

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ARQUITETURA
DEPARTAMENTO DE URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL**

GUILHERME KRUGER DALCIN

**SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS DO MERCADO IMOBILIÁRIO E DO AUMENTO DO NÍVEL
DO MAR NO DESENVOLVIMENTO URBANO:**

**Agentes e autômatos celulares aplicados à estimativa de cenários futuros em Imbé e
Tramandaí, RS**

Porto Alegre

2022

GUILHERME KRUGER DALCIN

**SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS DO MERCADO IMOBILIÁRIO E DO AUMENTO DO NÍVEL
DO MAR NO DESENVOLVIMENTO URBANO:**

**Agentes e autômatos celulares aplicados à estimativa de cenários futuros
em Imbé e Tramandaí, RS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Planejamento Urbano e Regional, pelo Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Orientador: Prof. Dr. Romulo Krafta

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Dalcin, Guilherme Kruger
SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS DO MERCADO IMOBILIÁRIO E DO
AUMENTO DO NÍVEL DO MAR NO DESENVOLVIMENTO URBANO:
Agentes e autômatos celulares aplicados à estimativa
de cenários futuros em Imbé e Tramandaí, RS /
Guilherme Kruger Dalcin. -- 2022.
135 f.
Orientador: Romulo Celso Krafta.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa
de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional,
Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Planejamento Urbano. 2. Simulação Computacional.
3. Modelagem Geoespacial. 4. Autômatos Celulares. 5.
Mercado Imobiliário. I. Krafta, Romulo Celso, orient.
II. Título.

RESUMO

Os municípios da porção norte do litoral do Rio Grande do Sul apresentam dinâmicas populacionais e ambientais com potencial para afetar significativamente seu desenvolvimento urbano durante as próximas décadas. Visando contribuir com a discussão acerca das políticas de planejamento de tal região, este trabalho propõe um modelo computacional - baseado em agentes e autômatos celulares - para simular como tais fenômenos poderão afetar a evolução dos municípios de Imbé e Tramandaí, situados no litoral norte gaúcho. Mais especificamente, foi realizada a modelagem: i) da alocação de atividades no território a partir das preferências dos distintos agentes urbanos; ii) da alteração dos valores do solo decorrente dessa alocação; e iii) do impacto na configuração urbana causado pelo risco de inundações devido ao aumento do nível do mar. A partir de tal proposta de modelo, foram realizadas simulações que produziram diagramas do possível desenvolvimento da área de estudo entre os anos de 2010 e 2040. Mesmo que tais resultados tenham indicado a existência de distorções no funcionamento do modelo, sua análise possibilitou a enumeração de potenciais dinâmicas futuras para o recorte espacial estudado, especialmente em relação ao seu crescimento urbano.

Palavras-chave: planejamento urbano; simulação computacional; modelagem geoespacial; autômatos celulares; agentes; mercado imobiliário.

HYBRID MODEL (CELLULAR AUTOMATA + AGENTS) FOR SIMULATING URBAN GROWTH, REAL ESTATE MARKET DYNAMICS AND SEA LEVEL RISE: a study case in the municipalities of Imbé and Tramandaí, Brazil

ABSTRACT

This study presents a proposal for a hybrid model (based on agents and cellular automata) which aims to analyse the long-term effects of sea level rise and real estate market dynamics on the urban development of coastal cities in Rio Grande do Sul, a state located in south Brazil. The model's operation is based on the Complexity Theory of Cities and seeks to simulate the study area's urban growth by simulating the process of spatial allocation of residential and commercial activities and the variations in built form and territorial attributes – such as land value and attractiveness-that result from this process. To accomplish this, specific modules were developed to determine the land value of each part of the territory through the behaviour of individual agents and to compute land attractiveness metrics through the representation of the cellular automaton as a graph. The proposed model is applied in order to simulate the urban development of Tramandaí and Imbé – two coastal municipalities in Rio Grande do Sul – through the years of 2010 to 2040. Even though such results have indicated the existence of distortions in the functioning of the model, the analysis enabled the enumeration of potential future dynamics of urban growth for the area of study.

Key-words: urban planning; computational simulation; urban modeling; cellular automata; agents; real estate market.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do território como um CA.....	14
Figura 2: Alteração dos estados de um CA.....	15
Figura 3: Evolução dos padrões de um CA.....	15
Figura 4: MAM que simula a disseminação de doenças virais.....	16
Figura 5: MAM considerando agentes diferenciados conforme faixa de renda.....	17
Figura 6: Dimensão radial de sistema urbano hipotético.....	23
Figura 7: Distribuição de frequência do tamanho dos <i>clusters</i> para sistema hipotético.....	24
Figura 8: Exemplo de cálculo do MRG para um sistema hipotético.....	26
Figura 9: Gráfico da qualidade do ajuste (MRG).....	27
Figura 10: Representação da cidade como um sistema.....	28
Figura 11: Medição da distância topológica entre dois pontos.....	29
Figura 12: Representação da lógica da medida de acessibilidade.....	30
Figura 13: Representação da lógica da medida de centralidade.....	30
Figura 14: Representação da lógica da medida de oportunidade espacial.....	32
Figura 15: Representação da lógica da medida de convergência espacial.....	32
Figura 16: Municípios do litoral norte do Rio Grande do Sul.....	39
Figura 17: Crescimento populacional dos municípios do litoral norte.....	39
Figura 18: Estimativa da população nas praias do litoral norte.....	40
Figura 19: Densidade populacional no litoral norte do Rio Grande do Sul.....	41
Figura 20: Recorte espacial a ser analisado por meio do modelo proposto.....	42
Figura 21: Estimativa de elevação do nível do mar para Tramandaí, Imbé e Osório.....	43
Figura 22: Principais conexões viárias dos municípios de Imbé e Tramandaí.....	44
Figura 23: Densidade populacional dos municípios de Imbé e Tramandaí.....	45
Figura 24: Localização dos estabelecimentos de comércio e serviços.....	45
Figura 25: Máximo de pavimentos permitidos pelos planos diretores municipais.....	46
Figura 26: Dimensões das células do CA deste estudo.....	48
Figura 27: Armazenamento das informações de cada célula como listas.....	49
Figura 28: Cálculo das medidas de oportunidade e convergência.....	51
Figura 29: Impedância das conexões entre nós da representação em grafo.....	51
Figura 30: Impedância atribuída às principais vias da área de estudo.....	52
Figura 31: Funcionamento do modelo conforme suas três principais entidades.....	57
Figura 32: Integração de dados dos agentes residenciais e das células do CA.....	62
Figura 33: Integração de dados dos agentes comerciais e das células do CA.....	63
Figura 34: Gráfico da média da população durante cada iteração das simulações.....	71
Figura 35: Síntese da evolução da distribuição espacial dos agentes.....	72

Figura 36: Detalhe da formação de pólos comerciais.....	74
Figura 37: Síntese da evolução da distribuição espacial dos agentes.....	75
Figura 38: Síntese da evolução da área construída das células.....	77
Figura 39: Síntese da evolução da convergência espacial das células.....	78
Figura 40: Efeito da limitação de alternativas de caminho na convergência espacial.....	80
Figura 41: Efeito que favoreceu o surgimento de pólos comerciais.....	80
Figura 42: Síntese da evolução da oportunidade espacial para a população permanente...	82
Figura 43: Diferenças para a oportunidade espacial entre estados inicial e final.....	83
Figura 44: Síntese da evolução da oportunidade espacial para a população temporária.....	84
Figura 45: Síntese da evolução do valor do solo das células durante as simulações.....	86
Figura 46: Síntese da evolução da renda média dos agentes nas células.....	89
Figura 47: Evolução do risco de inundação devido ao aumento do nível do mar.....	90
Figura 48: Ação do risco de inundação na quantidade de unidades construídas.....	91
Figura 49: Ação do risco de inundação no valor do solo de células.....	92
Figura 50: Resultados numéricos da qualidade do ajuste.....	93
Figura 51: Diferenças observadas entre simulação e realidade.....	94
Figura 52: Dimensão radial gerado para três simulações para a iteração final.....	96
Figura 53: Gráfico da frequência dos tamanhos de <i>clusters</i>	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Elementos que compõem o atributo de carregamento.....	50
Quadro 2: Atributos das células do CA.....	54
Quadro 3: Atributos dos agentes.....	56
Quadro 4: Referências para inicialização de agentes populacionais e células territoriais.....	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 SISTEMAS COMPLEXOS E AUTO-ORGANIZADOS	10
2.2 AUTÔMATOS CELULARES E AGENTES	13
2.3 VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS COMPLEXOS	19
2.4 ESTUDOS CONFIGURACIONAIS URBANOS	27
2.5 REFERÊNCIAS DE MODELOS DE SISTEMAS URBANOS COMPLEXOS	33
3. METODOLOGIA	38
3.1 OBJETO DE ESTUDO: LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL	38
3.2 PROPOSTA DE MODELO PREDITIVO DO DESENVOLVIMENTO URBANO	47
3.2.1 Autômato Celular (CA)	48
3.2.2 Agentes urbanos	54
3.2.3 Empreendedor imobiliário	56
3.2.4 Processo geral de simulação	57
3.3 INTEGRAÇÃO DO MODELO COM BASES DE DADOS DA ÁREA DE ESTUDO	59
3.3.1 Estado inicial do modelo	60
3.3.2 Variação populacional durante as simulações	64
3.3.3 Aumento do nível do mar	65
3.4 EXECUÇÃO DE SIMULAÇÕES E REPRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	66
3.5 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	68
4. RESULTADOS	70
4.1 EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE AGENTES	70
4.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS AGENTES	71
4.3 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS AGENTES COMERCIAIS	74
4.4 QUANTIDADE DE UNIDADES CONSTRUÍDAS	76
4.5 CONVERGÊNCIA ESPACIAL	77
4.6 OPORTUNIDADE ESPACIAL	81
4.7 VALOR DO SOLO	85
4.8 RENDA MÉDIA DOS AGENTES	88
4.9 AUMENTO DO NÍVEL DO MAR	90
4.10 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	92
4.10.1 Qualidade do Ajuste	92
4.10.2 Dimensão Radial	95
4.10.3 Distribuição da frequência dos tamanhos dos clusters	97
5. CONCLUSÕES	99
5.1 DESENVOLVIMENTO URBANO DA ÁREA DE ESTUDO	100
5.2 AUMENTO DO NÍVEL DO MAR	101
5.3 APERFEIÇOAMENTO DO MODELO	102
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
6. REFERÊNCIAS	105
ANEXO A - Artigo da Qualificação da Pesquisa	112

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os municípios localizados na parte norte do litoral gaúcho têm apresentado as maiores taxas de crescimento demográfico do Rio Grande do Sul, contrastando com a estagnação ou decréscimo populacional da maioria das outras regiões do estado (RIO GRANDE DO SUL, 2015). Somado a isso, durante os meses de verão ocorre um aumento de até 250% da população local causado pelo deslocamento de turistas e *veranistas* até as praias ali existentes (ZUANAZZI; BARTELS, 2016). Essas dinâmicas, além de dar origem a um intenso mercado imobiliário local (KLUGE, 2015), geram desafios para a gestão dos municípios, especialmente em relação à ampliação das redes de infraestrutura para satisfazer as demandas dessa crescente ocupação urbana.

O cenário se torna ainda mais complexo porque os indivíduos que compõem esse aumento populacional apresentam perfil diversificado. Observa-se a predominância de dois grupos majoritários: de um lado, famílias ou indivíduos de alta renda – principalmente aposentados e idosos – buscando residências em áreas que propiciem lazer e conforto; do outro lado, grupos de baixa renda que primordialmente buscam inclusão no mercado de trabalho e moradias em áreas com baixo custo do solo (COREDE LITORAL, 2017). Tal diversidade dificulta a implantação de políticas socioeconômicas eficazes devido às diferentes demandas criadas por cada um desses conjuntos populacionais.

O crescimento demográfico ocasionado por tais grupos acarreta o crescimento da área urbanizada dos municípios do litoral norte. Uma vez que tal processo ocorre em uma estreita faixa situada entre o mar e o complexo de lagoas da região, sua intensificação gera preocupações quanto à degradação de elementos naturais associados ao sistema hidrográfico local (COREDE LITORAL, 2017). Inclusive, recentemente foram noticiados casos de desequilíbrios ambientais ocorridos ali, como a contaminação de córregos conectados ao mar (MATOS, 2020) e o aumento nos estragos causados por tempestades ou vendavais devido à supressão da vegetação e das dunas junto às lagoas ou à praia (GUEDES, 2020).

Tais questões ambientais já geram problemas atualmente e as expectativas para o futuro são de agravamento da situação: estima-se que o aumento do nível do mar devido às mudanças climáticas globais pode, até o final deste século, acarretar a inundação de partes das áreas urbanas do litoral norte gaúcho (CLIMATE CENTRAL, 2020; KULP; STRAUSS, 2019). Caso isso se confirme, a configuração urbana da região provavelmente sofrerá mudanças que tornarão sua gestão ainda mais complexa, tais como a saída dos residentes das áreas com risco de inundação, a variação do valor do solo decorrente desse processo, a diminuição do potencial turístico local e o surgimento de eventuais gastos com a construção de infraestruturas para contenção da água.

A combinação de todos esses fatores demográficos, socioeconômicos e ambientais torna complexo o planejamento dos municípios da região, uma vez que não é evidente quais exatamente são as dificuldades futuras que podem afetar a gestão local e quais políticas poderiam ser implementadas para contribuir com o desenvolvimento no longo prazo. Todavia, não são encontradas na literatura discussões sobre possíveis cenários da ocupação urbana do litoral norte gaúcho e sua relação com o ambiente natural, mesmo que pesquisas similares sejam recorrentes para outras regiões do mundo (CASALI; HEINIMANN, 2019; KIM; NEWMAN, 2020; LI *et al.*, 2013; TABERNA *et al.*, 2020). Nestas, geralmente são empregados modelos baseados em autômatos celulares e agentes para especular como a configuração das cidades se modificará conforme diversas possibilidades de futuro (CROOKS; PATEL; WISE, 2014; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015), de modo a facilitar a compreensão dos efeitos de políticas públicas e informar a discussão em torno de decisões de planejamento urbano (LEVY; MARTENS; VAN DER HEIJDEN, 2016; ZELLNER; CAMPBELL, 2015).

Este trabalho visa contribuir com tal conjunto de estudos, analisando como os referidos fenômenos observados no litoral norte gaúcho podem influenciar seu desenvolvimento urbano futuro. O objetivo geral é elaborar um modelo computacional – baseado em agentes e autômatos celulares – que possibilite a simulação de tais fatores característicos da região por meio da reprodução da alocação de atividades no território, da alteração dos valores do solo decorrente dessa alocação e do impacto causado pelo risco de inundações devido ao aumento do nível do mar. A expectativa é que as análises realizadas com auxílio de tal modelo possam contribuir com a discussão em torno de políticas de planejamento e sirvam de referência para futuras pesquisas que venham a desenvolver ferramentas similares.

A apresentação deste estudo se divide em quatro partes. Inicialmente, é exposta a revisão bibliográfica dos conceitos de sistemas urbanos complexos e modelagem computacional relevantes ao trabalho. Estes fundamentam a descrição dos aspectos metodológicos da proposta de modelo computacional e da análise da área de estudo – os municípios de Tramandaí e Imbé, Rio Grande do Sul. Por fim, são expostos os resultados das simulações realizadas utilizando o referido modelo e são feitas as considerações finais sobre o estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho procura analisar cenários futuros para os municípios do litoral norte por meio da elaboração de um modelo baseado em agentes e autômatos celulares. Para tanto, utiliza-se como base o enquadramento da cidade dentro dos conceitos da teoria da complexidade, cujo tema central é, simplificada, explicar como ocorre o surgimento de uma ordem geral em sistemas a partir das ações locais e descentralizadas de seus componentes individuais (BATTY, 2007a). Visando contextualizar esse quadro teórico, a revisão bibliográfica apresenta os conceitos referentes à teoria da complexidade aplicada às cidades, os quais são complementados pela descrição das técnicas de modelagem urbana de interesse para este estudo e pelos instrumentos existentes para validação dos resultados de suas simulações. Por fim, nas últimas seções deste capítulo, é introduzida a abordagem configuracional de estudos urbanos, cujas medidas são utilizadas no modelo proposto como indicativo dos privilégios locacionais de um ponto na cidade, e são apresentados modelos urbanos utilizados como referência para o presente trabalho.

2.1 SISTEMAS COMPLEXOS E AUTO-ORGANIZADOS

Batty (2007b) define sistemas complexos como sistemas compostos por outros sistemas de comportamento também complexo. O que torna complexo tal comportamento é o fato dele não pode ser descrito cientificamente de modo que seja possível deduzir o seu estado exato em um instante no tempo a partir de um número finito de parâmetros (BATTY, 2007a; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Seres humanos e elétrons são dois exemplos distintos de componentes que originam sistemas complexos: por mais que sejam conhecidas regras que descrevem seu comportamento geral, não há como antever as ações exatas que um único indivíduo irá realizar em um momento específico do futuro (ALLEN, 1997; GLEICK, 2011; PORTUGALI, 1997).

Ainda conforme Batty (2007b), tais sistemas complexos se caracterizam pela existência de processos endógenos e descentralizados de organização que influenciam a forma do sistema em sua macroescala. Em outras palavras, o resultado das interações entre componentes contribui para conformar os padrões observados no sistema como um todo, podendo-se dizer que ele se organiza em sentido *bottom-up*, de baixo para cima. Dessa ideia decorre que, se tais componentes possuírem a capacidade de modificar seu comportamento quando seu ambiente se modifica, então o resultado das interações entre eles também irá se alterar, sendo possível afirmar que a organização do sistema responde – ou se adapta – a estímulos externos.

A cidade é um sistema que pode ser classificado como complexo (BATTY, 2007a). Ela é constituída por componentes materiais – sua forma construída – e por componentes vivos, os seres humanos que a habitam, e a sua complexidade se deve justamente a estes últimos – também chamados de agentes urbanos – os quais são, por si só, complexos devido a sua capacidade cognitiva e a suas limitações de racionalidade (PORTUGALI, 2016). São as interações destes agentes entre si, com o território e com o ambiente construído que ocasionam as dinâmicas internas características de sistemas complexos: auto-organização, emergência, funcionamento fora do equilíbrio, não linearidade, causalidade circular, dependência de percurso e robustez (BATTY, 2007b; PORTUGALI, 2016).

A **auto-organização** das cidades se deve ao fato do comportamento dos agentes urbanos não ser condicionado exclusivamente por estímulos *top-down*, como regras governamentais ou fenômenos naturais. Ele também é conformado por fatores que surgem espontaneamente e endogenamente no sistema devido às interações entre esses agentes, como regras socioculturais e associações de indivíduos em torno de determinadas causas. Essas dinâmicas dão origem a processos de auto-organização que conferem ao sistema a referida capacidade de se adaptar a externalidades (ALLEN, 1997; PORTUGALI, 1997).

Emergência pode ser definida como o surgimento de padrões na macroescala devido a inúmeras ações independentes e não coordenadas ocorridas na microescala (MORONI; COZZOLINO, 2019). É a aparição de uma ordem que não foi projetada previamente, mas que se estabelece espontaneamente a partir da auto-organização dos componentes do sistema, influenciando este em sentido *bottom-up*. A forma construída das cidades é um exemplo de fenômeno emergente, pois os padrões gerais observados no ambiente urbano não dependem apenas de ações centralizadas – tais como planos governamentais – mas são também resultado das ações e decisões que cada agente realiza individualmente e de suas interações com o ambiente construído, regramentos institucionais e fenômenos naturais (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015).

A existência de uma **cadeia de causalidade circular**, conforme Portugali (2016), significa que, em tais interações da microescala do sistema, cada agente contribui para alterar o ambiente construído ao mesmo tempo em que este mesmo ambiente modifica o comportamento do tal agente. Essa influência mútua implica que não é possível identificar com clareza relações diretas de causa e efeito para explicar os fenômenos emergentes do ambiente urbano, sendo necessário entendê-los como resultado de um sistema de influências recíprocas entre todas as entidades que compõem o sistema.

O conceito de **funcionamento fora do equilíbrio** relaciona-se com as ideias de estruturas dissipativas e entropia propostas por Allen (1997) e Portugali (1997). Conforme tais autores, as leis físico-químicas enunciam que sistemas isolados – aqueles que não

realizam trocas com o exterior – evoluem em direção a um estado termodinâmico final cuja desordem molecular – a entropia – é sempre maior do que no inicial. Porém, quando o sistema recebe energia do exterior, há a possibilidade de sua evolução apresentar uma diminuição de entropia, gerando um estado final no qual os componentes formam uma estrutura organizada ao invés de estarem desordenados. É como se a energia inserida no sistema o empurrasse no sentido contrário de seu comportamento natural do mesmo modo que o motor de um barco pode fazê-lo navegar contra a correnteza de um rio ao invés de naturalmente ser levado por ela até sua foz (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Esse conceito explica o fato das cidades não serem uma desordem completa –que seria o equivalente a um equilíbrio com entropia máxima – e nem um artefato completamente ordenado, mas algo que constantemente altera seu estado em alguma posição entre esses dois extremos (ZELLNER; CAMPBELL, 2015).

Considerando que podem existir diversos caminhos que levam um sistema a seu estado de equilíbrio – no exemplo anterior, o barco levado pela correnteza até a foz de um rio pode ter percorrido qualquer um dos múltiplos percursos possibilitados pelo sistema hidrográfico em questão – então, ao evoluir para longe de seu equilíbrio, o sistema pode seguir qualquer um desses múltiplos caminhos (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Porém, ao começar o percurso, as opções de caminhos futuros possíveis são apenas aquelas que contém todos os trechos já percorridos pelo sistema, ou seja, as alternativas de evolução oferecidas em cada bifurcação dependem do caminho percorrido em bifurcações anteriores, de modo que o comportamento do sistema possui **dependência de caminho** (BATTY, 2007b). É o que observamos em relação à forma construída no ambiente urbano: no momento que um conjunto de edificações é destruído, pode-se descartar a ocorrência das possibilidades de futuro da cidade em que tal conjunto está presente exatamente como era antes (ZELLNER; CAMPBELL, 2015).

Já o conceito de **não linearidade** é baseado na ideia de que, devido à existência de uma enorme quantidade de fatores que influenciam o estado de uma cidade e à cadeia de causalidade circular observada em suas dinâmicas internas, é impossível identificar relações claras de causa e efeito na evolução do ambiente urbano, de modo que seu comportamento aparenta não seguir uma lei determinística que o descreve com algum grau de precisão (DE ROO, 2012). Tal característica implica que dois sistemas urbanos bastante similares, mas com pequenas diferenças quase imperceptíveis, podem se desenvolver de modo bastante diferente (MITCHELL, 2011), pois há uma desproporcionalidade entre a mudança de valores das condições iniciais e seu efeito nos estados posteriores do sistema, fazendo com que, na prática, não seja possível criar regras para determinar com exatidão o futuro de uma cidade (DE ROO, 2012).

Por fim, **robustez** significa que o sistema mantém seu comportamento característico mesmo após a ocorrência de perturbações ou de remoções de subcomponentes (RAND, 2015). Essa característica pode ser exemplificada pelo fato do funcionamento das cidades não ser perceptivelmente alterado por ocorrências locais, como indivíduos deixando-a, edificações antigas sendo destruídas e novos gestores sendo eleitos (ZELLNER; CAMPBELL, 2015).

2.2 AUTÔMATOS CELULARES E AGENTES

Tais características dos sistemas complexos estão diretamente relacionadas com o seu caráter dinâmico, ou seja, com a forma como ele se modifica no tempo. Isso restringe as técnicas disponíveis para representá-los adequadamente, visto que algumas delas fornecem apenas resultados estáticos para momentos específicos no tempo, como é o caso dos modelos de macroescala que predominaram na modelagem urbana até o fim do século anterior (BATTY, 2008). Nesse sentido, a abordagem mais conveniente para a representação de sistemas complexos é a algorítmica. Por ser uma descrição operacional das etapas de um processo, o algoritmo possibilita a reprodução passo a passo dos processos responsáveis pelo desenvolvimento de uma cidade, sendo sua evolução temporal simulada com o uso de iterações¹ (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015).

Além disso, os aspectos característicos dos sistemas complexos estão diretamente relacionados com seu desenvolvimento em sentido *bottom-up*, tornando necessário que o modelo também seja capaz de representar individualmente as menores partes constituintes do sistema como entidades que interagem entre si (BATTY, 2007a). Dentre as técnicas que atendem esta demanda e a do parágrafo anterior, dois tipos de modelo se destacam devido a sua popularidade na literatura: os autômatos celulares (ou CA, abreviatura de *Cellular Automata*) e os modelos multiagentes (ou MAM, abreviatura de *Multi-Agent Models*).

