI, T. **The Philosophy of GIS**. Cham: Springer International Publishing, 2019.

LIMA, F. et al. Lógica algorítmica-paramétrica e urbanismo: uma revisão teórica e de modelos computacionais para projetos urbanos. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.15, n. 2, p.84-97, 2020. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.162710>

LOOKINGBILL, T. R. et al. Connectivity in the Urban Landscape (2015–2020): Who? Where? What? When? Why? and How? **Current Landscape Ecology Reports**, v. 7, n. 1, 2022, p. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40823-021-00068-x>

LU, P.; & STEAD, D. Understanding the notion of resilience in spatial planning: A case study of Rotterdam, The Netherlands. **Cities**, v. 35, p. 200–212. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.06.001>

MATELY, M. et al. Pedestrian Travel Potential in Northern New Jersey. **Transportation Research Record**, v.1705, n.1, 2000, p.1-8. <https://doi.org/10.3141/1705-01>

METZGER, J. P. O QUE É ECOLOGIA DE PAISAGENS? **Biota Neotropica**, v.1, n.1, 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/S1676-06032001000100006>

O'NEILL, R. V. Theory in landscape ecology. In: WIENS, J.A. e MOSS, M.S. **Issues and Perspectives in Landscape Ecology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

REILLY, M.; LANDIS, J. **The Influence of Urban Form and Land Use on Mode Choice - Evidence from the 1996 Bay Area Travel Survey**. Berkeley: University of California, 2002.

ROCHA, N. A. et al. Conflitos das dinâmicas de transformação urbana e ambiental à luz da ecologia da paisagem. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 7, n. 1, 2016. PP. 23-34. doi: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i1.8644222>.

SIQUEIRA, M. N. et al. Geografia e Ecologia da Paisagem: Pontos para Discussão. **Sociedade e Natureza**, v. 25, n. 3, 2013. Pp. 557-566. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300009>

SONG, Y. **Impacts of Urban Growth Management on Urban Form: A**

Comparative Study of Portland, Oregon, Orange County, Florida and Montgomery County, Maryland. College Park, MD: University of Maryland, 2003.

TAYLOR, P. D. et al. Connectivity is a vital element of landscape structure. **Oikos**, n. 68, 1993. Pp. 571-573.

UNDRR - UN Office for Disaster Risk Reduction. **Resiliência a Catástrofes - Ferramenta de Auto-Avaliação a Nível Local: Avaliação de Nível Detalhado**. 2017. Acesso em 22/03/2022: https://mcr2030.undrr.org/sites/default/files/2021-08/UNDRR_Disaster%20resilience%20scorecard%20for%20cities_Detailed_Portuguese%20Version_updated15April2021.pdf

WAMSLER, et al. Planning for climate change in urban areas: from theory to practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 50, 2013, p. 68–81. <http://dx.doi.org/10.3390/su6031359>

XU, X. et al. From Building Information Modeling to City Information Modeling. **Journal of Information Technology in Construction** v.19, n.16, 2014.