O CA consiste na subdivisão do território em células, cada uma representando uma fração do espaço a ser analisado. Essas células se caracterizam por apresentar: i) um estado – ou seja, uma característica principal para a análise em questão – que assume um valor de uma lista pré-definida de possibilidades; ii) um conjunto de regras que indicam como tal estado se altera com o passar do tempo; e iii) atributos que descrevem as características do território e que são utilizados na definição das referidas regras e do modo como ocorrem as interações da célula com o restante do modelo (TORRENS, 2000a; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Os estados e atributos geralmente fornecem uma

¹ Uma iteração é um conjunto de operações repetidas continuamente em que se utiliza como estado inicial o resultado (estado final) obtido na iteração anterior.

descrição geográfica do território: cobertura do solo, ocupação, uso, densidade populacional. Enquanto as regras de mudança de estado tendem a incorporar enunciados teóricos espaciais ou econômicos referentes às dinâmicas da cidade (TORRENS, 2003).

A Figura 1 mostra como as características de um território real podem ser convertidas para serem representadas através de um CA. No exemplo, a existência de uma intersecção com a área coberta por água é um atributo de cada célula e define se ela recebe o estado “Célula de Água”, enquanto as células que não intersectam a água têm seu estado definido pelo atributo que indica a quantidade de construções que elas contêm.

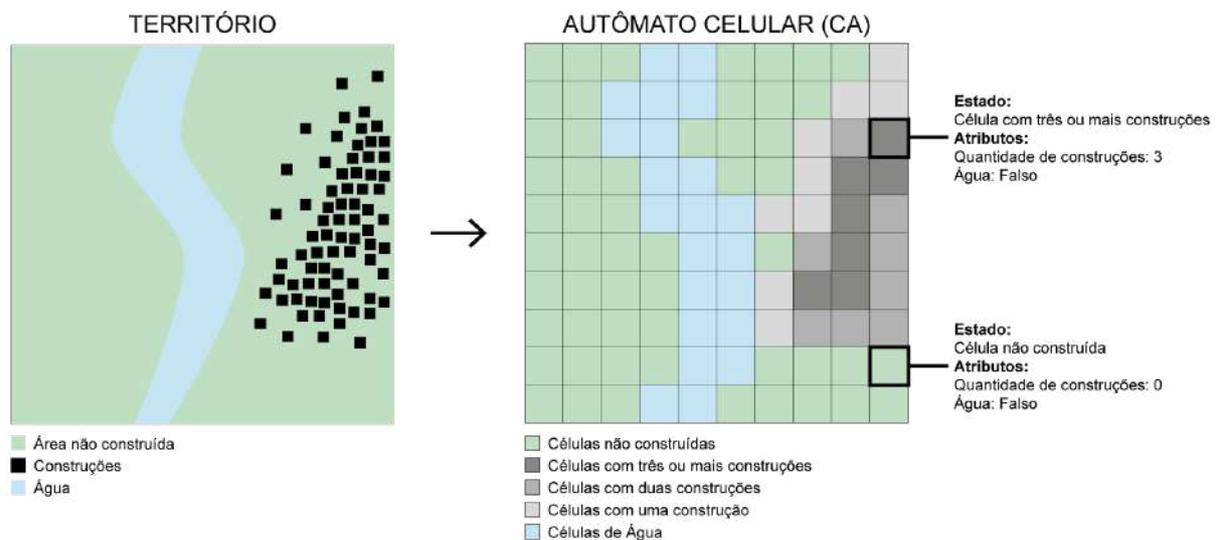


Figura 1: Representação do território como um CA. A partir da subdivisão do espaço em uma malha regular, cada célula possui atributos próprios que contribuem para a definir seu estado momentâneo.

As células do CA são imóveis e geralmente estão ordenadas em uma malha regular. Nessa disposição, cada célula possui uma vizinhança composta pelas células adjacentes a ela. Entre células vizinhas ocorre comunicação sobre estados vigentes e valores de atributos, dinâmica esta que pode ser incorporada às regras de mudança de estado das células. Essa troca de informações é o que torna o CA um modelo dinâmico, pois qualquer mudança de estado ou atributo em uma célula implica na recomputação do estado de suas vizinhas, originando um processo contínuo capaz de reproduzir padrões espaciais complexos que se modificam no tempo (TORRENS, 2003; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015).

A Figura 2 mostra um exemplo de alteração do estado de células em um CA após uma iteração. Nesse caso, utiliza-se uma regra hipotética escolhida apenas para fins de exemplificação: o número de construções em uma célula cresce em uma unidade quando duas de suas vizinhas possuem pelo menos duas construções a mais que ela. Observa-se que a definição sobre mudança ou manutenção do estado de cada célula passa pela

análise dos atributos de sua vizinhança, caracterizando um processo de troca de informação entre os elementos constituintes do modelo.

REGRA DE TRANSIÇÃO: se a célula possui pelo menos duas vizinhas com pelo menos duas construções a mais, o número de construções na célula é incrementado em uma unidade.

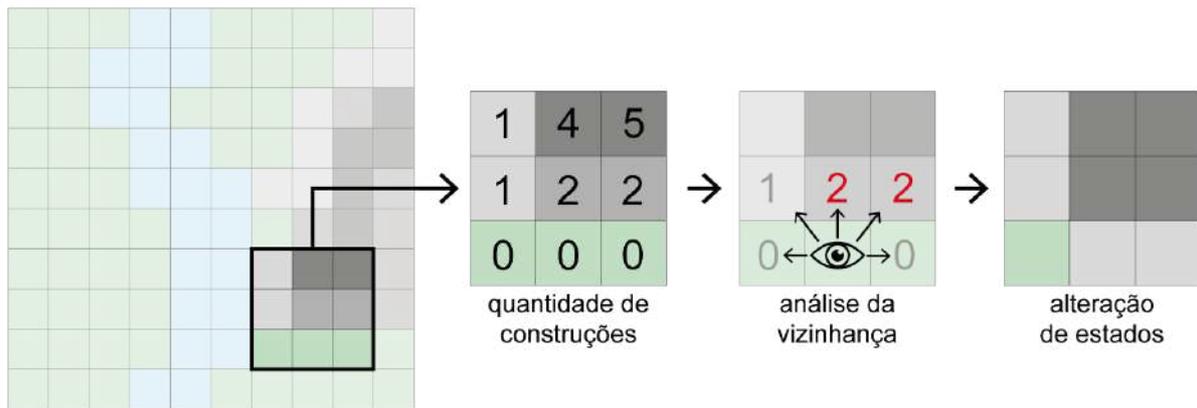


Figura 2: *Alteração dos estados de um CA. Com base na regra de transição de estados, cada célula analisa os atributos de suas vizinhas e decide por alterar seu estado ou por mantê-lo inalterado.*

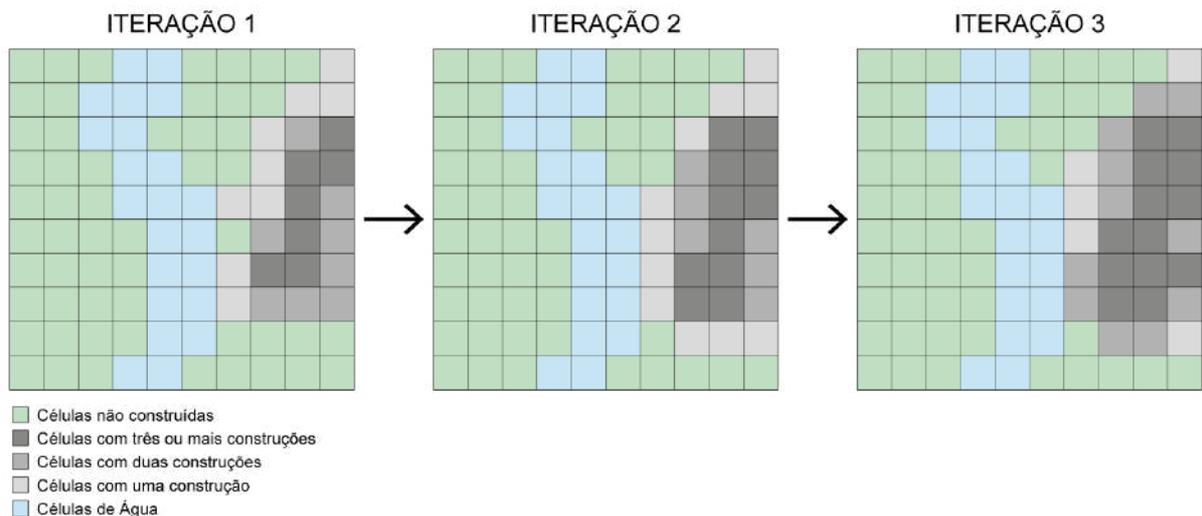


Figura 3: *Evolução dos padrões de um CA. Os estados das células podem ser alterados a cada iteração, representando fenômenos urbanos dinâmicos como o crescimento urbano ou o aumento da densidade construída. Nesta figura, utiliza-se a mesma regra de transição proposta na Figura 2.*

Tendo em vista tais definições sobre CAs, entende-se que sua utilidade geral para a modelagem urbana é possibilitar a captura das regras que determinam como o estado de uma célula muda conforme o que acontece em sua vizinhança e, coletivamente, como essas mudanças de estados geram novas configurações, permitindo ao sistema de modificar com o decorrer das iterações (LIU *et al.*, 2021). A Figura 3 exemplifica como a repetição do processo de análise da vizinhança e de alteração de estados possibilita a

representação de dinâmicas urbanas ao longo do tempo, como, por exemplo, o crescimento da área urbanizada e da densidade construída de uma localidade.

Nos MAMs, os agentes são a menor parte constituinte do sistema, e cada um deles possui estados, regras de transição e atributos próprios de modo similar ao que ocorre com as células de um CA (CROOKS; PATEL; WISE, 2014). O que diferencia os MAMs é que esses agentes são capazes de se movimentar livremente pelos limites do modelo, o que faz com que comumente eles não possuam uma vizinhança imutável (TORRENS, 2003), sendo suas interações com outros agentes realizadas de acordo com regras de proximidade ou seguindo conexões pré-definidas que simulam formas de comunicação à distância (CROOKS; PATEL; WISE, 2014; DAHAL; CHOW, 2014).

A Figura 4 exemplifica o funcionamento básico de um MAM mostrando uma possível aplicação para a simulação da disseminação de doenças virais. Em tal exemplo, os agentes possuem um de dois estados possíveis – saudável ou infectado – e, quando o agente infectado fica próximo a um saudável, este torna-se infectado pela doença também.

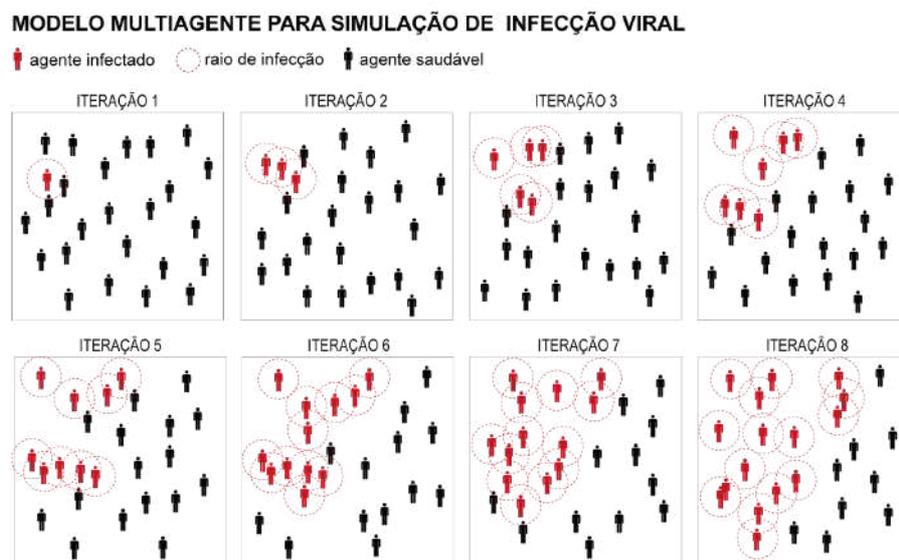


Figura 4: MAM que simula a disseminação de doenças virais. Quando um agente infectado fica próximo a um saudável, este também torna-se infectado.

Por serem entidades móveis, os agentes tornam-se independentes em relação ao território, sendo possível utilizá-los para representar o comportamento de indivíduos pertencentes aos grupos populacionais que compõem a cidade (CROOKS; PATEL; WISE, 2014). Além disso, como cada agente possui atributos próprios, os MAMs permitem que se visualize como a heterogeneidade dos agentes afeta o sistema, como mostra a Figura 5 (COLANDER; KUPERS, 2014). Ela é baseada no modelo de disseminação de doenças virais apresentado na Figura 4, mas diferencia os agentes conforme sua renda: aqueles

com maior renda têm maior probabilidade de sobreviver após serem infectados devido à capacidade de financiarem tratamentos médicos de maior qualidade. No caso usado como exemplo, agentes de baixa renda acabam falecendo nas iterações 3, 5 e 6, enquanto há só uma morte registrada em agentes de média e alta renda.



Figura 5: MAM considerando agentes diferenciados conforme faixa de renda. Quanto maior a renda, maior a probabilidade do agente sobreviver caso seja infectado.

Em aplicações referentes ao planejamento urbano, geralmente procura-se fazer com que os agentes realizem ações que correspondam a atividades reais de indivíduos na cidade: caminhar sobre determinada área, dirigir sobre a malha viária, habitar determinado local (WILENSKY; RAND, 2015). Já para as interações entre tais agentes, não há um padrão definido, sendo elas adaptadas aos objetivos do estudo em questão: em simulações de epidemias, por exemplo, a proximidade de um agente infectado com um saudável transforma o estado deste último para o de também infectado (HUNTER; MAC NAMEE; KELLEHER, 2019); em modelos de ocupação do solo, a disputa entre agentes por um mesmo local pode causar a expulsão daqueles de menor poder econômico (SANTOS *et al.*, 2017); ou ainda, em simulações do mercado imobiliário, o encontro de agentes pode representar o processo de negociação de compra de um terreno e consequente atualização do valor do solo no local (FILATOVA, 2015).

Há diversas formas de reproduzir a interação dos agentes com o território. Uma possibilidade é a utilização conjunta de CAs e MAMs em um modelo híbrido, no qual o primeiro representa a alteração do território ao longo do tempo enquanto os agentes são usados para simular fatores relativos à decisão humana nas dinâmicas urbanas (LIU *et al.*, 2021). Um dos benefícios dessa abordagem é que, criando regras para possibilitar que as

células do território modifiquem seus estados e atributos com base no comportamento dos agentes e vice-versa, torna-se possível reproduzir uma cadeia de causalidade circular conforme descrita por Portugali (2016). Devido a tais características, é comum o uso de modelos híbridos para simulações de fenômenos como o crescimento urbano e as alterações dos usos do solo em cidades (CROOKS; PATEL; WISE, 2014; DAHAL; CHOW, 2014; TORRENS, 2003).

Além de sua capacidade de reproduzir o funcionamento de sistemas complexos, os principais benefícios da aplicação de CAs e MAMs para modelagem urbana, conforme encontrado na literatura, são os seguintes aspectos:

- i) a possibilidade de se simular experimentos para situações nas quais seria inviável realizar experimentos reais, como é o caso da reprodução do funcionamento de uma cidade inteira (CASTLE; CROOKS, 2006);
- ii) sua natureza inerentemente espacial, a qual permite a produção de representações gráficas dos resultados de modo a tornar mais acessível o entendimento do que ocorreu nos experimentos simulados (TORRENS, 2000a; ZELLNER; CAMPBELL, 2015);
- iii) a flexibilidade com que os parâmetros de tais modelos podem ser alterados, possibilitando que, por meio de um processo empírico, o desenvolvedor aprenda sobre a lógica de funcionamento do sistema conforme busca entender quais as alterações no modelo tornariam seus resultados mais próximos da realidade (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015);
- iv) o potencial desse tipo de modelo de integrar diferentes escalas de análise, uma vez que, por um lado, ele é baseado na descrição do funcionamento dos componentes da microescala; mas, por outro lado, apresenta em seus resultados os padrões que emergem na macroescala do sistema (TORRENS, 2000a).

A literatura também aponta que as referidas técnicas de modelagem apresentam deficiências quanto à forma como representam a realidade. Levy, Martens e Van der Heijden (2016) defendem que, ao simplificar os fenômenos urbanos para torná-los compatíveis com as capacidades da tecnologia computacional, tende-se a criar modelos que abordam a realidade conforme uma visão individualista em que problemas são resolvidos por meio de escolhas realizadas em um vácuo social, sem a representação das diversas forças sociais, políticas, econômicas, culturais e históricas que também influenciam essas escolhas na realidade. Os autores também mencionam que há uma tendência de serem utilizadas pressuposições simplistas sobre o comportamento humano, de modo que a reprodução do

processo de tomada de decisão de um agente não leva em conta todos os aspectos da capacidade cognitiva ou da limitação de racionalidade de uma pessoa.

De fato, há limitações na capacidade dos instrumentos de modelagem em representar o processo decisório do ser humano e o funcionamento das cidades, mas elas parecem ser compatíveis com as lacunas existentes na própria teoria sobre planejamento urbano (BATTY, 2007b). São relativamente recentes as tentativas de se integrar os conhecimentos multidisciplinares acerca da urbanização em uma unificada “ciência das cidades” (BATTY, 2017). Inclusive, diversos conceitos da teoria da complexidade aplicada às cidades foram originalmente adaptados de outras áreas do conhecimento (MITCHELL, 2011), assimilação esta que não é trivial, pois em outros tipos de sistemas, como os físico-químicos, apesar de ser impossível definir com precisão o comportamento de um único componente individual - um átomo ou um elétron, por exemplo - há uma menor variação nos padrões observados na macroescala devido à existência de leis gerais que descrevem seu funcionamento (BALL, 2018; GLEICK, 2011; PORTUGALI, 1997). Os sistemas sociais, por outro lado, são compostos de organismos vivos que possuem objetivos individuais multifacetados e complexos, tornando imprevisíveis os resultados observados em qualquer escala (LEVY; MARTENS; VAN DER HEIJDEN, 2016; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Sendo assim, o papel dos modelos de sistema complexo nesse processo não é o de fornecer respostas absolutas, mas sim o de levantar novos questionamentos e reflexões sobre o funcionamento de sistemas sociais, contribuindo para informar o debate em torno de seu desenvolvimento (BATTY, 2007a).

2.3 VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS COMPLEXOS

Outra crítica recorrente na literatura trata das dificuldades em validar os resultados produzidos por CAs e MAMs (BATTY; TORRENS, 2005; FENG *et al.*, 2019; NGO; SEE, 2012). A validação de modelos computacionais, em geral, é obtida através da análise da proximidade de seus resultados aos dados observados na realidade, seja por meio de análises estatísticas ou por comparações entre mapas (MANSON; SUN; BONSAI, 2012; NGO; SEE, 2012). Entretanto, para o caso específico de modelos de sistemas complexos, demonstrar essa correspondência entre simulação e realidade tende a ser problemático devido a dificuldades quanto: i) à testabilidade dos componentes individuais do modelo; e ii) à incerteza sobre como avaliar a confiabilidade de simulações com caráter preditivo.

A dificuldade em se testar todos os pressupostos nos quais o modelo se baseia, conforme Batty e Torrens (2005), deve-se ao fato da modelagem de sistemas complexos frequentemente envolver a representação do comportamento individual de agentes ou de

dinâmicas territoriais da microescala, para os quais usualmente não existem dados disponíveis que permitam a sua validação. Porém, os autores ainda afirmam que, se os modelos são construídos com pleno conhecimento dessa lacuna, então as dificuldades surgem apenas se tais suposições não são expostas e permanecem ocultas. Visto que tais elementos tendem a ser indispensáveis para o funcionamento do modelo, é preferível incluí-los mesmo que não seja possível validá-los, desde que tal fato seja explicitado. A incerteza gerada por tal decisão é tida como aceitável, porque habitualmente não se busca previsões altamente precisas de modelos de sistemas complexos, mas análises de possibilidades futuras que possam contribuir com a discussão acerca do problema a ser resolvido (BATTY, 2007a; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015).

Há expectativas de que tal dificuldade seja minimizada em um futuro próximo devido à evolução de fontes geradoras de *big data*, as quais poderão dar origem a novas bases de dados com descrições mais detalhadas de fenômenos da microescala, tais como dados de movimentação no ambiente urbano coletados de *smartphones* ou informações obtidas da integração de equipamentos públicos urbanos (parquímetros, catracas, câmeras de segurança) com ferramentas de análise de dados através da conexão com a internet (BATTY, 2013; LIU *et al.*, 2021). Estima-se que tais conjuntos de *big data* têm potencial para criar novos meios de informar o debate em torno de projetos e planos urbanísticos, bem como permitir o refinamento dos enunciados teóricos da ciência das cidades (BETTENCOURT, 2013).

Em relação à dificuldade para validação de modelos preditivos, ao se tentar fornecer alguma estimativa sobre configurações urbanas futuras, surge o questionamento sobre como aferir sua confiabilidade, tendo em vista que os estados passados e presentes de um sistema não necessariamente apresentam indicações de como ele se desenvolverá no futuro (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Conforme a teoria da complexidade, sistemas urbanos são caracterizados por sua não linearidade, dependência de caminho e funcionamento fora do equilíbrio, fatores estes que implicam que as cidades estão em constante mudança e possuem futuro em aberto (no sentido de que não é possível prever um estado de equilíbrio final para ela) (BATTY, 2007b). Assim, seu comportamento futuro é imprevisível, pois os elementos da cidade observáveis ao nosso redor - apesar de aparentarem ser bem definidos, relativamente estáveis e parcialmente previsíveis do ponto de vista de um agente na microescala - estão em constante mudança e, por isso, são momentâneos, passam a existir e depois desaparecem à medida que o sistema passa por bifurcações sucessivas em sua evolução (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Portanto, não há como estabelecer um estado futuro de referência para uma análise urbana e, conseqüentemente, não há como garantir que um modelo prevê com exatidão a evolução futura de um sistema.

Porém, isso não implica que não há utilidade para simulações preditivas de sistemas urbanos. Estas ainda podem ser úteis para se especular possibilidades de desenvolvimento e entender quais intervenções têm potencial para favorecer futuros desejados ou desfavorecer os indesejados (COLANDER; KUPERS, 2014). Batty (2007a) afirma que a incerteza gerada pelos modelos complexos se deve, em parte, justamente às lacunas existentes na ciência das cidades e aos limites de nossas habilidades em gestão e planejamento, de modo que é coerente que uma consequência da abordagem complexa seja que a utilidade dos modelos produzidos está em fornecer informação ao invés de soluções imediatas. Sendo assim, espera-se que os agentes envolvidos no processo de planejamento utilizem modelos e simulações para a comparação de diferentes cenários simulados visando informar o processo decisório acerca de projetos e planos urbanos (BONETT NETO *et al.*, 2015; HEWITT; VAN DELDEN; ESCOBAR, 2014; ZELLNER; CAMPBELL, 2015).

Ainda assim, para qualquer tipo de utilização de modelos preditivos, deve-se ter em mente a natureza dos resultados de uma simulação e sua relação com a situação real. Conforme White, Engelen e Uljee (2015), ao executar um modelo várias vezes, é possível mapear os pontos de bifurcação que ocorrem durante o período estudado e, assim, revelar as várias possibilidades existentes para o estado final do sistema; entretanto a realidade apresentará apenas um resultado para essa data final e não há como saber quais outras possibilidades existiam ou mesmo qual era a probabilidade de ocorrer aquela que de fato ocorreu. Isso significa que, apesar de esperarmos que um modelo de alta precisão forneça resultados próximos ao que observamos na realidade, há sempre o risco da ocorrência desta situação real na verdade ter sido improvável do ponto de vista de um observador do passado, o que significaria que o modelo é de fato preciso mesmo que seus resultados não sejam intuitivos. Nesse ponto, volta-se ao enunciado de Batty (2007a) de que essa incerteza na análise de resultados acaba sendo aceitável porque ela, em última instância, é compatível com as lacunas existentes nos conhecimentos acerca do funcionamento dos sistemas urbanos.

Nesse cenário de incertezas, ao invés de se buscar avaliar o quanto os resultados se aproximam do estado futuro do sistema, procura-se verificar se os padrões espaciais simulados correspondem a fenômenos possíveis de ocorrer na realidade. Para tanto, a literatura sugere duas formas principais para se indicar o grau de confiabilidade de um modelo: por um lado, o comparativo entre as simulações com a situação real podem fornecer indicativos sobre a capacidade do modelo em reproduzir dinâmicas específicas da área analisada; por outro lado, medidas que indicam se os resultados possuem propriedades características de cidades permitem que se verifique se a simulação forneceu

algo similar ao que normalmente se observa para sistemas urbanos (BROWN *et al.*, 2005; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015).

Em relação a este segundo caso, conforme Batty (2007a), sistemas auto-organizados com funcionamento distante do equilíbrio têm uma assinatura formal particular que é a sua estrutura fractal, conceito que indica que o objeto possui características que são semelhantes independentemente da escala de examinação. A existência dessa estrutura fractal é causada pelo crescimento do sistema em sentido *bottom-up*; mais especificamente, pelo processo em que padrões gerados na microescala emergem de maneira recursiva, influenciando os padrões da macroescala. De acordo com White, Engelen e Uljee (2015), cidades são fractais em diversos de seus aspectos espaciais: sua forma construída, distribuição dos usos do solo, tamanho de seus *clusters* internos, suas redes de transporte. Sendo assim, medidas fractais podem ser utilizadas tanto para uma compreensão teórica dos processos urbanos, quanto para validar modelos desses processos. Para tal fim, os referidos autores indicam duas medidas fractais que representam propriedades genéricas estáveis de cidades: a dimensão radial e a distribuição de frequência dos tamanhos de *clusters*.

A **dimensão radial** descreve a taxa com que a área construída aumenta conforme a distância em relação ao centro da cidade também aumenta. Essa relação é descrita pela Equação 1, onde $A(\epsilon)$ é a área construída existente dentro da distância ϵ em relação ao centro do sistema urbano e D é a dimensão radial.

$$D = \frac{A(\epsilon)}{\epsilon} \quad (\text{Equação 1})$$

Conforme White, Engelen e Uljee (2015), observações empíricas indicam que cidades possuem uma curva característica para sua dimensão radial, a qual é associada ao conceito de *estrutura bifractal*: enquanto as áreas próximas ao centro da zona urbana apresentam crescimento mais acelerado da dimensão radial devido à maior intensidade de sua ocupação; em áreas periféricas, ocorre um crescimento mais lento, visto que estas geralmente ainda estão em processo de urbanização e, portanto, possuem mais vazios urbanos. Conforme os autores, essa estrutura bifractal parece ser quase universal em cidades, de modo que qualquer modelo que produza como resultado um mapa de área urbana deveria ser capaz de reproduzir tal característica ou ser julgado inadequado.

Como a distância radial tende a crescer conforme uma lei de potência - visto que a área de um círculo cresce quadraticamente conforme seu raio aumenta - torna-se mais adequado utilizar a escala logarítmica para a representação gráfica da relação entre área construída e distância ao centro (Equação 2). Em tal gráfico, a existência de uma estrutura bifractal é indicada por uma inclinação mais acentuada para menores valores de ϵ -

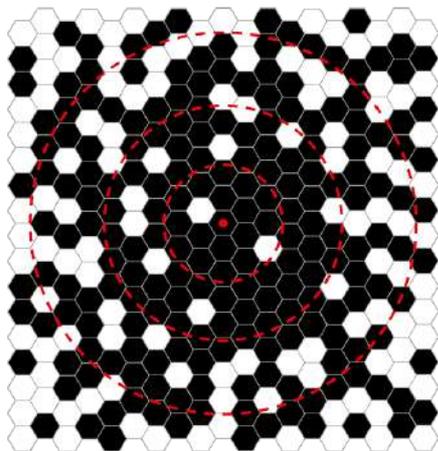
indicando maior variação da dimensão radial - seguida de um período de transição que leva a uma estabilização do gráfico em uma menor inclinação.

$$D = \frac{\log A(\epsilon)}{\log \epsilon} \quad (\text{Equação 2})$$

A Figura 6 ilustra esse comportamento para um exemplo hipotético de sistema urbano. À esquerda da imagem, é apresentado um mapa em que as células construídas são mostradas em preto e as não construídas em branco; à direita, é mostrado o gráfico de $\log A(\epsilon) \times \log \epsilon$. Pode-se visualizar que a área do mapa mais próxima ao centro possui maior concentração de área construída, o que implica em uma maior inclinação no gráfico. Por outro lado, áreas mais afastadas do centro apresentam menos células construídas, resultando em uma inclinação menor do gráfico.

Dimensão Radial

Distribuição de Células Construídas



- Célula Construída
- Célula Não Construída
- - - Marcação de Distância

Gráfico da Dimensão Radial

Área Construída $A(\epsilon)$ x Distância do Ponto Central ϵ

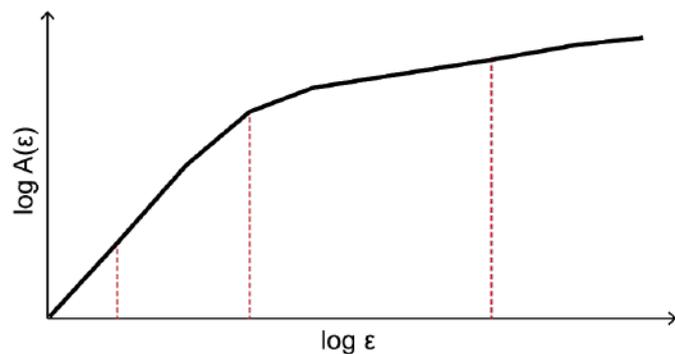


Figura 6: *Dimensão radial de sistema urbano hipotético. À esquerda, mapa de sistema urbano mostrando a distribuição de sua área construída; à direita, gráfico da dimensão fractal representando o aumento da área construída em relação à distância do centro do sistema.*

Conforme White, Engelen e Uljee (2015), a **distribuição de frequência dos tamanhos de cluster** descreve a relação entre os tamanhos existentes de *clusters* - agrupamento de células com uma mesma característica - e a quantidade (frequência) de *clusters* de cada tamanho no sistema. Ao medir a relação entre o logaritmo dos tamanhos de *clusters* e o logaritmo da frequência desses tamanhos, é esperado que o gráfico resultante indique uma relação linear para sistemas urbanos, indicando que há muito mais

clusters pequenos do que grandes e que, conforme o tamanho dos *clusters* aumenta, a sua quantidade diminui seguindo uma lei de potência.

Essa relação pode ser descrita pela Equação 3 e pela Equação 4, onde $N(s)$ é a quantidade de *clusters* de tamanho s , D é a frequência de *clusters* com tamanho s e k é uma constante matemática que pode ser encontrada por uma análise de regressão realizada nos dados do gráfico.

$$N(s) = ks^{-D} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\log N(s) = \log(k) - D \log(s) \quad (\text{Equação 4})$$

Se tal relação não for observada – ou seja, se ela não for linear – o sistema não é fractal nesse aspecto e, conforme observações empíricas, provavelmente não corresponderia a um sistema urbano, visto que a grande maioria de mapas de uso do solo apresenta uma distribuição de frequência de tamanho dos *clusters* linear (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015).

Distribuição de Frequência do Tamanho dos Clusters

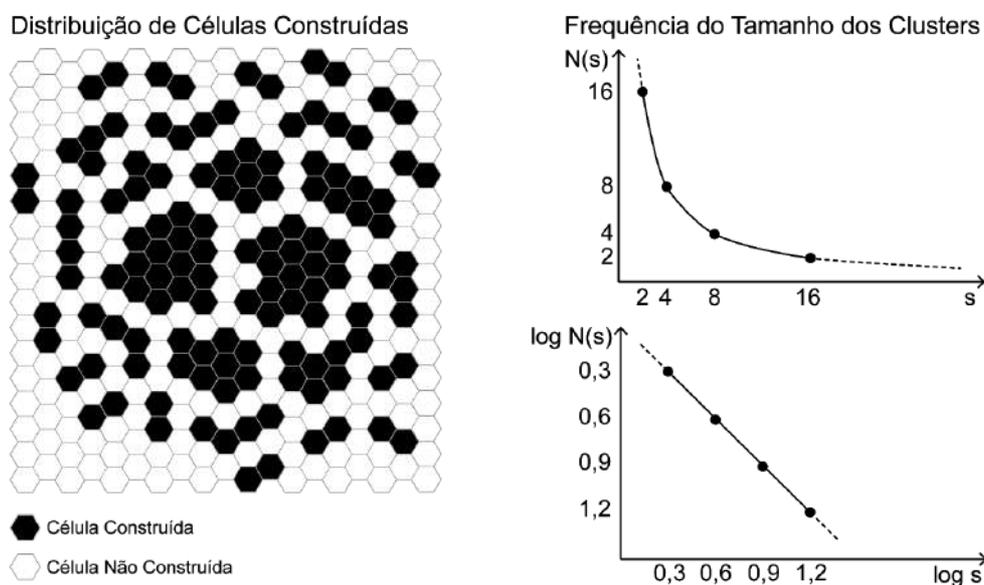


Figura 7: Distribuição de frequência do tamanho dos “clusters” para sistema hipotético. À esquerda, mapa mostrando a distribuição das células construídas; à direita, gráficos da relação existente entre $N(s)$ (quantidade de clusters de tamanho s) e s (tamanho do cluster).

A Figura 7 apresenta diagramaticamente o que se espera observar com a distribuição de frequência do tamanho dos *clusters*. À esquerda, no mapa do sistema urbano, visualizamos que conjuntos grandes de células construídas são mais raros do que conjuntos pequenos. Esse aspecto se traduz, à direita da imagem, em um gráfico $N(s) \times s$

que segue uma lei de potência. Devido à grande diferença entre os menores e maiores valores de tamanho e frequência, é comum que essa relação seja representada em escala logarítmica visando facilitar sua representação em forma de gráfico. Nesse caso, a curva do gráfico $\log N(s) \times \log s$ torna-se linear, mas seu significado permanece o mesmo do gráfico anterior.

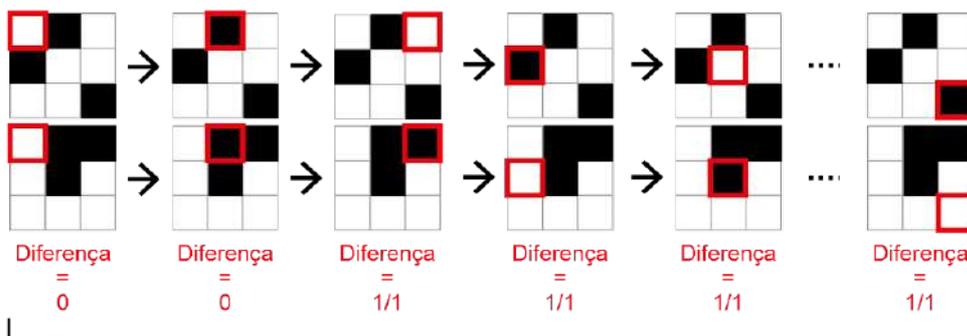
As duas medidas apresentadas podem ser utilizadas para demonstrar a adequação do modelo às propriedades formais gerais de cidades. Todavia, também há benefícios de se comparar os resultados simulados com dados geoespaciais reais obtidas da área de estudo, pois tal comparativo permite indicar se o modelo é capaz de reproduzir dinâmicas específicas do local analisado (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Conforme Barreira González, Aguilera-Benavente e Gómez-Delgado (2015), apesar de ser reconhecido que medidas espaciais podem quantificar características espaciais e morfológicas para fins de comparação de formas urbanas, não há consenso na literatura sobre quais as métricas específicas a serem empregadas nessa avaliação.

Uma alternativa adequada, conforme Ngo e See (2012), é a medida da qualidade do ajuste para múltiplas resoluções (ou MRG, sigla para *Multiple Resolution Goodness-of-fit*). Ela mede, para as várias resoluções de um mapa, a correspondência entre padrões espaciais simulados e reais. Isso é feito percorrendo simultaneamente ambos os mapas com janelas de amostragem, verificando a quantidade de células dentro delas que possuem estados diferentes em cada mapa analisado. A cada vez que os mapas são percorridos em sua totalidade por tais janelas, repete-se o processo para uma janela de tamanho diferente, abrangendo assim suas diversas resoluções espaciais. Da diferença obtida dessa análise é possível aferir um valor de ajuste para cada resolução, que indica o grau de correspondência entre os mapas comparados para cada tamanho de janela de amostragem utilizado. O gráfico consolidando as relações entre ajuste e tamanho da janela de amostragem é o que representa o MRG e permite a aferição das resoluções para as quais o modelo fornece resultados mais próximos à realidade.

A Figura 8 exemplifica o procedimento de cálculo do MRG para um sistema simples: i) percorre-se os mapas com janelas de amostragem de diferentes tamanhos; ii) em cada posição, calcula-se a proporção de células que são diferentes entre os mapas; iii) para cada tamanho de janela, a soma das diferenças encontradas é dividida pelo total de amostras coletadas, resultando em um índice de diferença para cada resolução; e iv) esse índice é utilizado para o cálculo do ajuste de cada resolução, que indica a proporção de células iguais entre os dois mapas. Tais resultados são representados em um gráfico em que é possível averiguar a partir de qual resolução o modelo torna-se confiável; como ocorre no exemplo da Figura 9, em que o MRG é mediano para resoluções muito detalhadas e bastante preciso para resoluções mais amplas.

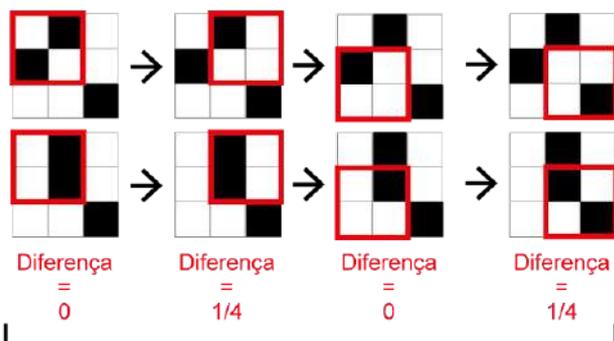
QUALIDADE DO AJUSTE

Janela de amostragem de tamanho 1x1



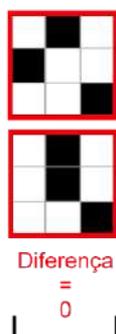
$$\text{Índice de diferença} = \frac{\text{soma das diferenças}}{\text{quantidade de amostras}} = \frac{4}{9} = 0,444 \rightarrow \text{Ajuste} = 1 - \text{índice de diferença} = 1 - 0,444 = \mathbf{0,556}$$

Janela de amostragem de tamanho 2x2



$$\text{Índice de diferença} = \frac{\text{soma das diferenças}}{\text{quantidade de amostras}} = \frac{(2/4)}{4} = 0,125 \rightarrow \text{Ajuste} = 1 - \text{índice de diferença} = 1 - 0,125 = \mathbf{0,875}$$

Janela de amostragem de tamanho 3x3



$$\text{Índice de diferença} = \frac{\text{soma das diferenças}}{\text{quantidade de amostras}} = \frac{0}{1} = 0,0 \rightarrow \text{Ajuste} = 1 - \text{índice de diferença} = 1 - 0,0 = \mathbf{1,0}$$

Figura 8: Exemplo de cálculo do MRG para um sistema hipotético. Cada faixa horizontal representa o cálculo do ajuste para um valor de janela de amostragem, indicando a correspondência de células entre mapas para aquela resolução.

Gráfico da Qualidade do Ajuste

Ajuste F_w para cada tamanho w de janela de amostragem

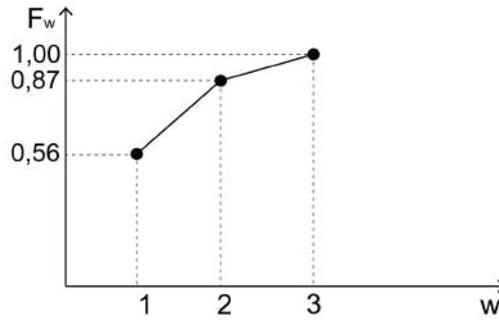


Figura 9: Gráfico da qualidade do ajuste (MRG). Formado pela relação entre ajuste (F_w) e o tamanho da janela de amostragem (w) em cada resolução dos mapas analisados na Figura 8.

Matematicamente, o cálculo do ajuste F_w para uma janela de amostragem de tamanho w é representado pela Equação 5, onde a_{ki} corresponde à quantidade de células da categoria i no conjunto de células k , p é a quantidade de diferentes categorias de células na janela de amostragem, s é a janela de amostragem de dimensão $w \times w$ que se move pela imagem analisada, e t_w é a quantidade total de janelas de amostragens daquela resolução (NGO; SEE, 2012).

$$F_w = \sum_{s=1}^{t_w} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^p |a_{1i} - a_{2i}|}{2w^2} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

2.4 ESTUDOS CONFIGURACIONAIS URBANOS

A implementação de um MAM exige a elaboração de regras que guiem o comportamento dos agentes, sendo comum a utilização do conceito da função de utilidade, que, a partir dos valores dos atributos do agente, fornece uma métrica do quão “satisfeito” ele está com o seu estado atual (CROOKS; PATEL; WISE, 2014; TORRENS, 2000b; WILENSKY; RAND, 2015). Tal utilidade é um conceito genérico que se adapta às especificidades das diferentes áreas de interesse ou aos objetivos específicos de uma pesquisa. Em aplicações de planejamento urbano, uma alternativa é que ela seja baseada na abordagem configuracional de estudos urbanos, a qual fornece um conjunto de medidas que têm sido utilizadas como suporte a modelos de sistemas complexos, possibilitando a mensuração dos privilégios espaciais de um local para determinado tipo de indivíduo (POLIDORI; KRAFTA, 2005; SANTOS *et al.*, 2017; SARAIVA, 2017).

A abordagem configuracional parte do princípio geral da morfologia urbana de que o espaço não é um pano de fundo neutro para a atividade humana, mas um fator fundamental da relação entre pessoas e cidade, visto que a forma urbana é um dos elementos responsáveis pela integração entre espaços públicos e privados, aproximando ou afastando os indivíduos dos recursos da cidade (HILLIER; HANSON, 1984). Assim, o potencial de um lugar para abrigar atividades não depende apenas de suas características individuais, mas também de sua relação com os outros elementos da cidade (KRAFTA, 2014). A área de estudos configuracionais tenta fornecer ferramentas para capturar o efeito espacial dessas relações urbanas tanto no nível local - como a relação entre comércios e residências de ruas de um mesmo bairro - quanto em uma escala mais abrangente, como a relação entre atividades localizadas em diferentes bairros de uma mesma cidade (LEGEBY, 2010).

Conforme Krafta (2014), os estudos configuracionais constituem uma espécie de ramificação quantitativa da morfologia urbana que se baseia na representação da cidade como um sistema. Este, geralmente, segue a forma de um grafo, sendo composto por nós e linhas, os primeiros representando os espaços públicos ou privados e as outras, as conexões entre tais espaços (Figura 10). Nessa representação, a distância entre dois pontos pode ser medida por meio da distância geométrica entre eles ou por passos topológicos, os quais correspondem à quantidade de conexões que devem ser percorridas para sair de um ponto e chegar no outro, como mostra o exemplo da Figura 11. Tal conceituação de distância é fundamental para a abordagem configuracional, uma vez que, para o cálculo de suas medidas, é utilizada com recorrência a computação dos menores caminhos entre todos os pares de pontos do sistema, sendo considerado o menor caminho entre dois elementos aquele de menor distância total.

Representação da cidade como um sistema

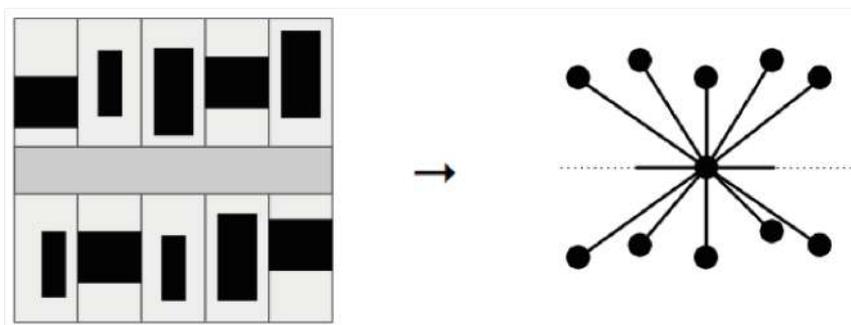


Figura 10: *Representação da cidade como um sistema. A abordagem configuracional dos estudos urbanos representa a cidade como um grafo, em que espaços públicos e privados são representados como pontos e a conexão entre eles, como linhas.*

Exemplo de medição de distância topológica

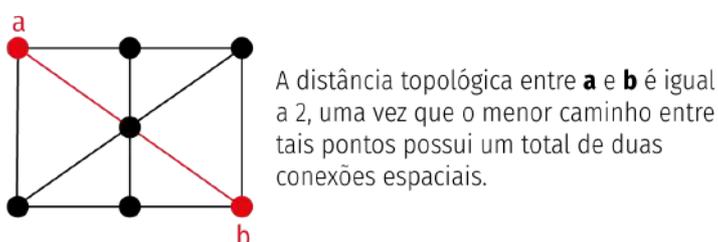


Figura 11: *Medição da distância topológica entre dois pontos. Ela é equivalente à quantidade de conexões existentes no menor caminho entre os pontos.*

Por meio dessa representação, são calculadas medidas espaciais para diferenciar os espaços da cidade e descrever uma hierarquia espacial do ambiente construído segundo critérios como, por exemplo, a dependência do sistema em relação a cada um de seus componentes, a intensidade da interação entre eles, a posição ou a distância relativa de cada componente. Das medidas configuracionais existentes, são de especial relevância para o presente estudo as denominadas *acessibilidade*, *centralidade*, *oportunidade espacial* e *convergência espacial*.

A medida de **acessibilidade** remonta à proposta de Ingram (1971), que visava estabelecer a característica de um lugar que descreve o custo necessário para superar o atrito espacial entre tal lugar e o restante dos espaços existentes em uma rede. Em outras palavras, ela representa a facilidade com que é possível acessar o restante dos elementos do sistema a partir de um de seus espaços constituintes. Seu cálculo é definido pela Equação 6, em que a acessibilidade Ace de uma unidade espacial i é igual ao inverso do somatório das distâncias d dos menores caminhos entre i e todas as outras unidades espaciais do sistema, representadas por j (KRAFTA, 2014).

$$Ace(i) = \sum_{j=0}^n 1/d_{ij} \quad (\text{Equação 6})$$

A Figura 12 representa a lógica que se deseja capturar por meio do cálculo da acessibilidade. Nela, o ponto a está mais próximo da maioria dos outros elementos do sistema do que o ponto b . Sendo assim, o custo - em unidades de distância ou tempo - para se movimentar a partir de a para outro lugar tende a ser menor do que no caso da partida ser no ponto b , fazendo com que a tenha maior valor de acessibilidade do que b .

A medida de **centralidade**, conforme originalmente desenvolvida por Freeman (1977), parte da computação do caminho mínimo de cada um dos pontos do sistema com todos os outros para, então, indicar a quantidade de caminhos mínimos dos quais cada unidade espacial faz parte. Elementos com maiores valores de centralidade tendem a compor percursos de maior hierarquia dentro do sistema, possuindo maior probabilidade de

estarem associados aos maiores fluxos existentes. A Figura 13 ilustra simplificadamente a lógica dessa medida: qualquer percurso entre dois elementos do sistema necessariamente terá o ponto *a* como intermediário, enquanto que os outros elementos participam apenas dos percursos em que são origem ou destino; portanto, *a* é considerado o ponto mais central do sistema.

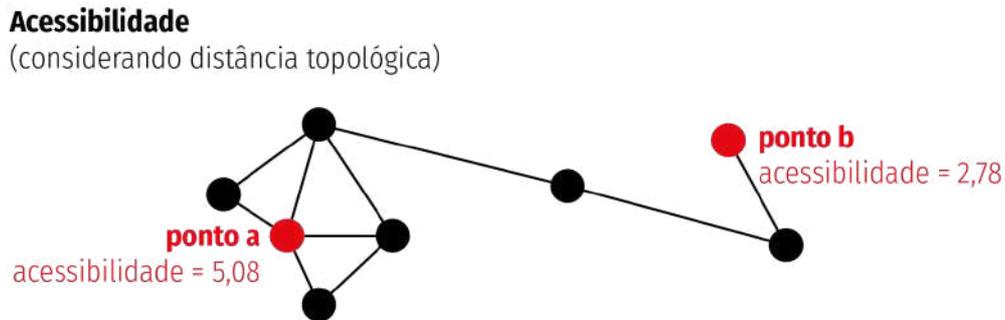


Figura 12: Representação da lógica da medida de acessibilidade. O ponto *a*, por estar mais próximo da maioria dos outros componentes, possui maior valor de acessibilidade do que o ponto *b*.

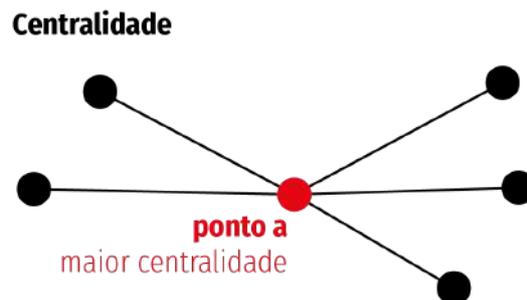


Figura 13: Representação da lógica da medida de centralidade. O ponto *a*, por servir de intermediário para todos os caminhos possíveis entre dois pontos, possui o maior valor de centralidade do sistema.

Krafta (1994) propõe a complementação dessa medida por meio de sua ponderação conforme: i) a distância entre os pontos que compõem um caminho mínimo; e ii) a quantidade de unidades construídas na origem e no destino desse caminho. Para tanto, é utilizado o conceito de tensão, entendido como um indicativo da intensidade da conexão entre os dois espaços interligados pelo tal caminho. Como mostra a Equação 7, a tensão t do caminho mínimo entre os espaços i e j é igual à multiplicação da quantidade de unidades construídas em cada um desses pontos. Esse valor é dividido pela quantidade de pontos que constituem o referido caminho (p), obtendo-se a fração da tensão que será atribuída a cada um desses pontos (Equação 8). Por fim, o somatório de todas essas frações de tensão que o ponto recebe por fazer parte de caminhos mínimos equivale ao valor da denominada **centralidade ponderada** deste ponto (Equação 9).

$$t_{ij} = a_i a_j \quad (\text{Equação 7})$$

$$t_{ij}(k) = \frac{a_i a_j}{p} \quad (\text{Equação 8})$$

$$C(k) = \sum_{i,j} t_{ij}(k) \quad (\text{Equação 9})$$

As medidas de oportunidade e convergência espacial se distinguem por serem baseadas na diferenciação dos pontos do sistema conforme o uso do solo que eles representam. Neste trabalho, vamos utilizar a diferenciação de Krafta (1996), baseada na categorização dos espaços como *demandas residenciais* ou *ofertas de serviços*. Conforme o mesmo autor, a **oportunidade espacial** mede a acessibilidade aos serviços existentes no sistema urbano do ponto de vista das residências. Ela pode ser entendida como uma versão direcionada da medida de acessibilidade, cujo cálculo considera apenas as conexões existentes entre um ponto contendo demandas com outro contendo ofertas, sendo também ponderado conforme o porte destas ofertas de serviço. A Equação 10 define o cálculo da oportunidade O de um ponto i - o qual contém demandas residenciais - como sendo o somatório, para todos os pontos j que contém ofertas de serviço, da relação entre o porte s da oferta em j e a distância d entre i e j .

$$O(i) = \sum_{j=0}^n \frac{s_j}{d_{ij}} \quad (\text{Equação 10})$$

O objetivo da medida de oportunidade é diferenciar situações como a exemplificada na Figura 14. Nela, se a acessibilidade dos pontos a e b fosse calculada, os valores resultantes seriam similares. Porém, a está localizado mais próximo às ofertas de serviço existentes, enquanto que, nas proximidades de b , há apenas demandas residenciais. Sendo assim, a oportunidade do ponto a é maior que a de b , pois o primeiro tem acesso facilitado aos recursos da cidade em relação ao segundo.

Já a **convergência espacial**, também conforme Krafta (1996), mede o privilégio locacional dos pontos do sistema para abrigar ofertas de serviço, considerando que, para tais ofertas, é vantajoso estar em uma posição próxima aos maiores fluxos de indivíduos. O cálculo da medida segue as mesmas equações apresentadas para a centralidade ponderada; porém, considera apenas os caminhos que possuem como extremidades um ponto de demanda residencial e outro ponto de oferta de serviços. A Figura 15 retrata a lógica geral da convergência espacial: apesar do ponto b estar próximo às residências, seu privilégio locacional – do ponto de vista de usos não residenciais – é menor que o observado no ponto a , porque este também se beneficia dos fluxos existentes entre o

agrupamento de residências e as outras ofertas de serviço. Portanto, o ponto *a* apresenta maior valor de convergência do que *b*.

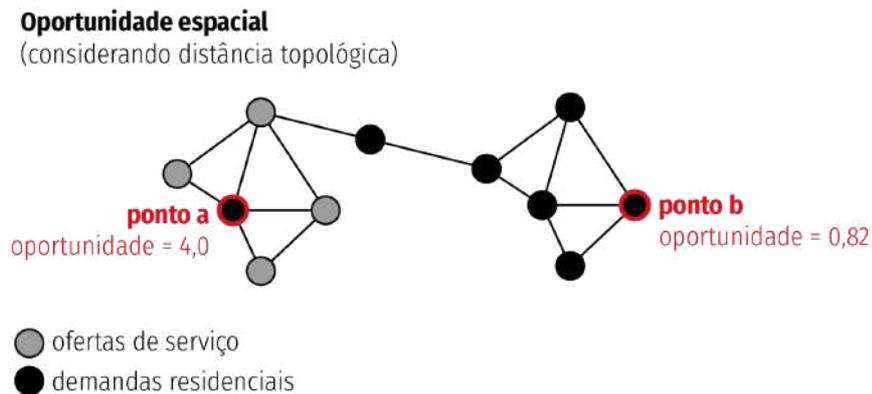


Figura 14: Representação da lógica da medida de oportunidade espacial. O ponto *a* está mais próximo das ofertas de serviço do que o ponto *b*, por isso sua oportunidade espacial é maior.

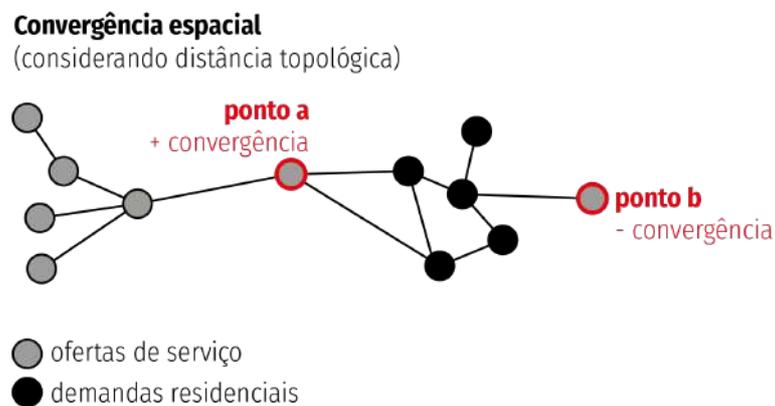


Figura 15: Representação da lógica da medida de convergência espacial. Apesar do ponto *b* estar próximo às demandas residenciais, sua convergência é menor que a do ponto *a* porque este se beneficia dos fluxos existentes entre as referidas demandas e as ofertas de serviço.

O cálculo das medidas apresentadas ainda pode ser complementado pelo conceito de **impedância**: atributo das conexões do sistema que atua como um coeficiente de atrito, alterando a distância - tanto geométrica, quanto topológica - entre dois pontos (KRAFTA, 2014). Tal conceito permite que as análises sejam ponderadas por fatores associados à dificuldade ou à facilidade de se percorrer determinado trecho de caminho, tais como a largura ou pavimentação da via (DALCIN *et al.*, 2017). Seu efeito é descrito pela Equação 11, na qual d representa a distância original existente entre os pontos i e j , imp corresponde à impedância da conexão entre eles e d' representa a distância modificada pela impedância.

$$d'_{ij} = d_{ij} * imp \quad (\text{Equação 11})$$

2.5 REFERÊNCIAS DE MODELOS DE SISTEMAS URBANOS COMPLEXOS

O conjunto de modelos que aplicam a teoria da complexidade a cidades é amplo e variado, dificultando a visualização de um quadro geral desse conjunto (LI *et al.*, 2017; MUSA; HASHIM; REBA, 2017). Não há um método único que abrange todas as disciplinas envolvidas nos estudos urbanos com alta eficiência, de modo que as soluções são diversas, assumindo diferentes características conforme a área de pesquisa e o objeto de estudo (LEVY; MARTENS; VAN DER HEIJDEN, 2016; TORRENS, 2003). Devido à alta quantidade de novas propostas e à falta de um afastamento histórico suficiente para se analisar a importância de cada contribuição, há dificuldades em se traçar uma sequência cronológica correta do avanço no desenvolvimento de novas técnicas de modelagem e simulação para sistemas urbanos. Portanto, optou-se por estruturar a descrição apresentada a seguir em torno dos estudos utilizados como referência para o presente trabalho.

Parte-se do trabalho de Portugali e Benenson (1997), no qual se argumenta que um modelo que visa representar uma cidade necessita de, pelo menos, duas camadas constituintes: uma para a infraestrutura urbana e outra para os indivíduos que a habitam. Essa separação se deve, principalmente, ao fato de os elementos de infraestrutura (terrenos, rede viária, edificações) serem imóveis, enquanto que os agentes humanos são potencialmente livres para mudar sua localização na cidade. Além disso, as dinâmicas temporais dessas duas entidades seguem lógicas diferentes: os primeiros alteram seu porte físico ao longo do tempo, enquanto os outros – além de sua posição – têm como principal variação a sua quantidade absoluta (a população da área representada). Tal proposta vai ao encontro da definição de Portugali (2016) de que a cidade é um sistema complexo dividido em componentes materiais e humanos.

O modelo proposto por Benenson (1998) foi uma tentativa inicial de se aplicar tal lógica. Nele, a camada da infraestrutura é representada por um CA composto pelos terrenos individuais da cidade, caracterizados por seu valor do solo; já o comportamento da população é representado por um MAM em que os agentes são descritos por seu *status* econômico e sua identidade cultural. Tal modelo é caracterizado pela ampla utilização de funções probabilísticas para descrever o comportamento dos agentes. Isso significa que, ao invés de se definir uma relação direta de causa e efeito (“se determinada variável estiver acima de um certo valor, o agente realiza tal ação específica”), define-se uma função probabilística que indica as chances de uma determinada ação ser realizada dependendo da alteração de um certo atributo e os valores obtidos dessa função são utilizados como referência para o sorteio de um número aleatório que definirá se a ação será de fato realizada: se o número sorteado for abaixo da referência, o agente realiza a referida ação; caso contrário, o agente realiza alguma outra ação ou, até mesmo, ação nenhuma.

Pode-se descrever o funcionamento geral do modelo de Benenson como sendo baseado em um processo iterativo composto pelas seguintes etapas:

- i) O valor do solo de cada terreno é atualizado conforme a média dos terrenos vizinhos e seu status de ocupação - terrenos já ocupados por agentes tendem a se valorizar, enquanto os desocupados tendem a diminuir de valor;
- ii) Os agentes que já ocupam um terreno avaliam se permanecem onde estão ou alteram sua localização. Essa decisão é feita por meio de uma função probabilística na qual as chances do indivíduo se mudar aumentam conforme aumenta a diferença entre sua renda e o valor do terreno que ele habita. Desse modo, agentes de menor renda tendem a sair de áreas que começam a se valorizar, enquanto agentes de maior renda tendem a sair de áreas desvalorizadas;
- iii) Os agentes desocupados - aqueles que estão de mudança ou que são novos no sistema - analisam a cidade em busca de um local ainda não ocupado e que seja adequado. Tal adequação é definida por meio de duas variáveis: a) a quantidade de agentes de mesma identidade cultural e *status* econômico na vizinhança; e b) a diferença entre o valor do solo e a renda do agente. A decisão sobre ocupar o terreno é tomada seguindo uma função probabilística: quanto mais indivíduos semelhantes e quanto menor a tensão econômica, maiores são as chances do indivíduo se estabelecer naquele local.

O modelo de Benenson indica uma lógica, ainda que simplificada, de como a evolução da cidade pode ser modelada obedecendo aos aspectos básicos dos sistemas complexos: i) a forma da cidade emerge da ação de seus componentes individuais; ii) sua evolução é dependente de caminho, já que a ação de um agente é influenciada pela posição tomada por outros agentes em iterações anteriores; e iii) as dinâmicas são não lineares, pois o uso de funções probabilísticas possibilita a existência de múltiplos estados futuros a partir de condições iniciais similares. Por outro lado, dentre suas limitações, está o fato de não se considerar, para a variação do valor dos terrenos, nenhum tipo de interação entre agentes, seja a relação de competição locacional entre múltiplos indivíduos ou a negociação estabelecida entre comprador e vendedor.

Um avanço em relação à modelagem de tais relações foi posteriormente proposto por Filatova, Parker e van der Veen (2009) e complementado por Filatova (2015). Os autores argumentam que a forma da cidade é o resultado da alocação de espaço entre usuários concorrentes dentro de um mercado: quanto mais atrativo é um ponto do território, mais agentes estarão interessados por ele e, conseqüentemente, estes provavelmente terão que elevar suas ofertas de compra para terem chances de obtê-lo. Ao final, o terreno

é comprado pelo indivíduo com maior capacidade e disposição de ofertar o maior valor dentre os interessados. Desse modo, para reproduzir as dinâmicas do mercado imobiliário com alguma precisão, é preciso que se considere tanto os efeitos da competição entre agentes, quanto os mecanismos do próprio processo de venda dos terrenos.

No modelo proposto pelos autores, a atratividade do terreno é inicialmente medida por meio da distância do local ao centro comercial da cidade e a infraestrutura urbana ali disponível. Os compradores analisam essa atratividade e, se estiverem interessados, avaliam a demanda por terrenos nas proximidades: se a região é pouco procurada, é feita uma proposta de compra por um valor abaixo da média local; mas, se a região possui alta demanda, o valor da proposta é elevado até ser aceita ou até o comprador alcançar o limite do que pode oferecer. Por outro lado, os proprietários que desejam vender um terreno esperam a resolução dessa negociação para aceitar ou recusar a oferta final, sendo tal decisão guiada por uma função probabilística, na qual a aceitação se torna mais provável quanto maior a diferença entre a oferta e o valor médio dos terrenos vizinhos.

Assim, tal modelo introduz na reprodução do funcionamento de sistemas urbanos as relações dos agentes entre si e como elas modificam a cidade. Entretanto, por se tratar de um modelo voltado a estudos de Economia, os atributos utilizados como base para a precificação do solo - distância do centro e disponibilidade de infraestrutura - são imutáveis ao longo da simulação, não sendo considerado como a alocação de agentes pode afetar os atributos do território e a alteração destes também retroativamente modificar os agentes.

A utilização de medidas configuracionais é uma alternativa para possibilitar a reprodução de uma cadeia de causalidade linear em que agentes e células territoriais se influenciam mutuamente. Krafta (1994) propôs um modelo conceitual de como a forma construída se modifica no tempo conforme a distribuição espacial dos privilégios locacionais existentes na cidade, os quais são definidos por meio do cálculo da medida de centralidade. Em tal proposta, o potencial de crescimento de uma área do território é calculado como a diferença de sua centralidade ao maior valor existente em sua vizinhança. Tenta-se, assim, reproduzir a lógica do mercado imobiliário de buscar terrenos de baixo custo próximos a áreas muito atrativas com a expectativa de que os preços de venda das unidades construídas sejam próximos aos dessa área vizinha valorizada, o que maximizaria o retorno financeiro do empreendimento. O autor propõe a utilização desse método em um modelo dinâmico no qual o surgimento de novas edificações em uma determinada iteração influenciaria o valor da centralidade em todo o sistema, o que, por sua vez, afetaria a localização dos empreendimentos que surgiriam em iterações futuras.

Uma variação dessa proposta foi implementada computacionalmente por Polidori e Krafta (2005). Nesse estudo, o sistema urbano é representado como um CA em que cada célula possui um valor próprio de centralidade e de área construída. Não há a presença de

agentes em tal modelo, sendo o crescimento urbano simulado por meio de um processo probabilístico em que células com maiores valores de centralidade – ou próximas aos espaços mais centrais – possuem maior probabilidade de receber um incremento em sua área construída. De qualquer forma, tal proposta demonstrou a possibilidade de se fazer com que a atratividade de cada ponto no território evolua conforme sua configuração se modifica no tempo. Posteriormente, Saraiva (2017) propôs uma versão baseada na medida de acessibilidade e Santos (2015) integrou dinâmicas de segregação espacial aos modelos anteriores, utilizando agentes que verificam o estrato social dos indivíduos que habitam uma parte da cidade para decidir sobre se instalar naquele ponto ou não.

Porém, apesar de tais modelos terem como base a abordagem configuracional de estudos urbanos, eles não utilizam diretamente a representação da cidade como um grafo para realizar o cálculo das medidas de centralidade e acessibilidade. Na realidade, é usado um processo de atualização dos valores a partir da comunicação entre células vizinhas, o qual, apesar de resultar em valores similares à representação convencional, desconsidera as conexões entre espaços como um elemento que possa ter atributos próprios. Assim, torna-se inviável, em tais modelos, utilizar atributos de impedância para representar as condições oferecidas pelos trechos da rede viária, de modo que o efeito da hierarquia viária existente não é plenamente considerado.

Em tais modelos, também não são representadas explicitamente as dinâmicas individuais dos distintos usos do solo. O modelo de White, Engelen e Uljee (2015) é um exemplo de como integrar tal questão à modelagem urbana: além de atributos individuais, tal como renda, os agentes também são categorizados conforme sua atividade, sendo esta a responsável por definir quais parâmetros que o agente considera ao escolher um local para se estabelecer. Isso possibilita que o comportamento dos indivíduos dentro do modelo dependa de suas características individuais: agentes industriais podem buscar terrenos de maiores áreas e localizados próximos às rodovias de maior hierarquia; enquanto agentes residenciais buscam terrenos próximos ao centro comercial da cidade e junto às redes de infraestrutura, mas longe de áreas industriais.

Essa diferenciação entre os componentes do sistema é aprofundada pelo modelo de Magliocca e outros (2011). Nele, adicionalmente aos agentes que representam os usos do solo, os autores introduzem a figura do empreendedor imobiliário: um tipo específico de agente que busca adquirir frações de território, mas não com o intuito de se estabelecer e realizar atividades residenciais ou comerciais, e sim para investir na expansão da capacidade daquela área e lucrar com a venda das novas unidades ali construídas. Desse modo, o empreendedor não está diretamente interessado na atratividade do local, mas em encontrar terrenos específicos que podem produzir o maior lucro possível.

A modelagem desse novo agente urbano possibilita uma separação de atividades mais próxima do que de fato é observado na realidade das cidades. Portugali e Benenson (1997) já haviam argumentado a favor da necessidade de separar modelos urbanos em duas camadas justamente por observar que a forma construída evolui de forma distinta aos agentes que nela residem. Krafta (1994) contribuiu com a discussão ao argumentar a favor de um comportamento específico para o empreendedor imobiliário - seguindo uma regra de maximização do retorno financeiro de um empreendimento - que é diferente da lógica seguida pelos agentes que visam se estabelecer no território para exercer atividades residenciais, comerciais e afins. Portanto, já estava presente na teoria a ideia de que há uma diferenciação dos agentes conforme sua capacidade de alterar diretamente a forma construída da cidade e a proposta de Magliocca e outros (2011), então, fornece a implementação computacional para integrar tal aspecto ao modelo.

3. METODOLOGIA

Este trabalho visa aplicar os conceitos descritos no capítulo anterior em uma proposta de modelo para simular o desenvolvimento urbano dos municípios de Imbé e Tramandaí, localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul. Para tanto, considerando as cidades como sistemas complexos que se desenvolvem em sentido *bottom-up*, utiliza-se um CA para representar o território estudado e um MAM para reproduzir o comportamento dos agentes ali estabelecidos. Em tal implementação, são utilizados elementos dos trabalhos de referência descritos na revisão bibliográfica, bem como medidas configuracionais e fractais, que apoiarão o funcionamento e a validação do modelo proposto.

A metodologia aplicada é descrita a seguir. Parte-se da definição do recorte espacial que será utilizado como objeto de estudo e dos fenômenos da região a serem representados pelo modelo proposto. Na sequência, é apresentado como um CA e um MAM são utilizados para tal representação: quais parâmetros da realidade são utilizados na definição dos estados, atributos e regras de transição de cada célula ou agente. A seguir, é exposto como as bases de dados disponíveis para o objeto de estudo foram manipuladas para se tornarem compatíveis à escala dos elementos do modelo. Por fim, trata-se sobre os procedimentos de validação dos resultados das simulações.

3.1 OBJETO DE ESTUDO: LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL

Os municípios do litoral norte do Rio Grande do Sul (Figura 16) apresentam em comum, além de sua localização junto à costa marítima, o fato de terem sua economia majoritariamente baseada no setor de serviços: estima-se que o Valor Agregado Bruto da região, em 2019, possuía um percentual de 86,2% originado de atividades de serviços, com 12,2% referente à indústria e 1,6% à agropecuária (DEE-RS, 2021). Essa força do setor terciário se deve, em sua maior parte, à atratividade turística das praias locais, que favorece o desenvolvimento de atividades comerciais e imobiliárias voltadas ao público visitante: estas duas correspondem a 38,8% da estrutura de serviços dos municípios da região (RIO GRANDE DO SUL, 2015).

Tal região foi escolhida como objeto de estudo do presente trabalho devido ao conjunto de dinâmicas demográficas e ambientais que podem ser observadas ali, as quais devem impactar significativamente a configuração urbana local nas próximas décadas. A primeira dessas dinâmicas é o fato da região ter apresentado o maior crescimento demográfico do Rio Grande do Sul nas últimas duas décadas, contrastando com o panorama de decréscimo ou estagnação observado no restante do estado (RIO GRANDE DO SUL, 2015). Como mostra a Figura 17, no período entre 2011 e 2020 os

municípios do litoral norte cresceram acima da média estadual e federal conforme dados de IBGE (2011, 2020), com os municípios de Arroio do Sal e Xangri-lá inclusive apresentando taxas maiores que o triplo de tais médias.

Região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul

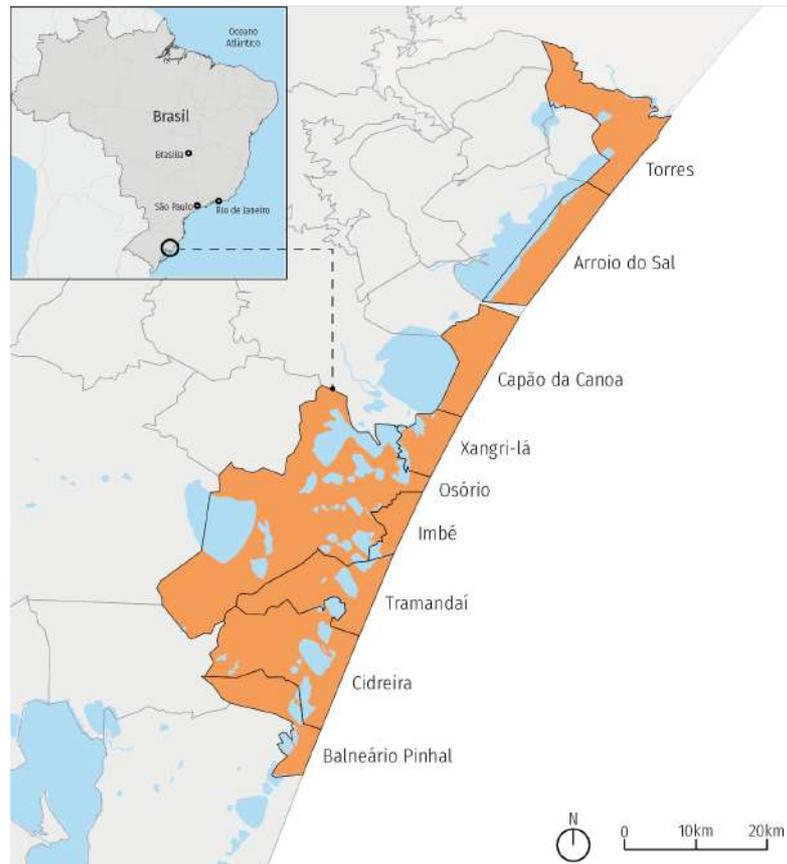


Figura 16: Municípios do litoral norte do Rio Grande do Sul.

CRESCIMENTO POPULACIONAL 2011-2020 (IBGE, 2011, 2020)

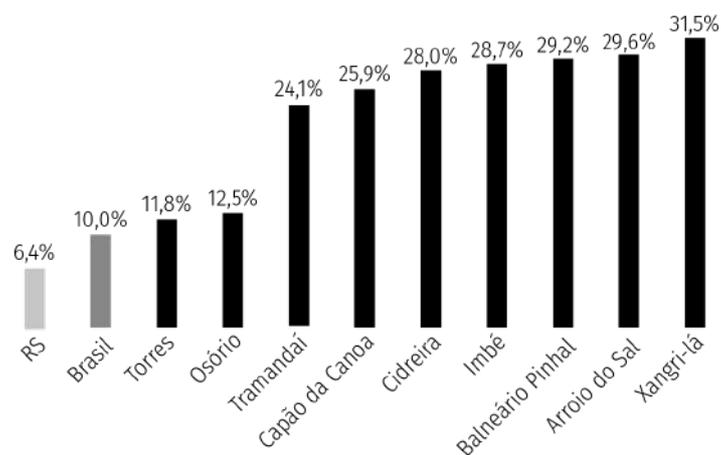


Figura 17: Crescimento populacional dos municípios do litoral norte e médias estaduais e federais para período de 2011 a 2020, conforme dados de IBGE (2011, 2020).

Além disso, devido ao turismo de praias da região, observa-se uma significativa variação sazonal da população local, que chega a ser até 3,5 vezes maior durante os meses de verão do que durante o inverno (ZUANAZZI; BARTELS, 2016). A Figura 18 mostra uma estimativa dessa diferença para o período entre dezembro de 2014 e abril de 2015. Nota-se que, nas datas de início e fim, há uma média de 200 mil pessoas nos municípios da região, quantidade esta que cresce significativamente durante os meses de janeiro e fevereiro, especialmente nos fins de semana, alcançando um máximo de 730 indivíduos no fim do ano e no carnaval. A partir do mês de março, tais valores tendem a diminuir, com uma última grande variação ocorrendo no feriado de Páscoa.



Figura 18: *Estimativa da população nas praias do litoral norte entre os anos de 2014 e 2015. Elaborado pelo autor conforme dados de Zuanazzi e Bartels (2016).*

Essas dinâmicas, além de dar origem a um intenso mercado imobiliário local (KLUGE, 2015), geram desafios para a gestão dos municípios, especialmente em relação à ampliação das redes de infraestrutura para satisfazer as demandas dessa crescente ocupação urbana (RIO GRANDE DO SUL, 2015). Tal cenário se torna ainda mais complexo porque os indivíduos que compõem esse aumento populacional apresentam perfil diversificado, observando-se a predominância de dois grupos majoritários: de um lado, famílias ou indivíduos de alta renda, principalmente aposentados e idosos, que buscam residências em áreas que propiciem lazer e conforto; do outro lado, grupos de baixa renda que primordialmente buscam inclusão no mercado de trabalho e moradias em áreas com baixo custo do solo (COREDE LITORAL, 2017). Essa diversidade dificulta a implantação de políticas socioeconômicas eficazes devido às diferentes demandas criadas por cada um desses conjuntos populacionais.

O crescimento demográfico ocasionado por tais grupos acarreta o crescimento da área urbanizada dos municípios do litoral norte, processo que ocorre em uma estreita faixa

situada entre o mar e o complexo de lagos da região (Figura 19). Devido ao conflito entre ambiente construído e natural, a intensificação dessa urbanização local gera preocupações quanto à degradação dos ecossistemas associados à hidrografia local (COREDE LITORAL, 2017). Inclusive, já são recorrentes os casos de desequilíbrios ambientais ocorridos ali, como a contaminação de córregos conectados ao mar (MATOS, 2020) e o aumento nos estragos causados por tempestades ou vendavais devido à supressão da vegetação e das dunas junto às lagoas ou à praia (GUEDES, 2020).

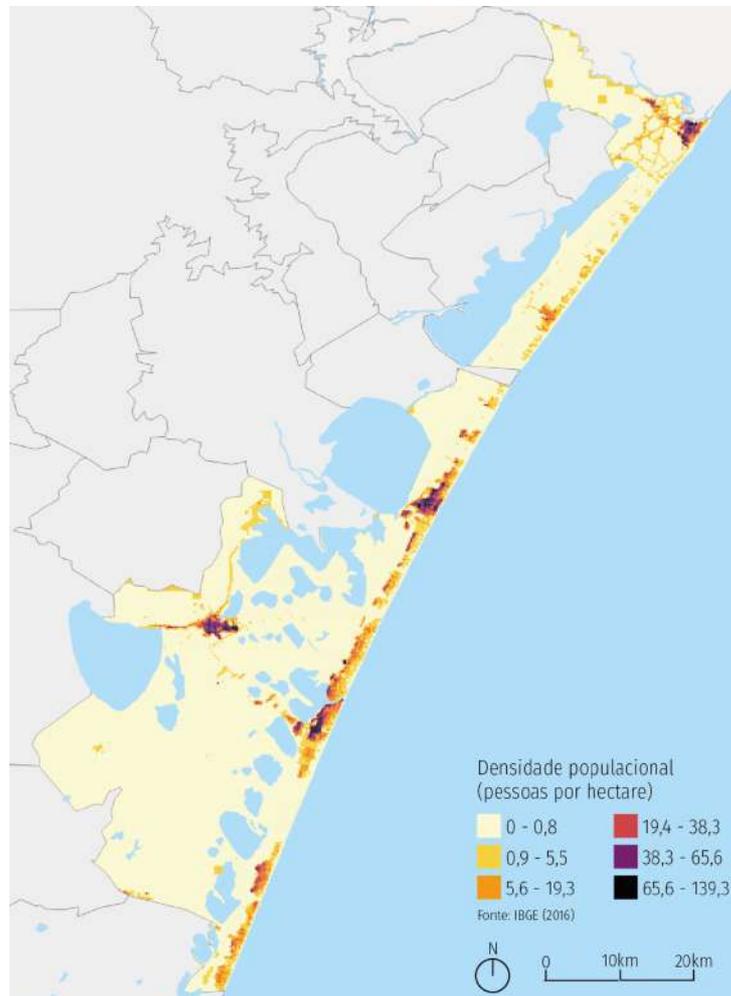


Figura 19: *Densidade populacional no litoral norte do Rio Grande do Sul conforme dados de IBGE (2016).*

Tais questões ambientais geram problemas atualmente e a expectativa para o futuro são de um agravamento da situação: estima-se que o aumento do nível do mar devido às mudanças climáticas globais pode, até o final deste século, acarretar a inundação de partes das áreas urbanas do litoral norte gaúcho (CLIMATE CENTRAL, 2020; KULP; STRAUSS, 2019). Caso isso se confirme, a configuração urbana da região provavelmente sofrerá mudanças que tornarão sua gestão ainda mais complexa, tais como: i) a saída dos

residentes das áreas com risco de inundação; ii) a variação do valor do solo decorrente desse processo; iii) a diminuição do potencial turístico local; e iv) o surgimento de eventuais gastos com a construção de infraestruturas para contenção da água.

Dentre os municípios que constituem o litoral norte gaúcho, escolheu-se como recorte espacial a ser representado no modelo proposto aquele representado na Figura 20, abrangendo as zonas urbanas dos municípios de Imbé e Tramandaí, além de um porção periférica de Osório. Tal escolha se justifica pela relativa importância dessas cidades para a região em termos demográficos e econômicos, e também por serem observáveis nelas - por meio de medidas estatísticas - as dinâmicas populacionais de crescimento e variação sazonal mencionadas anteriormente (ZUANAZZI; BARTELS, 2016). Adicionalmente, a área aparece como uma das mais ameaçadas no Rio Grande do Sul por um eventual aumento do nível do mar, tendo porções de sua urbanização consolidada dentre os locais com potencial de inundação, como é possível observar na Figura 21 ao compararmos o polígono de risco com a malha viária das cidades.

Definição recorte espacial do modelo

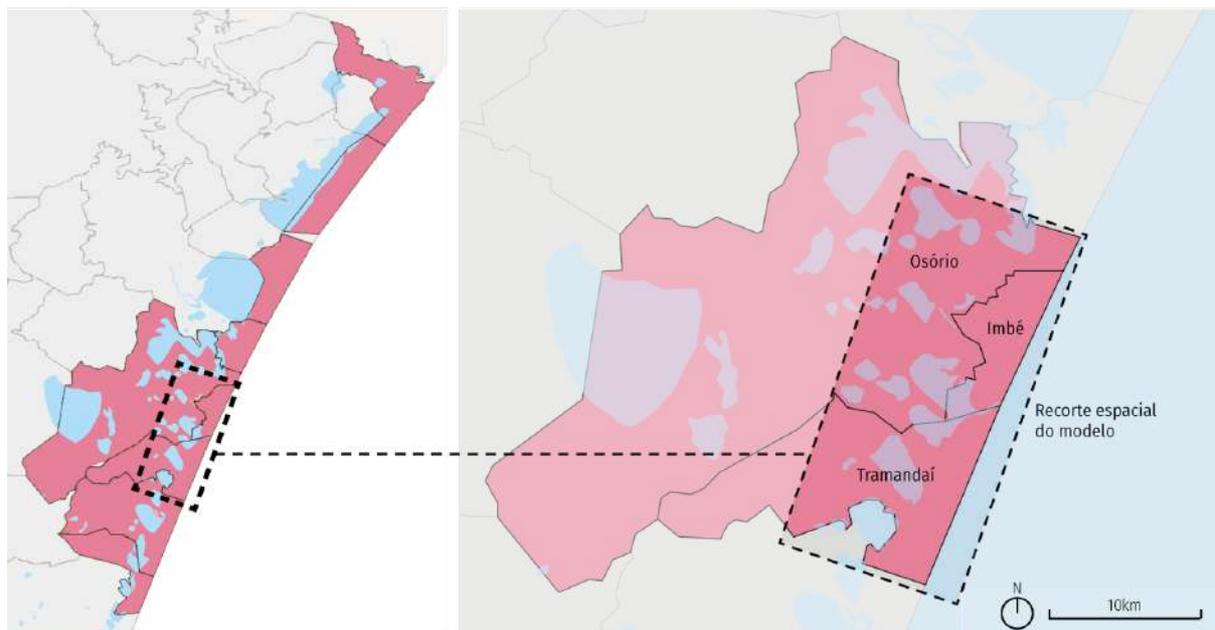


Figura 20: Recorte espacial a ser analisado por meio do modelo proposto. São abrangidos os municípios de Tramandaí, Imbé e uma porção do município de Osório.



Figura 21: *Estimativa de elevação do nível do mar para os municípios de Tramandaí, Imbé e Osório para o ano de 2070. Fonte: Climate Central (2020).*

Além da faixa de praia, um elemento estruturador da configuração urbana desse recorte são suas conexões viárias. A Figura 22 apresenta os principais eixos que compõem a malha de mobilidade e transporte da região, dentre os quais se destaca a rodovia RS-030, principal ligação local com a zona oeste do estado, incluindo a Região Metropolitana de Porto Alegre. Tal via não apenas serve como entrada para Tramandaí, mas também se estende até a área central do município até alcançar a divisa com Imbé, onde ela se conecta com a avenida Paraguassú. Esta, por sua vez, tem a importante função de distribuir para vias transversais o tráfego da parte norte do recorte de estudo e eventualmente se conectar com a Rodovia Estrada do Mar, que se estende pelo restante do litoral norte até o estado de Santa Catarina. Assim, o eixo composto pelas vias RS-030 e avenida Paraguassú possui o papel duplo de ser a principal conexão intra e também intermunicipal, constituindo a principal estruturação urbana da área de estudo e sendo complementado pelo conjunto composto pela avenida Flores da Cunha e pela RS-786 que conecta a localidade ao litoral sul do estado.

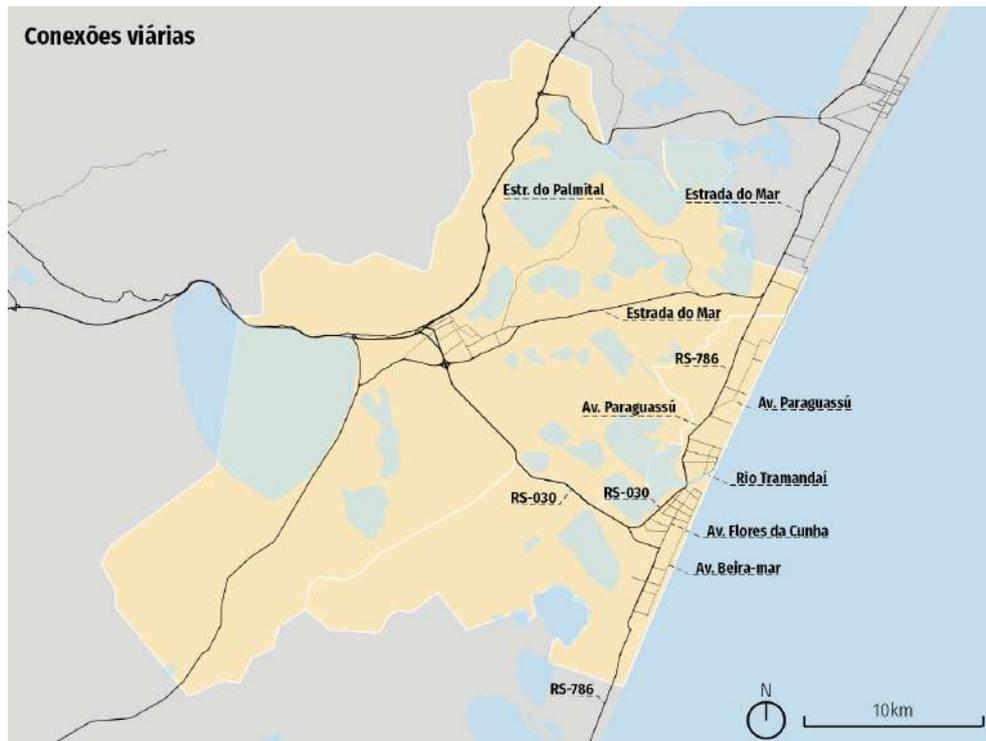


Figura 22: Principais conexões viárias dos municípios de Imbé e Tramandaí e arredores, conforme dados de OpenStreetMap (2021).

A função de estruturação dos eixos viários pode ser verificada pelos dados referentes à distribuição espacial da população permanente (Figura 23) e pela localização dos estabelecimentos de comércio e serviços (Figura 24). Em ambos os casos, os maiores focos estão situados ao longo do referido eixo da RS-030 e avenida Paraguassú, especialmente junto à divisa entre Tramandaí e Imbé. Valores secundários ocorrem no entorno da avenida Flores da Cunha e da RS-786, indicando o potencial dessas vias para guiar o crescimento futuro local. Além disso, como focos periféricos para ambos os atributos, destacam-se o bairro Indianópolis em Tramandaí e a praia de Atlântida Sul, na divisa entre Imbé e Osório.

Ainda em relação à alocação dos habitantes no território, mostrada na Figura 23, nota-se que os maiores valores de densidade populacional estão afastados da faixa de praia, de certa forma contrariando a lógica discutida anteriormente de que a atratividade turística é o principal fator que rege as dinâmicas da região. Tal fenômeno se deve especialmente a dois aspectos: em primeiro lugar, os dados do Censo Demográfico referentes à distribuição espacial dos indivíduos (IBGE, 2011, 2016) abrangem apenas o comportamento da população com residência permanente no município analisado, a qual, em Imbé e Tramandaí, tende a buscar moradia em locais de custo do solo reduzido e de alta acessibilidade aos serviços e vagas de empregos (COREDE LITORAL, 2017). Em segundo lugar, os planos diretores locais (IMBÉ, 2013; TRAMANDAÍ, 2017) restringem o porte das edificações que podem ser construídas nas quadras próximas ao mar, sendo essa

regra flexibilizada apenas para o entorno dos principais eixos viários, como é o caso daquele composto pela RS-030 e avenida Paraguassú.

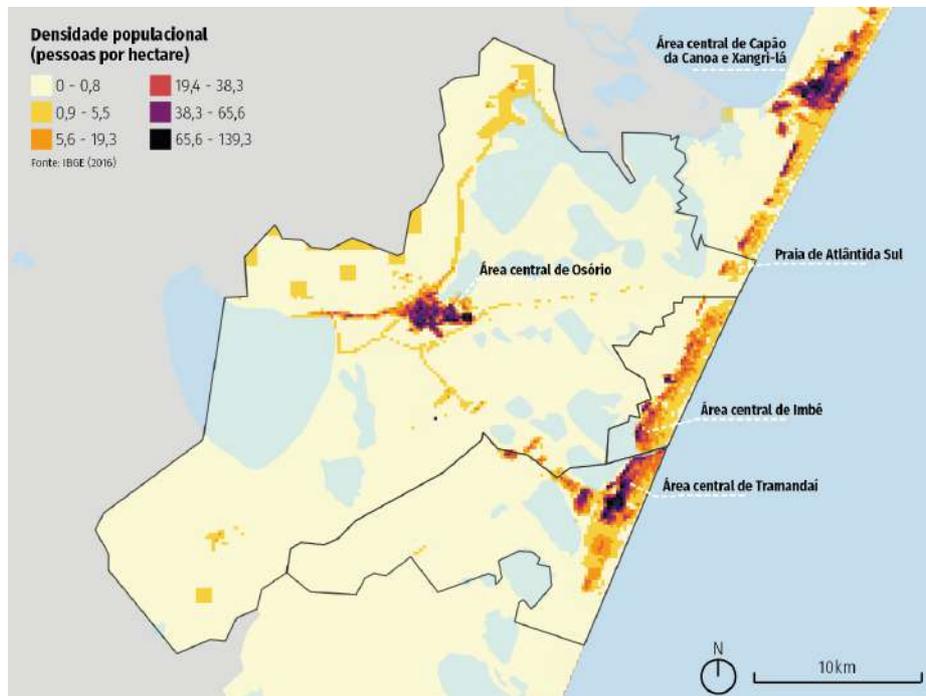


Figura 23: Densidade populacional dos municípios de Imbé e Tramandaí e de seus arredores conforme dados de IBGE (2016).

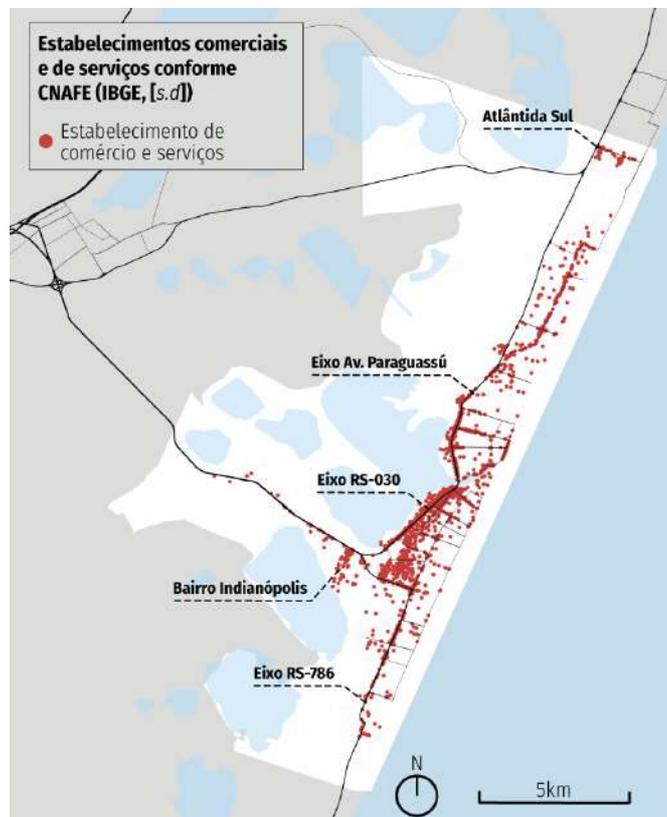


Figura 24: Localização dos estabelecimentos de comércio e serviços conforme dados de IBGE ([s. d.]).

Em relação ao comércio, sua localização em áreas afastadas da praia também ocorre devido às restrições do regime urbanístico local (IMBÉ, 2013; TRAMANDAÍ, 2017). A Figura 25 mostra a quantidade máxima de pavimentos permitidos para as edificações conforme os Planos Diretores municipais (IMBÉ, 2013; OSÓRIO, 2006; TRAMANDAÍ, 2017) e nela pode-se observar que, com exceção da área central de Tramandaí - aquela localizada junto à divisa com Imbé - as zonas em que são permitidas as mais altas densidades estão junto aos eixos viários das estradas RS-030 e RS-786 e das avenidas Paraguassú e Flores da Cunha, ou seja, a pelo menos quatro ou cinco quarteirões da faixa de praia. Tal mapa do Plano Diretor indica também uma possível expectativa de que o crescimento da região ocorra ao longo dos eixos da RS-030, da RS-786 e da avenida Paraguassú, visto que em áreas mais afastadas do centro de Tramandaí e Imbé - as quais são menos povoadas atualmente - é em tais vias que estão situadas as áreas com maior flexibilidade para novas construções. Um outro tipo de crescimento previsto é o de zonas de média densidade no entorno das Estradas do Mar e do Palmital, possivelmente se aproveitando do papel de ligação dessas rodovias.

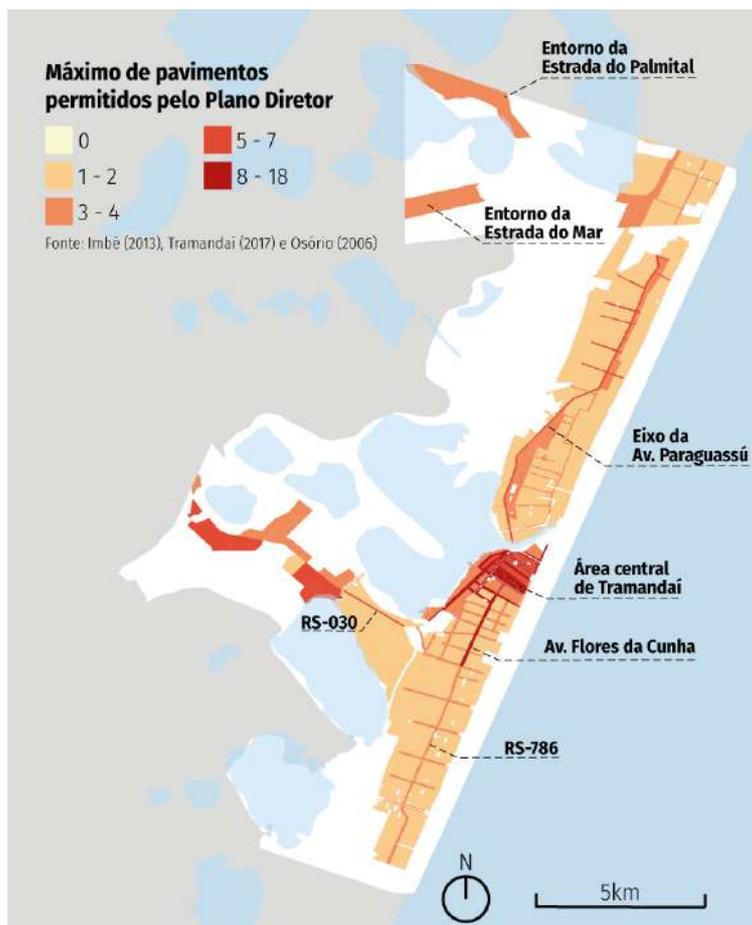


Figura 25: Máximo de pavimentos permitidos pelos planos diretores municipais conforme Imbé (2013), Osório (2006) e Tramandaí (2017).

3.2 PROPOSTA DE MODELO PREDITIVO DO DESENVOLVIMENTO URBANO

Modelos baseados em agentes e autômatos celulares são uma alternativa para a representação das dinâmicas populacionais e ambientais da área de estudo, tendo em vista que eles estão associadas com a simulação de como o comportamento de indivíduos e frações do território originam micro dinâmicas que influenciam a emergência de padrões na macroescala das cidades. Por isso, no modelo proposto neste trabalho, decidiu-se pelo uso de uma abordagem híbrida, na qual um MAM representa indivíduos que se estabelecem no ambiente urbano visando realizar atividades residenciais ou comerciais², enquanto um CA é utilizado para representação das dinâmicas territoriais, especialmente dos atributos relacionados com o funcionamento do mercado imobiliário local: valor do solo, potencial construtivo e privilégios locacionais.

O modelo proposto é baseado na interação entre três tipos de entidades: i) as células do CA, que representam como o território se modifica no tempo; ii) os agentes, que representam a alocação espacial de demandas residenciais e ofertas de serviços; e iii) uma função algorítmica representando o comportamento dos empreendedores imobiliários. Resumidamente, a relação entre tais entidades ocorre da seguinte forma:

- i) os agentes são inseridos no modelo e buscam, dentre as células compatíveis com seu poder econômico, aquelas que são mais atrativas;
- ii) conforme os agentes se distribuem espacialmente, as células do CA atualizam seus valores de atratividade e custo;
- iii) os agentes verificam se a célula na qual se localizam ainda cumpre os seus requisitos de atratividade e custo e, caso isso não ocorra, eles buscam outra célula para habitar;
- iv) o valor das células mais procuradas pelos agentes aumenta, atraindo o interesse de empreendedores imobiliários, os quais investem na ampliação da capacidade dessas células para lucrar por meio da venda das unidades adicionais criadas;
- v) durante tal processo, ocorre o aumento do nível do mar, alterando a atratividade das células e, conseqüentemente, influenciando as escolhas dos agentes sobre onde se estabelecer.

² Usos industriais e rurais foram desconsiderados devido a sua menor relevância para o funcionamento dos municípios, como indicado pelo Perfil Socioeconômico do COREDE do Litoral Norte (RIO GRANDE DO SUL, 2015) e pelos dados de DEE-RS (2021).

As subseções a seguir apresentam a descrição de cada um desses elementos constituintes do modelo e, ao fim desta seção, é apresentada uma descrição mais aprofundada do processo simulatório geral e de suas etapas constituintes.

3.2.1 Autômato Celular (CA)

Neste estudo, as células do CA correspondem a frações hexagonais³ do território da área de estudo, tendo a função de representar as variações de estoque construído, valor do solo e da atratividade que ocorrem naquela fração espacial. Devido à fundamentação deste trabalho na teoria da complexidade, foi entendido como conveniente que as células tivessem tamanho próximo ao de um terreno urbano, uma vez que este seria o nível mais desagregado do território a partir do qual se poderia simular dinâmicas emergentes. Entretanto, a quantidade máxima de células no modelo é limitada pela memória RAM do equipamento utilizado para executar as simulações, de modo que, por meio de testes, foi possível estabelecer que o modelo proposto poderia ter até 20.000 células cujos atributos podem se modificar ao longo das iterações⁴. Isso resultou em células com as dimensões mostradas na Figura 26, as quais se aproximam mais daquelas de um quarteirão do que de um terreno individual.

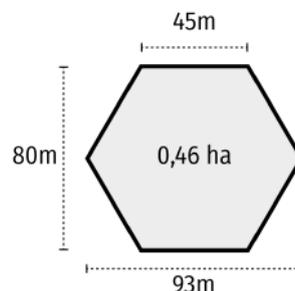


Figura 26: Dimensões das células do CA deste estudo.

Visando superar tal dificuldade para de fato tornar possível a representação do comportamento de terrenos individuais, foi introduzido o conceito de *subdivisões virtuais*: alguns dos atributos das células são computados simulando que, dentro de cada célula, há múltiplas subdivisões de tamanho indefinido que representam o que seriam os terrenos que as compõem. Em outras palavras, como mostra a Figura 27, é criado um registro computacional para armazenar informações específicas das subdivisões que existem dentro de cada célula, possibilitando o cálculo de atributos individuais para elas; mas, não são definidos o tamanho ou a posição dessas subdivisões - uma vez que elas não existem de

³ A escolha do formato hexagonal é explicada na página 52.

⁴ Células cujo estado e atributos não se alteram ao longo do tempo - como é o caso das células de corpos d'água que serão apresentadas a seguir - ocupam recursos quase insignificantes na memória RAM e, portanto, não influenciam a quantidade total de células do modelo.

fato como geometrias no modelo computacional⁵ (por isso elas são chamadas de *virtuais*) - apenas sabe-se que elas estão inseridas dentro da célula a qual pertencem. Desse modo, mesmo que não esteja visível nos mapas gerados pelas simulações, os cálculos do modelo consideram o comportamento individual de frações ainda menores que a própria célula, permitindo que, neste trabalho, sejam computados, para cada terreno individual, sua variação do valor do solo, quantidade de unidades construídas e o estado de ocupação de cada uma dessas unidades.

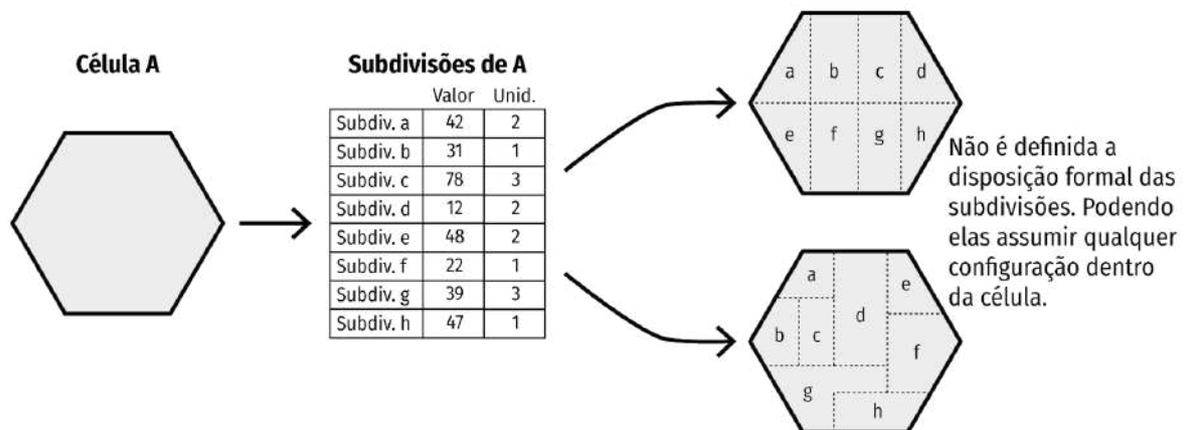


Figura 27: Os dados referentes às subdivisões virtuais são armazenados como listas associadas à célula na qual elas estão localizadas; porém, sua geometria, posição e tamanho não são definidos.

Neste estudo, o estado das células é a combinação dos atributos de unidades construídas em cada uma de suas subdivisões e a quantidade de agentes estabelecidos nelas. A **quantidade de unidades construídas** é definida como o número de pavimentos da edificação que ocupa a subcélula, sendo seu objetivo restringir a quantidade de agentes que se estabelecem nela (cada unidade pode abrigar apenas um agente). Ela é modificada pela figura do empreendedor imobiliário, como será descrito na seção 3.2.3, sendo seu valor máximo limitado pelos parâmetros do plano diretor local. A ocupação dessas unidades por parte dos agentes ocorre conforme as regras de comportamento destes, descritas na subseção a seguir.

Tal estado é modificado de acordo com os valores dos seguintes atributos individuais presentes em cada célula: capacidade de urbanização, alcançabilidade, número máximo de unidades, carregamento, oportunidade espacial, convergência espacial, valor do solo e o risco de inundação. A **capacidade de urbanização** descreve se a célula pode ser edificada para abrigar agentes, enquanto a **alcançabilidade** indica se a célula pode servir de caminho para os agentes se locomoverem. Estes atributos diferenciam as células em três

⁵ A criação de geometrias é um dos fatores que mais implica no aumento do uso de memória RAM durante as simulações, por isso a utilização das referidas subdivisões virtuais torna-se conveniente.

categorias: i) áreas de água, as quais são inalcançáveis e não edificáveis; ii) áreas de ocupação restrita, como praias e áreas de preservação, que são alcançáveis, mas não podem receber construções; e iii) áreas de espaço urbano, que é alcançável e edificável. As células desta última categoria possuem o atributo **número máximo de unidades**, que limita a quantidade de agentes que podem se estabelecer em cada uma de suas subdivisões, reproduzindo a influência das restrições estabelecidas pelo regime urbanístico local. Para esse atributo, são utilizados os valores do número máximo de pavimentos permitidos pelos Planos Diretores municipais, tendo em vista que tal dado parece se aproximar mais ao total de unidades existentes em uma célula do que parâmetros relativos à área do terreno como índices construtivos e taxas de ocupação.

O atributo de **carregamento** indica numericamente o potencial da célula em atrair agentes com base nos elementos nela localizados, tal como residências, comércios e equipamentos urbanos. Sua função é servir de ponderação para o cálculo das medidas de oportunidade e convergência espacial. Cada elemento localizado na célula gera um carregamento categorizado conforme seu uso (demanda ou oferta), ao qual é atribuído um par de pesos que indicam o quanto ele influencia a alocação espacial de indivíduos da população permanente e da temporária (essa diferenciação é descrita na próxima seção). O Quadro 1 mostra todos os elementos do modelo considerados para o cálculo de tal atributo, com os pesos apresentados tendo sido estabelecidos com base nos exemplos de Dalcin e outros (2017) e Polidori (2004).

Quadro 1: *elementos que compõem o atributo de carregamento.*

Elemento	Tipo	Peso para pop. permanente	Peso para pop. temporária
Praia	Oferta	50	100
Praça ou parque	Oferta	10	5
Agente residencial	Demanda	5	5
Agente comercial	Oferta	5	10
Unidades de saúde	Oferta	50	25
Equip. de educação	Oferta	50	0

A **oportunidade espacial** é utilizada neste estudo como parâmetro para a competitividade das células em atrair residências, enquanto a **convergência espacial** é utilizada como parâmetro da competitividade das células em atrair comércios e serviços. Uma vez que o cálculo de tais medidas pressupõe uma representação do espaço como uma rede, cria-se uma camada associada ao CA na qual ele é representado como um grafo: o centróide de cada célula é um nó que possui conexão com cada uma de suas

células vizinhas que sejam alcançáveis, seguindo-se assim a representação nodal de sistemas urbanos definida por Krafta (2014). O benefício dessa representação é possibilitar o cálculo das medidas configuracionais seguindo o sistema em forma de rede previsto em Krafta (1996,1999) ao mesmo tempo em que se mantém a lógica de funcionamento do CA conforme proposta pela teoria da complexidade (Figura 28).

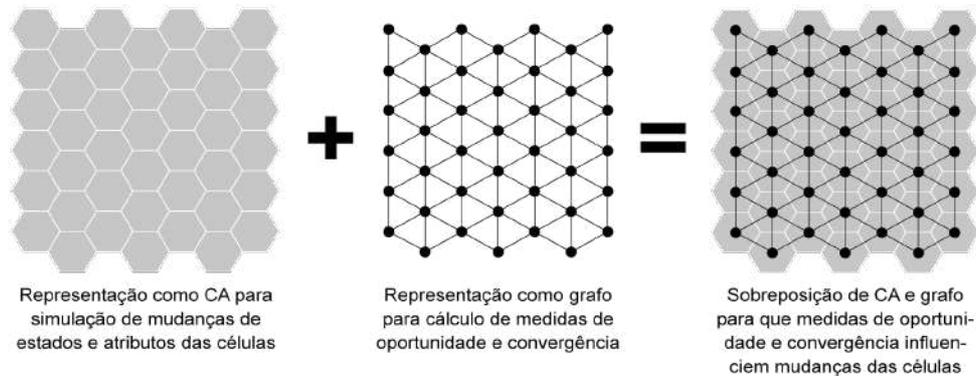


Figura 28: Cálculo da oportunidade e convergência exige a representação do CA como um grafo.

A utilização dessa representação em forma de grafo permite que sejam atribuídas impedâncias às conexões da rede, possibilitando a ponderação das medidas de oportunidade e convergência conforme as condições de tráfego oferecidas pelas vias do sistema. Neste estudo, a impedância é definida de acordo com a proximidade das células às principais vias existentes: conexões entre células que interseccionam rodovias ou vias arteriais possuem menor impedância - por permitirem maiores fluxos de indivíduos - do que as conexões que dependem de vias de menor hierarquia. A Figura 29 mostra como cada célula armazena a informação da via de maior hierarquia que a intersecciona e como a análise dessa informação para cada par de células gera diferentes impedâncias para as conexões do sistema urbano.

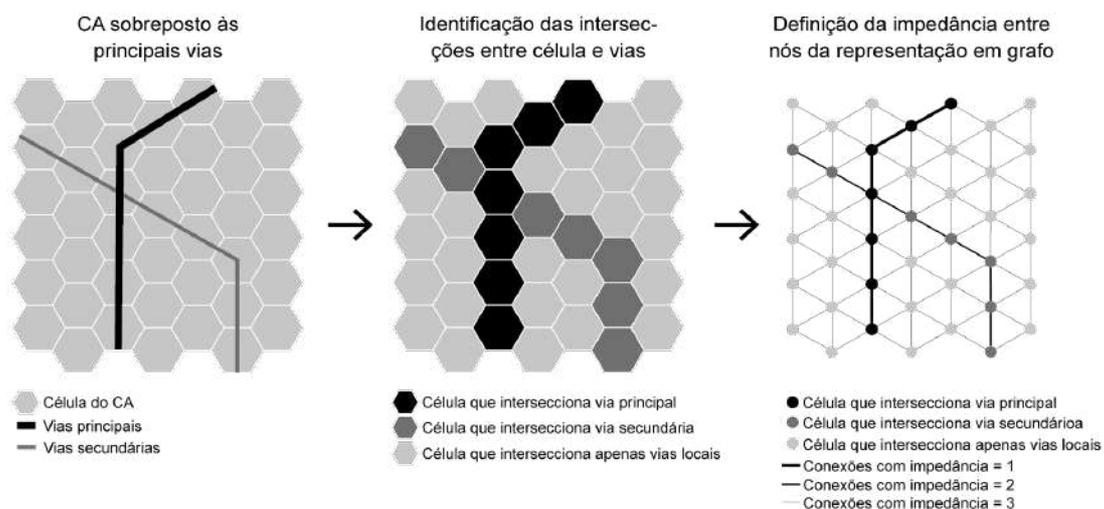


Figura 29: Impedância é definida conforme via de maior hierarquia que intersecciona a célula.

Para atribuição da impedância de cada via, foi utilizada a categorização de OpenStreetMap (2020), que resultou na atribuição de valores iguais a 1 ou 2 para os principais trechos viários, como mostra a Figura 30. Para conexões entre células que não interseccionam nenhuma das vias abaixo, é considerada uma impedância igual a 3.

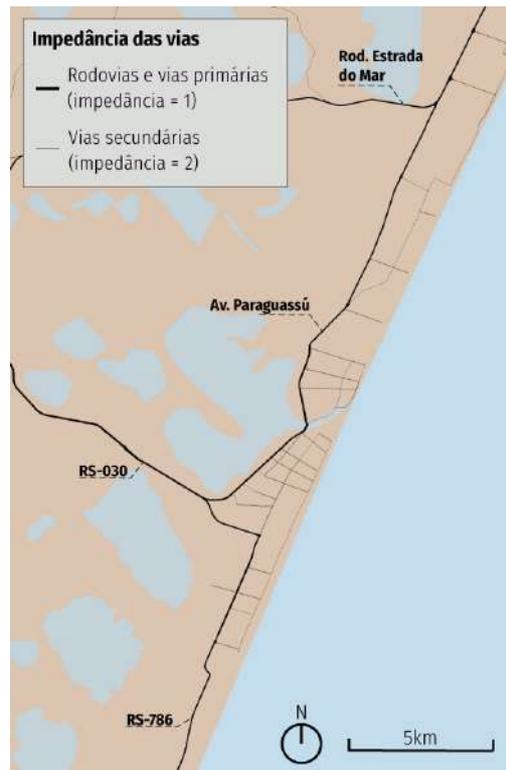


Figura 30: Impedância atribuída às principais vias da área de estudo.

A impedância influencia de duas formas o cálculo das medidas de oportunidade e convergência. Em primeiro lugar, por alterar a distância entre as células, ela modifica a computação dos caminhos mínimos do sistema. Em segundo lugar, visto que células muito distantes entre si possuem influência mútua praticamente irrelevante no valor de suas medidas configuracionais, decidiu-se por desconsiderar do cálculo as conexões cuja distância total seja maior que 45 passos topológicos, solução que resultou em uma redução significativa do tempo de execução das simulações. O valor desse raio de restrição foi escolhido por tornar a média das distâncias consideradas similares ao valor de 1,6 km proposto por White, Engelen e Uljee (2015) como sendo o raio que abrangeria as principais movimentações de um indivíduo na cidade.

Ainda em relação à representação do sistema em forma de grafo, deve-se mencionar que ela é a razão pela qual se escolheu o formato hexagonal para as células do CA. Dentre os conjuntos de formato e regras de vizinhança existentes - células quadradas com quatro vizinhos; quadradas, mas com seis vizinhos; e hexágonos com seis vizinhos -

entende-se que as duas primeiras alternativas não são satisfatórias para o modelo deste trabalho: a primeira desconsidera conexões diagonais e, por isso, distorce a computação dos menores caminhos do sistema; já a segunda opção cria conexões de tamanhos diferentes, exigindo algum gasto de memória computacional adicional para armazenar o dado do tamanho de cada conexão. Como no presente trabalho houve o interesse de maximizar a quantidade de células do modelo, o que implicou na minimização do uso da memória, concluiu-se que o uso de células hexagonais seria a opção mais adequada, uma vez que, por suas conexões terem todas o mesmo comprimento, não é necessário utilizar recursos de memória adicionais para medir distâncias em passos topológicos.

Ainda sobre a oportunidade espacial, deve-se mencionar que ela é, na realidade, calculada como duas medidas separadas: uma que descreve a atratividade da célula para a população permanente e outra, para os habitantes temporários. O que difere no cálculo de cada uma dessas versões é o valor de carregamento utilizado, pois, como foi mostrado no Quadro 1, tal atributo indica pesos diferentes conforme o tipo de agente considerado. Tal aspecto influencia diretamente a alocação espacial dos agentes, conforme descrito na seção 3.2.2 a seguir.

Retornando à listagem dos atributos, o **valor do solo** é uma estimativa do quanto os agentes pagariam para se estabelecer em uma unidade construída de uma célula. Ele varia de duas formas durante a simulação. Em primeiro lugar, visando tornar o atributo adaptável à variação da demanda pelas subdivisões das células com base na proposta de Filatova (2015), a cada vez que uma unidade construída já ocupada é avaliada como adequada por outro agente, o seu valor é aumentado em uma unidade. Em segundo lugar, ao fim de cada iteração, é calculado o valor médio das unidades construídas na vizinhança de cada célula. Cada unidade que custar mais que a média de sua vizinhança terá seu valor diminuído em uma unidade, enquanto que unidades de custo menor irão ter seu valor aumentado em uma unidade. Por meio dessa dinâmica, tenta-se reproduzir como a dinâmica de preços de um sistema é alterada pela observação dos valores praticados no mercado.

Por fim, o **risco de inundação** da célula é calculado com base em dados do aumento do nível do mar (como será descrito na subseção 3.3.3). Tal atributo influencia diretamente o valor do solo, pois células com maiores percentuais de risco são menos procuradas, uma vez que cada agente só aceita se estabelecer em locais cuja probabilidade de inundação seja menor do que um valor máximo que ele considera aceitável.

O Quadro 2 apresenta um resumo dos atributos das células do CA, descrevendo se eles são capazes de se modificar durante a simulação, sua escala de cálculo e os valores que eles podem assumir.

Quadro 2: atributos das células do CA.

Atributo	Mutável?	Escala	Valores possíveis
Capacidade de urbanização	Não	Célula	Verdadeiro ou falso
Alcançabilidade	Não	Célula	Verdadeiro ou falso
Máximo de unidades	Não	Célula	Números inteiros positivos
Unidades construídas	Sim	Subdivisão da célula	Números inteiros positivos
Unidades construídas ocupadas	Sim	Subdivisão da célula	Números inteiros positivos
Carregamento	Sim	Célula	Números inteiros positivos
Oportunidade espacial	Sim	Célula	Números decimais entre 0,0 e 1,0
Convergência espacial	Sim	Célula	Números decimais entre 0,0 e 1,0
Valor do solo	Sim	Subdivisão da célula	Números inteiros positivos
Risco de inundação	Sim	Célula	Porcentagem entre 0,0 e 100,0%

As regras que, neste estudo, definem o estado e o comportamento das células são complexas de serem descritas em relações diretas de causa e efeito. Isso se deve porque elas são dependentes do comportamento dos agentes e dos empreendedores imobiliários, o qual é regido por funções probabilísticas que visam simular as não linearidades do sistema. Além disso, a influência mútua entre células e agentes origina uma cadeia de causalidade circular que impossibilita a identificação da causa de cada mudança de estado. Assim, entende-se que as regras de transição do CA abrangem a definição de todos os seus atributos e da interação entre eles e os agentes e empreendedores imobiliários.

3.2.2 Agentes urbanos

Os agentes representam indivíduos pertencentes a estratos populacionais reais que ocupam o território para realização de atividades residenciais e comerciais. Eles buscam se instalar nas subdivisões de células que eles avaliam como adequadas conforme suas preferências individuais, permanecendo no mesmo local enquanto essas preferências continuarem sendo satisfeitas. Tal comportamento é ditado pelo seguinte grupo de atributos: uso, renda, risco máximo de inundação aceitável, mínimo de atratividade requerido, tempo máximo de permanência e grupo populacional ao qual pertence.

O **uso** indica se o agente representa uma demanda residencial ou uma oferta de serviço. O efeito desse atributo é que ele define a medida configuracional que o agente irá utilizar como parâmetro para avaliar se uma célula é atrativa: agentes residenciais buscam

se situar em áreas com altos valores de oportunidade espacial, enquanto agentes comerciais procuram se estabelecer onde há alta convergência espacial.

O atributo de **renda** representa o poder econômico do agente. Para que o agente se instale na subdivisão de uma célula, é necessário que sua renda seja maior do que o valor dessa subdivisão.

O **risco máximo de inundação** aceitável indica o percentual máximo que uma célula pode possuir para que o agente aceite permanecer em uma de suas subdivisões. Tal atributo funciona como o mecanismo que induz áreas com alto risco de inundação a gradativamente serem menos demandadas e se desvalorizarem.

O **mínimo de atratividade requerido** é definido a cada vez que o agente se estabelece em uma nova célula: multiplica-se o valor da oportunidade (para residências) ou da convergência (para comércios) por um valor aleatoriamente gerado entre 0,0 e 1,0, e o resultado se torna o limite mínimo que a oportunidade ou convergência da célula pode assumir para que o agente não a abandone. Esse atributo permite a reprodução de situações em que o indivíduo decide mudar de local na cidade devido à decadência da vizinhança onde habitava ou por causa do aparecimento de uma nova área atrativa.

O atributo de **tempo máximo de permanência** corresponde ao máximo de iterações que o agente pode permanecer em uma mesma célula, sendo ele definido randomicamente a cada vez que o agente se estabelece em uma nova célula. Sua função é a de representar o comportamento de indivíduos que deixam seu lugar de moradia por motivos individuais difíceis de serem previstos ou modelados.

Por fim, o **grupo populacional ao qual o agente pertence** indica se ele faz parte da população permanente da área de estudo ou de sua população flutuante. O seu objetivo é possibilitar a reprodução da variação demográfica sazonal observada no litoral norte gaúcho. Por isso, a definição deste atributo influencia tanto o valor atribuído ao tempo máximo de permanência do agente, quanto o modo como a atratividade de uma célula é percebida por ele.

Em relação ao tempo de permanência máxima, para agentes da população permanente é atribuído um valor randômico entre 6 e 240 iterações (considerando que cada iteração corresponde ao tempo de um mês) e, quando tal permanência máxima é alcançada, o agente busca uma nova célula para se localizar. Por outro lado, um agente sazonal é inicializado com permanência máxima entre 1 e 3 iterações (escolhido randomicamente) e, quando este tempo acaba, ele obrigatoriamente deixa o sistema sem buscar uma nova célula para se estabelecer.

Em relação à atratividade das células, parte-se da observação de que, considerando apenas agentes de uso residencial⁶, cada um dos referidos grupos populacionais busca áreas com características diferentes: os “veranistas” tendem a se localizar em áreas próximas à praia ou ao centro comercial da cidade; enquanto a população permanente tende a residir em áreas mais baratas e afastadas da praia, mas próximas a vias de alta acessibilidade (IBGE, 2011; RIO GRANDE DO SUL, 2015). Para representar essa diferença, o atributo de carregamento das células possui dois valores, cada um dando maior ênfase aos espaços tidos como mais atrativos por um dos referidos grupos populacionais, como foi mostrado anteriormente no Quadro 1. Essa duplicação dos carregamentos implica que cada célula possui dois valores de oportunidade espacial e cada agente apenas avalia aquele associado ao grupo populacional ao qual pertence.

O Quadro 3 apresenta um resumo dos atributos dos agentes, indicando se eles podem se modificar ao longo da simulação e quais os valores que eles podem assumir. Nota-se que, ao contrário das células do CA, os atributos dos agentes tendem a não se modificar durante as simulações. O que de fato é modificado é a sua posição no modelo, aspecto este que pode ser considerado como sendo o seu estado, o que faz com as regras de transição que os descrevem, para este estudo, são aquelas referentes a sua movimentação durante as simulações, descritas na seção 3.2.4.

Quadro 3: *atributos dos agentes.*

Atributo	Mutável?	Valores possíveis
Uso	Não	Demanda residencial ou oferta de serviço
Renda	Não	Números inteiros positivos
Risco máximo de inundação	Não	Porcentagens entre 0,0 e 100,0%
Mínimo de atratividade requerido	Sim	Números decimais entre 0,0 e 1,0
Tempo máximo de permanência	Sim	Números inteiros positivos
Grupo populacional	Não	População permanente ou temporária

3.2.3 Empreendedor imobiliário

O empreendedor imobiliário é responsável por modificar a quantidade de unidades construídas das subdivisões das células, sendo tal ação realizada quando ele verifica a

⁶ A atratividade para agentes comerciais permanece a mesma (medida de convergência espacial) tanto para os permanentes, quanto para os temporários.

possibilidade de obter retorno financeiro positivo em função disso. Para tanto, a cada iteração da simulação, o empreendedor analisa o retorno financeiro esperado para um conjunto de células definido aleatoriamente. Tal retorno é calculado conforme a *equação do empreendedor* (KRAFTA, 1994), apresentada na Equação 12, na qual o lucro L é igual aos ganhos esperados - valor médio das células vizinhas (p) multiplicado pelo número de unidades que podem ser construídas (u) - subtraídos pelos custos esperados (custo ct de compra do terreno e custo cc de construção da nova edificação). As células analisadas cujo lucro for maior que a margem estabelecida terão sua capacidade ampliada para o máximo de unidades permitidas conforme as regras do plano diretor municipal.

$$L = (u * p) - (ct + cc) \quad \text{(Equação 12)}$$

Os investidores imobiliários não têm uma presença física no modelo, apenas são visíveis as alterações que eles realizam na forma construída. Por isso, ao invés de serem modelados como agentes, eles são representados por uma função computacional. Isso implica que, ao contrário do que ocorre com os agentes urbanos e as células do CA, o empreendedor imobiliário consiste de uma única entidade homogênea, não possuindo atributos ou características próprias que variam ao longo do tempo.

3.2.4 Processo geral de simulação

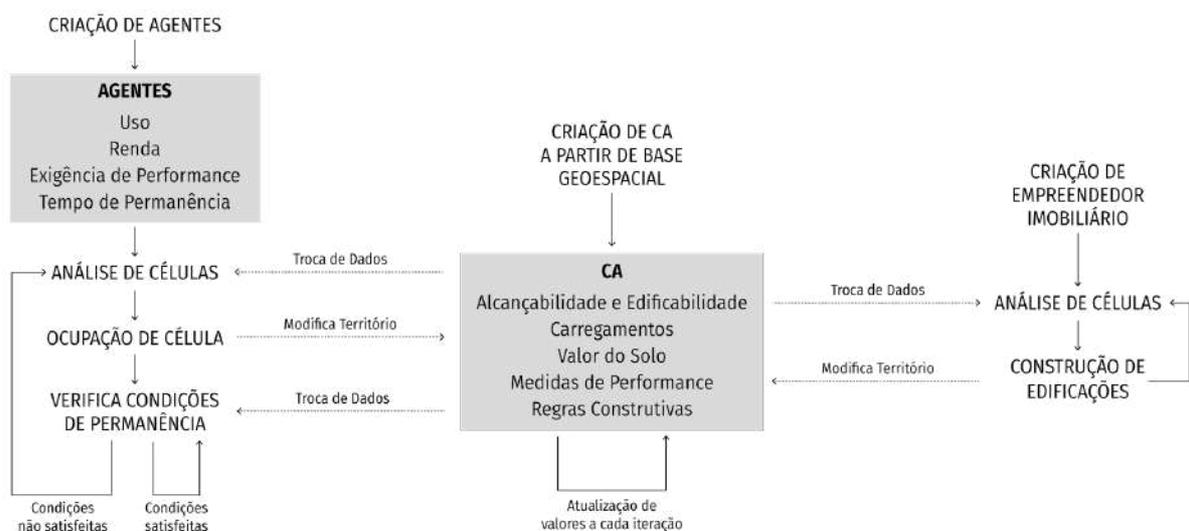


Figura 31: *Funcionamento do modelo conforme suas três principais entidades: agentes urbanos, células de território e empreendedor imobiliário.*

A Figura 31 representa diagramaticamente o processo de simulação considerando a interação entre as entidades descritas nas subseções anteriores. O processo se inicia com a criação do CA a partir de bases de dados geoespaciais da área de estudo, momento em

que ocorre a definição dos atributos de capacidade de urbanização, alcançabilidade e potencial construtivo das células, permitindo que elas sejam diferenciadas entre frações de água, praia e áreas urbanizáveis. Essa diferenciação possibilita a computação dos caminhos mínimos entre células, os quais serão utilizados para atualização das medidas de oportunidade e convergência ao longo da simulação. Além disso, agentes são inseridos antes do início da simulação para representar a população permanente pré-existente na área de estudo conforme dados do local.

Após essa inicialização, a cada iteração são inseridos novos agentes no modelo, os quais procuram uma subcélula para se alocar. Tal escolha ocorre conforme o seguinte processo:

- i) é definida uma lista de subdivisões de células escolhidas randomicamente que serão analisadas individualmente pelo agente;
- ii) se a renda do agente for maior do que o valor do solo da subdivisão analisada, seu risco de inundação for menor do que o máximo aceitável pelo agente e seu valor de oportunidade (para residências) ou convergência (para comércios) for o maior encontrado até então na análise, então o agente julgará a subdivisão como adequada;
- iii) se tal subdivisão considerada adequada estiver desocupada, ela se torna a escolha preferida momentânea do agente; caso contrário, ele a descarta da análise, mas o valor do solo da subdivisão é incrementado em uma unidade de modo a refletir o interesse existente nela;
- iv) quando o agente termina de analisar a lista de subcélulas, ele se estabelece na sua escolha preferida; mas, caso não tenha encontrado nenhuma adequada durante a análise, ele deixa o sistema.

Em resumo, o agente se estabelece na subcélula mais atrativa dentre aquelas compatíveis com sua renda e que estavam na lista de possibilidades aleatoriamente gerada, causando, durante o processo de busca, a valorização das subcélulas já ocupadas que atraíram seu interesse.

Após definir sua alocação, o agente inicia a verificação das condições de sua permanência: a cada iteração ele avalia a atualização do valor da subcélula, de sua atratividade e de seu risco de inundação. Caso esses valores não sejam mais compatíveis, respectivamente, com os atributos de renda, mínimo de atratividade requerido e risco máximo de inundação aceitável, então o agente abandona a célula e busca uma nova (no caso de agentes permanentes) ou deixa o sistema (no caso de agentes temporários).

Simultaneamente, ao fim de cada iteração, duas outras dinâmicas ocorrem: i) é atualizado o risco de inundação e o cálculo das medidas de oportunidade e convergência espacial das células; e ii) os empreendedores imobiliários analisam um conjunto de subcélulas escolhido aleatoriamente em busca de locais para investir. Caso o empreendedor encontre uma subcélula adequada, a capacidade dela é expandida, tornando-se igual ao máximo permitido pelo regime urbanístico local e, conseqüentemente, possibilitando que uma maior quantidade de agentes se estabeleça ali.

3.3 INTEGRAÇÃO DO MODELO COM BASES DE DADOS DA ÁREA DE ESTUDO

A seguir, descreve-se como a proposta conceitual da seção anterior foi integrada às bases de dados geoespaciais da área de estudo para originar a implementação computacional operacionalizável do modelo para os municípios de Imbé e Tramandaí. Inicia-se com a listagem das fontes dos dados utilizados, seguindo com a explicação de como tais bases foram adequadas às escalas espaciais e temporais da simulação, servindo de embasamento para o comportamento das entidades do modelo. Por fim, é apresentado como funciona a evolução desse conjunto durante o processo simulatório.

Tal processo foi realizado em sua quase totalidade na plataforma *Gama*, ambiente computacional especializado para o desenvolvimento de modelos baseados em agentes e autômatos celulares (TAILLANDIER *et al.*, 2019), o qual foi escolhido, dentre os softwares de modelagem e simulação existentes, por possuir as funcionalidades mais eficientes para importação de dados geoespaciais em formato *shapefile*. Fora dessa plataforma, foram realizadas apenas etapas de preparação das bases de dados, as quais foram executadas em ambiente SIG.

Também deve-se mencionar que, previamente à integração do modelo conceitual com as bases de dados, foi definido que o recorte temporal a ser representado nas simulações seria o intervalo entre junho de 2010 e junho de 2040. Tal definição se deve a diferentes fatores: i) a data de início foi escolhida porque, devido à escassez de bases de dados referentes à configuração urbana da área de estudo, os dados de IBGE (2011) para o ano de 2010 são aqueles que permitem com maior precisão remontar um estado passado do local analisado; ii) a data de fim foi definida empiricamente por meio da observação do tempo médio de execução das simulações, que serviu de indicativo de que o ano de 2040 seria o limite para o qual seria possível realizar um número satisfatório de execuções dentro dos prazos estabelecidos para o presente trabalho; e iii) o fato da data de início estar no passado em relação ao período de elaboração deste trabalho permite que sejam utilizados

dados do ano de 2020 para realizar a etapa de validação do modelo que envolve a comparação entre mapas, como estabelecido na seção de referencial teórico.

Outra definição prévia relevante referente à temporalidade do modelo foi a de que cada iteração da simulação corresponderia ao período de um mês. Tal escolha foi feita para tornar possível a representação da variação populacional da área de estudo entre os meses de verão e de inverno. Tendo em vista que as bases de dados que fundamentaram a modelagem deste aspecto fornecem resultados para cada mês (MTE, 2021b, 2021a; ZUANAZZI; BARTELS, 2016), entendeu-se que essa opção seria mais adequada do que divisões por semestres, trimestres ou afins.

3.3.1 Estado inicial do modelo

A definição de uma configuração inicial para o processo de simulação exigiu o estabelecimento, de acordo com os dados disponíveis, dos valores com os quais os atributos das entidades do modelo deveriam ser inicializados. Para o CA, tal definição foi realizada com base na análise de imagens aéreas do ano de 2010 disponíveis na plataforma Google Earth (GOOGLE EARTH, 2020), a partir das quais foi possível estabelecer quais células correspondiam a áreas de água, de praia ou de urbanização. A partir dessa análise, foram definidos os valores dos atributos de capacidade de urbanização, alcançabilidade e total de unidades construídas conforme as definições expostas na seção anterior. A verificação do zoneamento dos planos diretores municipais (IMBÉ, 2013; OSÓRIO, 2006; TRAMANDAÍ, 2017) permitiu a inclusão das áreas de preservação ou ocupação restrita dentre as que não podem receber agentes no modelo, além da definição do atributo que limita o máximo de unidades construídas permitidas em cada célula.

A quantidade inicial de agentes e a sua localização foram definidas conforme o seu uso do solo. Para residências, foram utilizados os dados da Grade Estatística do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2016), enquanto que comércios, serviços e equipamentos públicos foram posicionados conforme os dados do Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (IBGE, [s. d.]). Já a renda de cada agente foi definida com base nos dados do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2011).

O Quadro 4 apresenta um resumo dessas referências utilizadas para definição dos atributos das células e agentes presentes na configuração inicial do modelo.

Quadro 4 - Referências para inicialização de agentes populacionais e células territoriais

Agentes Residenciais (População Permanente)	
Localização	Quantidade de domicílios permanentemente ocupados em cada unidade espacial da Grade Estatística do Censo Demográfico de 2010 (IBGE,

	2016).
Renda	Quantidade de domicílios por faixa de renda conforme IBGE (2011).
Agentes Comerciais (População Permanente)	
Localização	Registros do Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos ⁷ (IBGE, [s. d.]).
Renda	Quantidade de domicílios por faixa de renda conforme IBGE (2011).
Células do Território	
Forma edificada e elementos naturais	Imagens aéreas do ano de 2010 disponíveis no software Google Earth (GOOGLE EARTH, 2020).
Restrições construtivas	Regime urbanístico local conforme planos diretores municipais (IMBÉ, 2013; OSÓRIO, 2006; TRAMANDAÍ, 2017)
Equipamentos públicos	Registros do Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos ⁸ (IBGE, [s. d.]).

Tais bases de dados disponíveis possuem suas escalas espaciais próprias, as quais não necessariamente coincidem entre si ou com as escalas do modelo computacional. Por isso, a construção da configuração inicial do modelo exigiu a compatibilização espacial entre suas entidades constituintes e os referidos dados utilizados. Tal processo se dividiu em dois procedimentos separados devido às diferenças das bases disponíveis para densidades residenciais e estabelecimentos comerciais.

Para a integração dos agentes residenciais às células do território, foram utilizadas quatro fontes de dados distintas, conforme resumido pela Figura 32:

- a) A quantidade de unidades construídas é estimada a partir de imagens aéreas (GOOGLE EARTH, 2020). O valor inicialmente atribuído a todas as subdivisões de uma célula é igual ao número de pavimentos da edificação mais alta abrangida por tal célula.
- b) Operação semelhante é realizada para definir o máximo de pavimentos permitido pelos planos diretores municipais: atribui-se a cada célula o maior valor disponível dentre as zonas que interseccionam a célula em questão.
- c) Para a localização dos agentes residenciais, é utilizada como referência a quantidade de domicílios permanentemente ocupados, definido conforme a

⁷ Conteúdo disponibilizado na página de downloads do IBGE:
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>

⁸ Conteúdo disponibilizado na página de downloads do IBGE:
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>

grade estatística do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2016). Tal base divide o território urbano em células quadradas com 200 metros de aresta, cada uma apresentando a quantidade absoluta de domicílios permanentemente ocupados que ela abrange. Foram verificadas quais as células do CA interseccionam cada uma das divisões de tal grade e, então, foi distribuída randomicamente entre tais células uma quantidade de agentes igual ao total de domicílios permanentemente ocupados da divisão em questão da grade estatística.

- d) A renda de cada agente foi definida a partir dos dados de rendimento por setor censitário do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2011): a faixa de renda de cada agente é escolhida randomicamente, utilizando a proporção da população em cada faixa de renda do Censo Demográfico como a probabilidade do agente pertencer a tal faixa nessa escolha randômica (ou seja, se 30% dos habitantes de um setor censitário possuem renda entre um e dois salários mínimos, então o agente inicializado neste mesmo setor terá 30% de chances de possuir renda entre um e dois salários mínimos). Após ser definida a faixa de renda, o valor exato da renda do agente é definido por meio de uma nova escolha randômica considerando como limites mínimo e máximo possíveis os valores da faixa definida.

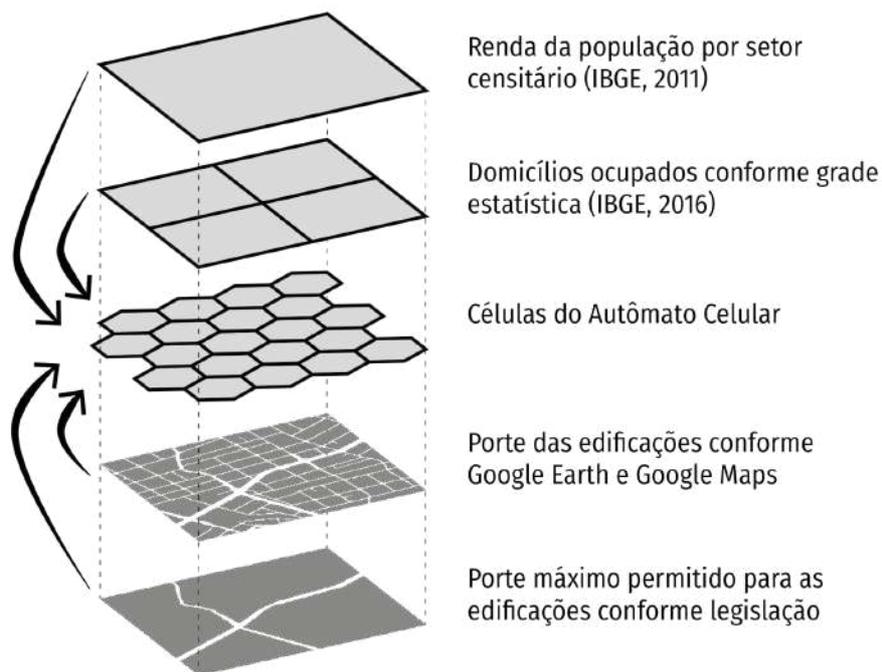


Figura 32: *Integração entre dados referentes a agentes residenciais permanentes e as células do CA.*

Já os agentes comerciais são inicializados a partir da georreferenciação, em ambiente SIG, do endereço que consta no Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (IBGE, [s. d.]), resultando em uma camada vetorial de pontos. Assim, para cada um desses endereços, um agente comercial é criado na célula que abrange a sua respectiva localização. A renda de tal agente é definida utilizando as informações do Censo Demográfico do mesmo modo que foi descrito para os agentes residenciais, uma vez que não foram encontrados dados geoespaciais sobre atributos econômicos ou financeiros de estabelecimentos comerciais e de serviços. Por fim, a quantidade máxima de agentes comerciais que uma célula pode conter é definida tendo como referência as regras de uso do solo vigentes nos municípios da área de estudo. A Figura 33 resume essa relação entre diferentes bases de dados e unidades espaciais.

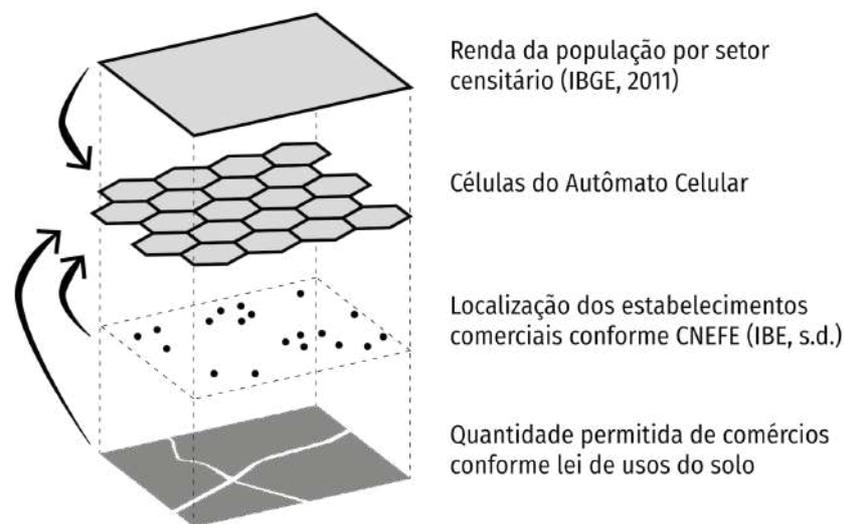


Figura 33: *Integração entre dados referentes a agentes comerciais permanentes e as células do CA.*

Além disso, a falta de uma base contendo dados de valor do solo para o ano de 2010 exigiu que tal atributo fosse inicializado com valores estimados a partir da renda dos agentes existentes no modelo em seu estado inicial. Para tanto, partiu-se da suposição que o valor de cada unidade ocupada é compatível com a renda do agente que a habita e que o valor das unidades desocupadas é similar à média observada em sua vizinhança. Por isso, definiu-se que:

- i) O valor de uma unidade ocupada no estado inicial do modelo é igual a 90% do valor da renda do agente que a ocupa. Essa diferença entre os dois valores tem a função de servir como margem de segurança para que o indivíduo não precise abandonar sua localização no início das simulações devido a um aumento excepcional no preço de sua célula.

- ii) O valor de uma unidade desocupada no estado inicial do modelo é igual à média das unidades construídas ocupadas em sua vizinhança.

3.3.2 Variação populacional durante as simulações

As etapas da simulação que ocorrem após a inicialização da configuração inicial são baseadas em duas dinâmicas principais: i) o ingresso de novos agentes no sistema a cada iteração, e ii) a contínua atualização dos atributos de todos os componentes do sistema. Para o primeiro item, foram utilizadas diferentes referências para o crescimento demográfico dependendo do período representado pela iteração: para os anos de 2010 a 2020, utilizou-se dados empíricos referentes às taxas de crescimento local conforme o uso do solo e perfil populacional; enquanto que, para o período entre 2020 e 2040, o crescimento foi baseado em projeções de crescimento futuro.

Iniciando com a descrição do intervalo entre 2010 e 2020, para os **agentes residenciais permanentes**, utilizou-se como base as estimativas anuais da população residente em Imbé e Tramandaí conforme IBGE (2020). A partir desses dados, a variação anual observada foi calculada conforme a Equação 13, em que a taxa de crescimento w para o ano n é definida como a divisão entre a população total para n e a população total para o ano anterior ($n-1$).

$$w_n = pop_n / pop_{n-1} \quad (\text{Equação 13})$$

Tal taxa anual foi convertida para uma taxa mensal por meio da operação apresentada na Equação 14, em que w' corresponde à variação percentual de agentes ocorrida em todos os meses do ano n , que é igual à taxa anual de crescimento w para o ano n elevado a um doze avos.

$$w'_n = w_n^{\frac{1}{12}} \quad (\text{Equação 14})$$

Sendo assim, a Equação 15 mostra o cálculo da quantidade de novos agentes residenciais permanentes inseridos na iteração n entre 2010 e 2020 (w''), onde w' corresponde à taxa de crescimento mensal calculada para o ano ao qual pertence a iteração n .

$$w''_n = pop_{n-1} * (w'_n - 1) \quad (\text{Equação 15})$$

Para a introdução dos **agentes residenciais temporários** no modelo, são utilizadas as estimativas mensais de população flutuante apresentadas por Zuanazzi e Bartels (2016). A partir dos dados apresentados pelos autores, foi calculada, para cada mês do ano, a

proporção média k da população flutuante $popf$ em relação à permanente pop (Equação 16).

$$k_n = popf_n / pop_n \quad (\text{Equação 16})$$

A partir da definição dessas proporções para cada mês do ano, a quantidade de agentes residenciais temporários inseridas na iteração n entre 2010 e 2020 é definida pela Equação 17, na qual pop corresponde à população total no modelo na iteração anterior e $popf$ corresponde à quantidade de agentes temporários já existentes no modelo na iteração anterior.

$$wt_n = (pop_{n-1} * k_n) - popf_{n-1} \quad (\text{Equação 17})$$

Para os **agentes comerciais permanentes**, foram utilizados os dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), disponibilizada pelo Ministério da Economia (MTE, 2021b), que indicam a quantidade de empresas ativas no setor de comércio e serviços para os municípios de Imbé e Tramandaí. Assim como para os agentes residenciais, a variação anual dessa variável foi transformada em taxa mensal que é utilizada para determinar a quantidade de novos agentes inseridos a cada iteração.

Já a inserção de **agentes comerciais temporários** é definida com base nos dados de indivíduos formalmente empregados conforme o Cadastro Nacional de Empregados e Desempregados (CAGED), também disponibilizado pelo Ministério da Economia (MTE, 2021a). Assim, do mesmo modo que realizado para os agentes residenciais, é calculada, para cada mês do ano, a proporção média de estabelecimentos temporários em relação à quantidade de estabelecimentos permanentes. Essas médias são utilizadas para as iterações correspondentes a cada mês do ano durante toda a simulação.

Para a simulação do crescimento populacional em iterações correspondentes ao período 2020-2040, utilizou-se como base as taxas observadas nas projeções para a população do Rio Grande do Sul, conforme IBGE (2021). O uso de tais dados agregados para o estado foi necessário devido à ausência de estimativas futuras realizadas para a área específica analisada neste estudo. Sendo assim, para tais projeções, foi utilizado o mesmo método de cálculo de taxas mensais de variação populacional que o apresentado previamente para os agentes residenciais permanentes.

3.3.3 Aumento do nível do mar

As estimativas de aumento do nível do mar são obtidas da plataforma Coastal Risk Screening Tool (CLIMATE CENTRAL, 2020), que se baseia nos estudos de Kulp e Strauss (2019). Tal plataforma fornece dados para o período de 2030 a 2100, com um intervalo de

dez anos entre cada mapa, tendo sido para este estudo aqueles estabelecidos para os anos de 2030 e 2040, visto o período considerado para as simulações.

Em cada um desses mapas, são apresentados três polígonos de risco de inundação: i) áreas que, na data em questão, muito provavelmente estarão abaixo do nível do mar e por isso têm altas chances de inundação; ii) áreas que, apesar de provavelmente não estarem abaixo do nível do mar, possuem chances moderadas de alagamento quando se considera sua média anual de cheias devido a chuvas; e iii) áreas que possuem algum risco de inundação no caso de ocorrer uma cheia com tempo de retorno de 10 anos. Tendo em vista tais descrições, atribuiu-se a esses polígonos um percentual de risco igual a, respectivamente, 100%, 50% e 25%.

Para integrar tais dados ao modelo proposto, verifica-se os polígonos de risco que cada célula intersecta nos mapas para os anos considerados. O polígono de mais alto risco com o qual a célula faz interseção determina o risco que ela possuirá para a iteração correspondente ao ano do mapa. Sendo assim, se uma célula interseccionar o polígono de baixo risco do mapa de 2030 e o de alto risco no mapa de 2040, então sua probabilidade de inundação será igual a 25% na iteração 240 (correspondente a julho de 2030) e igual a 100% na iteração 360 (julho de 2040).

Entretanto, parte-se do pressuposto que o risco de inundação não é um aspecto de crescimento pontual, mas sim um atributo que cresce gradativamente ao longo do tempo conforme vão ocorrendo as mudanças ambientais que o influenciam. Nesse sentido, para reproduzir tal dinâmica, foi definido que, para as iterações até o ano de 2020, o referido risco seria nulo, tendo em vista que, para tal período, os dados do sistema hidrográfico já descrevem o estado atual da cobertura do território por áreas de águas. Porém, a partir de julho de 2020, a cada iteração o risco de inundação das células é modificado para que ele gradativamente se aproxime do valor esperado para o ano de 2030. Ao alcançar tal data, caso o valor de risco para 2030 seja inferior ao de 2040, é então repetido o mesmo processo de crescimento gradativo.

Acredita-se que tal processo de definição do atributo possibilite a reprodução da gradativa desvalorização que se esperaria para a qual, aos poucos, se cria o consenso de que provavelmente estará abaixo do nível do mar em determinado momento.

3.4 EXECUÇÃO DE SIMULAÇÕES E REPRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

O modelo foi implementado computacionalmente na Plataforma Gama, software com funcionalidades específicas para simplificar o processo de criação de modelos baseados em agentes ou autômatos (TAILLANDIER *et al.*, 2019). O código que rege o modelo foi escrito

em linguagem GAML e as bases de dados utilizadas foram inseridas no software por meio de arquivos *shapefile*. Como resultado, ao fim de cada iteração, o *software* fornece diagramas representando o valor dos seguintes atributos para cada célula do CA que representa o território de estudo:

- a) quantidade de agentes estabelecidos na célula;
- b) quantidade de agentes comerciais estabelecidos na célula⁹;
- c) valor média do solo das sub células contidas em cada célula;
- d) quantidade média de unidades construídas nas sub células contidas em cada célula;
- e) valor da oportunidade espacial na célula;
- f) valor da convergência espacial na célula considerando as preferências espaciais da população fixa;
- g) valor da convergência espacial na célula considerando as preferências espaciais da população sazonal;
- h) renda média dos agentes que residem na célula;

O modelo computacional também foi programado para, ao fim de cada iteração, fornecer o valor das seguintes medidas representativas do estado do sistema como um todo:

- a) total de agentes no modelo, categorizado pelo uso e pelo tipo (sazonal ou fixo);
- b) qualidade do ajuste entre simulação e situação real no ano de 2020 para a quantidade de área construída em cada célula;
- c) dimensão radial da quantidade de unidades construídas para julho de 2040;
- d) frequência do tamanho de *clusters* para julho de 2040.

Adicionalmente, visando criar mapas-síntese para facilitar a representação dos resultados, foi utilizado um algoritmo de análise de imagens para verificar, para cada atributo, o valor médio de cada célula considerando todas as simulações realizadas: analise-se o código RGB da cor de cada pixel das imagens, verifica-se qual o valor do atributo associado àquela cor e calcula-se a média do valor que aquele pixel específico apresentou em todas as simulações realizadas. Tal ferramenta permitiu a elaboração de uma espécie mapa mostrando quais os estados mais representativos para o resultado de cada atributo.

⁹ Os agentes residenciais, devido ao seu maior número em relação aos comerciais, predominam visualmente no mapa do item anterior. Por isso, foi necessário criar um mapa específico para agentes comerciais para que fosse possível observar visualmente seu comportamento.

3.5 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação dos resultados das simulações foi realizada utilizando três medidas distintas: i) a qualidade do ajuste para múltiplas resoluções, ii) a dimensão radial e iii) a frequência do tamanho dos *clusters*. A primeira delas foi calculada utilizando resultados da simulação para o ano de 2020 e visa indicar a capacidade do modelo de representar dinâmicas específicas da área de estudo. Já as outras duas medidas são calculadas a partir de mapas gerados para o ano de 2040, data final da simulação, e servem para indicar se os resultados produzidos são compatíveis com as características esperadas para um sistema urbano.

Para a **qualidade do ajuste**, compara-se os dados da quantidade de unidades construídas para a 120ª iteração do modelo (correspondente a julho de 2020) com dados referentes à altura das edificações obtidos para a mesma data em Google Earth (2020). Isso foi realizado conforme o seguinte procedimento:

- i) inicialmente foi calculada, para cada célula do CA, a sua média de unidades construídas por subdivisão;
- ii) as células foram categorizadas conforme tal valor médio de acordo com os seguintes cinco grupos: *a*) média abaixo de 0,5; *b*) média entre 0,5 e 2,0; *c*) média entre 2,0 e 4,0; *d*) média entre 4,0 e 8,0; e *e*) média acima de 8,0 pavimentos;
- iii) verificou-se, a partir das imagens aéreas de Google Earth (2020), a edificação de maior altura existente em julho de 2020 e que era abrangida por cada uma das células do CA;
- iv) as células foram classificadas por essas alturas seguindo a mesma categorização descrita no item *ii*;
- v) as quantidades associadas a esses agrupamentos foram utilizadas como parâmetros para o cálculo da qualidade do ajuste - como descrito na seção de revisão bibliográfica - utilizando janelas de amostragem de quatro tamanhos diferentes: *a*) uma única célula; *b*) raio igual a três células (~240m); *c*) raio igual a sete células (~560m); e *d*) raio igual a quinze células (~1,2km).

O resultado final é composto por quatro valores de qualidade de ajuste - um para cada resolução analisada - indicando a proximidade entre a forma construída simulada para a área de estudo e o que se observou na realidade.

A **dimensão radial** foi calculada a partir dos mapas de quantidade de unidades construídas para a iteração final das simulações, que corresponde a junho de 2040. Para este cálculo, o centro da cidade é definido por meio da computação do centro geométrico da forma construída simulada ponderado pela altura das edificações. A partir dessa definição, é gerado o gráfico que descreve a relação entre área construída e a distância em relação ao tal ponto central, sendo a área construída definida como o total de unidades construídas observadas dentro do raio analisado e a distância em relação ao centro medida utilizando as células como unidade espacial.

Por fim, a **frequência do tamanho dos clusters** é também calculada para os mapas de quantidade de unidades construídas ao fim da simulação e para esta medida também se utiliza a mesma categorização por alturas proposta no cálculo da qualidade do ajuste. Com base nisso, um algoritmo recursivo é executado que registra a quantidade de células agrupadas pertencentes à mesma categoria. A frequência dos tamanhos observados para esses grupos é o que origina o gráfico resultante dessa medida.

4. RESULTADOS

A partir dos elementos propostos na seção anterior, foram realizadas simulações para o desenvolvimento urbano dos municípios de Tramandaí e Imbé para o período entre junho de 2010 e junho de 2040, com cada iteração correspondendo ao tempo de um mês. O objetivo deste capítulo é apresentar uma síntese dos resultados obtidos em tais simulações, bem como descrever os valores obtidos nos procedimentos de validação de tais resultados.

Ao total, foram realizadas 31 simulações para a versão final do modelo proposto, tendo sido essa quantidade limitada pelo tempo de execução computacional do modelo, cuja duração média foi igual a 40 horas para cada simulação realizada. Cada uma dessas execuções produziu aproximadamente um total de 3 mil imagens descrevendo seu funcionamento, uma vez que a cada uma das 360 iterações eram salvos os mapas correspondentes a cada um dos atributos do CA ou dos agentes possíveis de serem espacializados. Sendo assim, o conjunto total de imagens produzidas pelas simulações ultrapassa os 100 mil arquivos, os quais são complementados por dados estatísticos utilizados para a validação dos resultados. Devido a essa grande quantidade de material, há uma certa dificuldade em se descrever a totalidade dos resultados obtidos, tendo sido, neste capítulo, utilizado amplamente o recurso dos mapas-síntese, os quais possibilitam a junção em um único mapa dos múltiplos resultados obtidos para cada atributo em uma determinada iteração.

Também deve-se considerar que há uma dificuldade em se individualizar os resultados específicos de um atributo ou medida, uma vez que geralmente eles estão diretamente relacionados a quase todas as outras propriedades do sistema. Tentou-se, na explicação a seguir, tornar a descrição mais clara por meio do estabelecimento de uma sequência em que se inicia com a exposição dos resultados para atributos mais tangíveis - aqueles mais fáceis de serem associados a situações reais, como a localização de residências e comércios na cidade - e finaliza-se com aspectos mais abstratos, como o resultado das medidas configuracionais de oportunidade e convergência. Ao fim, é realizada uma análise geral, visando integrar os resultados observados para todos os atributos de modo a se encaminhar para o capítulo de conclusões.

4.1 EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE AGENTES

A Figura 34 mostra a quantidade média de agentes residenciais e comerciais a cada iteração. Conforme mencionado na seção de metodologia, para o embasamento de tal aspecto foram utilizados dois tipos de dados: para o período entre 2010 e 2020, foram usadas bases de dados reais sobre a área de estudo; enquanto que, para o período

posterior, foram utilizadas projeções futuras para o Rio Grande do Sul, as quais indicavam uma tendência de crescimento até o ano de 2030 e, posteriormente, estagnação ou leve declínio populacional.

evolução da quantidade de agentes no modelo

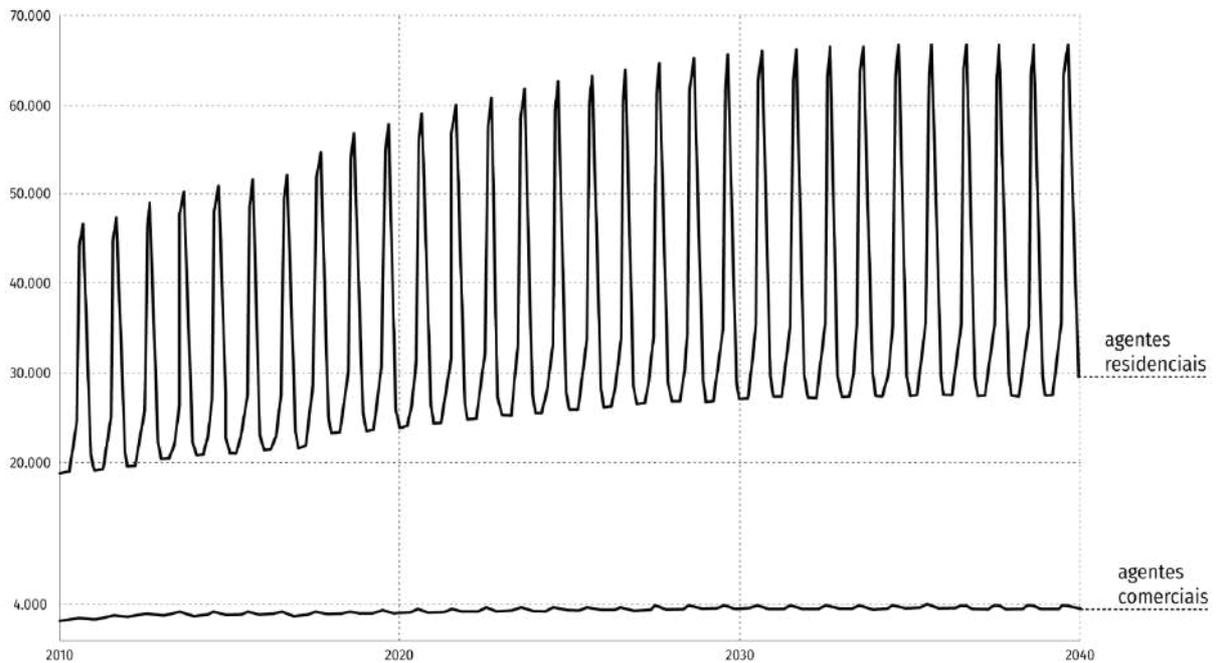


Figura 34: Gráfico da média da população durante cada iteração das simulações

4.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS AGENTES

A Figura 35 apresenta a síntese da distribuição espacial dos agentes durante as simulações. Nela, a intensidade da cor laranja representa a quantidade de agentes residenciais localizados no local, enquanto a cor roxa indica células em que há o predomínio de agentes comerciais.

Em tal conjunto de mapas, é possível visualizar o efeito da variação sazonal da população, a qual resulta em uma ocupação consideravelmente maior da área de estudo nos meses de verão do que quando se compara com o período do inverno. Além disso, especialmente nas iterações finais, observa-se um relativo esvaziamento da área de estudo, causada tanto pelo decréscimo populacional previsto para o Rio Grande do Sul durante a década de 2030, quanto pelo efeito da inundação de partes do território (células em azul escuro) devido ao aumento do nível do mar.

Distribuição espacial dos agentes

Predomínio de residências

- 1 - 6 agentes na célula
- 7 - 12 agentes na célula
- 13 - 18 agentes na célula
- 19 - 24 agentes na célula
- 25 - ... agentes na célula

Predomínio de comércios

- 1 - 4 agentes na célula
- 5 - 8 agentes na célula
- 9 - ... agentes na célula

Outros

- célula não urbanizada
- célula com ocupação proibida
- célula com risco de inundação

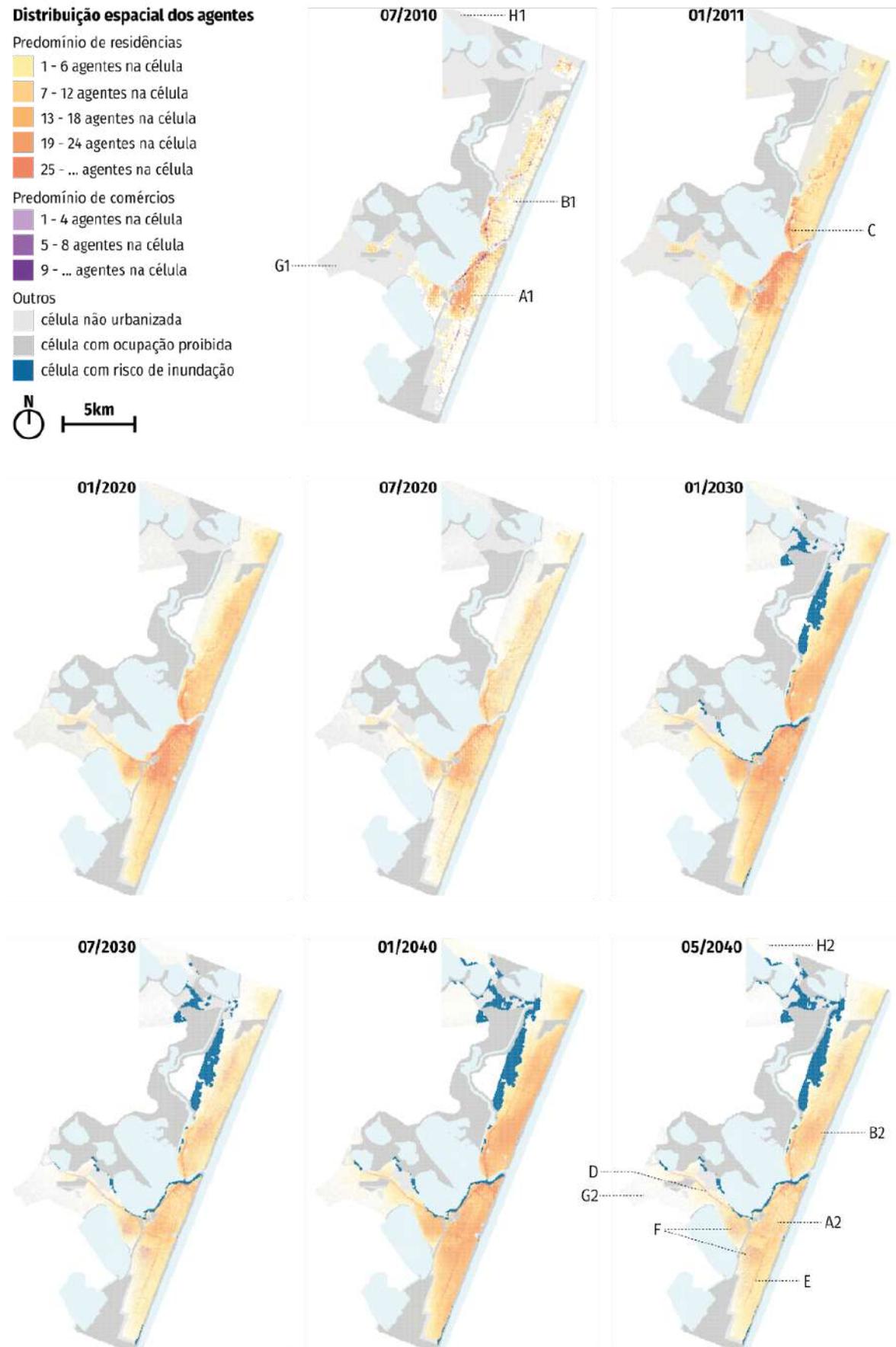
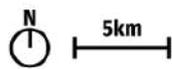


Figura 35: Síntese da evolução da distribuição espacial dos agentes durante as simulações

Em termos gerais, com o decorrer das iterações, há a tendência dos agentes deixarem de se concentrar em uma quantidade reduzida de áreas e passarem a se distribuir de maneira mais difusa pelo território. Esse maior espalhamento dos agentes pelo território pode, por exemplo, ser visualizado na comparação da área do ponto A1 do diagrama do ano de 2010 com o ponto A2 do diagrama de maio de 2040: nota-se que, enquanto o primeiro indica a maior concentração de densidades do sistema até então, o segundo já mostra uma situação sem grandes contrastes entre as zonas dos municípios. A ocorrência desse fenômeno se deve aos atributos cujos resultados serão apresentados na sequência, envolvendo uma queda da atratividade da área central de Tramandaí no entorno dos pontos A1 e A2 devido a uma combinação de decréscimo populacional com o aumento do risco de inundação observado para essa porção da cidade.

A área com maior ganho de importância durante as simulações é a região de Imbé marcada com o ponto B1 no diagrama inicial e, no final, com B2. Esse crescimento parece ser uma espécie de expansão do centro de Tramandaí (ponto A1) para além da divisa intermunicipal e seu surgimento pode estar relacionado com o declínio da área costeira de Imbé indicada com o ponto C no diagrama de 01/2011, na qual houve o aumento do risco de inundação pelo rio Tramandaí.

Junto com tal porção do território, o ponto D indica a consolidação da estrada RS-030 como uma faixa com presença relevante de agentes, provavelmente devido aos altos valores de oportunidade e convergência das células ali localizadas. Mesmo motivo pelo qual é possível visualizar que a faixa em torno da RS-786 (ponto E) mantém sua relevância ao longo das simulações, servindo como eixo de crescimento da área de estudo em direção ao litoral sul do estado.

As áreas marcadas com o ponto F indicam as regiões onde, em diversas simulações, ocorreu a concentração de agentes comerciais. Tal aspecto é ilustrado com maior detalhe na Figura 36, em que é possível ver que, enquanto nas iterações iniciais os comércios e serviços (representados pela cor roxa) se localizavam ao longo dos principais eixos de mobilidade do sistema, em etapas posteriores da simulação eles haviam alterado sua organização para o formato de pólos comerciais que circundam as áreas com maior quantidade de residentes. Tal fenômeno ocorre devido a uma especificidade da medida de convergência espacial que foi observada em grande parte das simulações realizadas e que será descrita em detalhe na subseção específica para os mapas dessa medida.

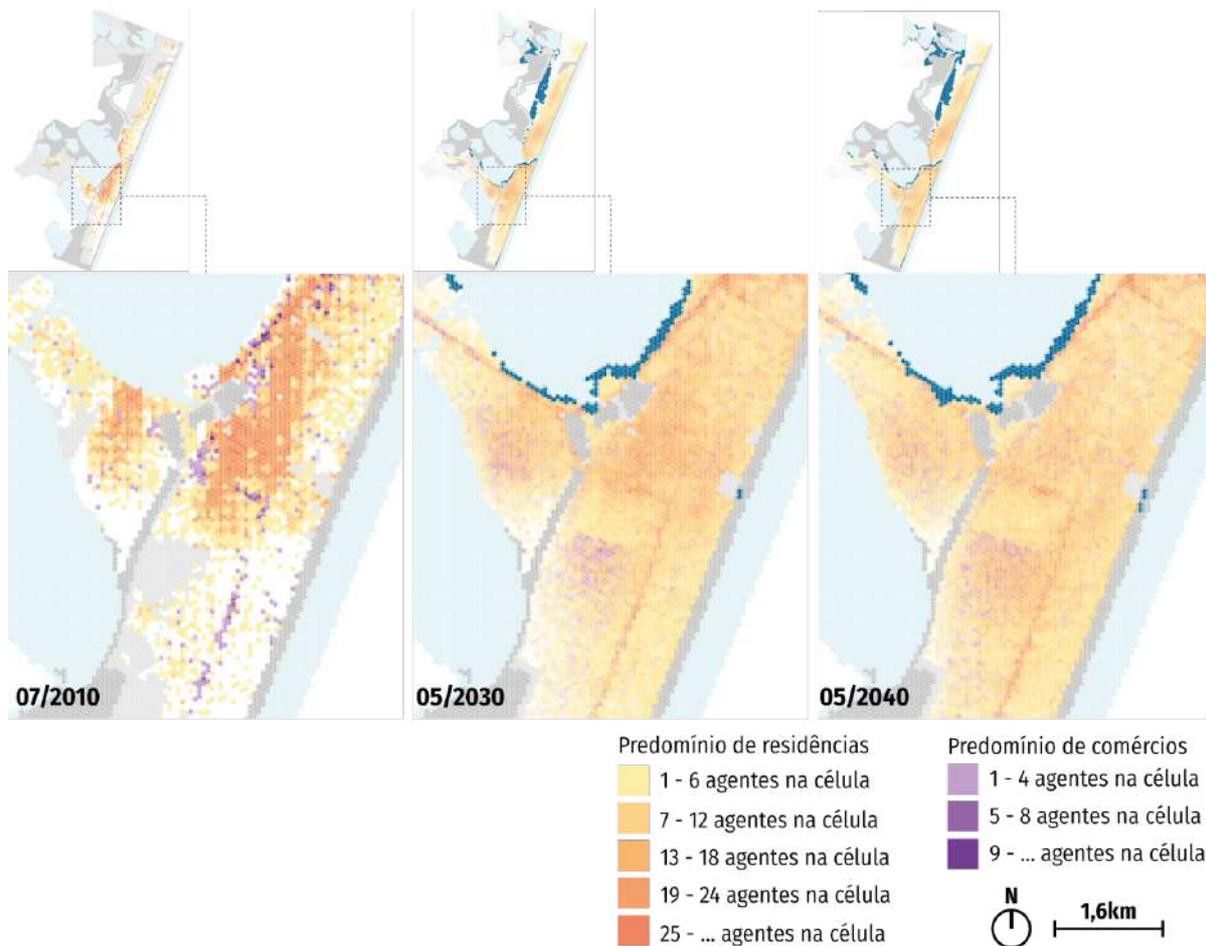


Figura 36: Detalhe da formação de pólos comerciais no entorno da área central de Tramandaí.

Por fim, os pontos G1 e H1 no diagrama inicial indicam áreas que, no ano de 2010, não constituíam zonas urbanas. Mas, como pode ser visto no diagrama final nos pontos G2 e H2, tais áreas foram gradativamente sendo ocupadas por agentes urbanos devido, principalmente, ao fato delas estarem na proximidade das principais estradas da área de estudo. Desse modo, um dos indicativos dos resultados das simulações é o de que, caso o crescimento populacional torne escassos os locais disponíveis nas áreas centrais da cidade, o entorno das estradas parece constituir um dos locais mais propensos a receberem as novas ocupações urbanas.

4.3 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS AGENTES COMERCIAIS

A Figura 37 apresenta a síntese da distribuição dos agentes comerciais nas células durante as simulações. Nela, quanto maior a intensidade da cor vermelha, maior a quantidade de estabelecimentos comerciais ou de serviços situados ali.



Figura 37: Síntese da evolução da distribuição espacial dos agentes durante as simulações

O estado inicial do sistema era caracterizado pela concentração dos indivíduos em áreas bastante específicas, basicamente junto ao eixo da RS-030 no centro de Tramandaí (ponto A) e no entorno do trecho inicial da avenida Paraguassú em Imbé (ponto B). Com o decorrer da simulação, observa-se uma tendência de difusão dos agentes pelo território, similar ao que foi visto na evolução dos agentes residenciais. A partir de então, apesar de haver pouco contraste entre a quantidade de agentes em cada área ocupada, alguns tipos de configuração chamam a atenção: i) conforme já mencionado, há o surgimento de pólos comerciais no entorno das áreas centrais (ponto C); ii) há uma nova concentração dos agentes no eixo da estrada RS-030 (ponto D); e iii) há um aumento considerável da quantidade de agentes na região de Imbé logo ao norte da parte central da área de estudo (ponto E).

4.4 QUANTIDADE DE UNIDADES CONSTRUÍDAS

A Figura 38 apresenta a síntese da evolução da área construída nas células durante as simulações. Nela, quanto mais escura a cor da célula, maior a quantidade de unidades construídas ali. Em tal representação, não foi feita a diferenciação entre meses de verão e de inverno, pois a variável em questão evolui apenas de forma acumulada, visto que o modelo não prevê a diminuição da quantidade de unidades construídas.

Observa-se, ao longo de toda a simulação, que a área central de Tramandaí (ponto A no diagrama final) possui a maior hierarquia para este atributo. As células dessa área crescem a partir de um núcleo inicial seguindo um processo de aglomeração que aumenta a importância relativa do local com o passar do tempo. Além disso, estruturado em tal crescimento está a consolidação dos eixos da avenida Flores da Cunha em Tramandaí (ponto B) e da avenida Paraguassú em Imbé (ponto C).

Também se verifica a expansão da mancha urbanizada para partes do território previamente não urbanizadas, sejam elas nos arredores das áreas centrais (pontos D1 e D2) ou em zonas periféricas da área de estudo que possuem fácil acesso às principais vias do sistema de transporte (pontos D1 e D2).

Quantidade de unidades construídas

- média entre 0,6 e 2,0 por subdivisão
- média entre 2,1 e 4,0 por subdivisão
- média entre 4,1 e 7,0 por subdivisão
- média entre 7,1 e 10,0 por subdivisão
- média superior a 10,0 por subdivisão
- células de água

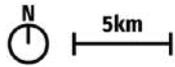


Figura 38: Síntese da evolução da área construída das células durante as simulações

4.5 CONVERGÊNCIA ESPACIAL

A Figura 39 apresenta a síntese da convergência espacial nas células durante as simulações. Nela, tons mais escuros da cor vermelha indicam áreas para as quais os valores da referida medida configuracional são maiores. Deve-se mencionar que a representação utiliza uma escala normalizada, portanto os valores apresentados correspondem à porcentagem que eles representam do maior valor existente no sistema.

Convergência espacial

- 5 a 10% do valor máximo
- 11 a 25% do valor máximo
- 26 a 45% do valor máximo
- 46 a 60% do valor máximo
- 61 a 100% do valor máximo
- células de água

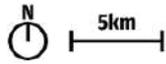


Figura 39: Síntese da evolução da convergência espacial das células durante as simulações.

A convergência espacial é utilizada como parâmetro para que os agentes comerciais meçam a atratividade de uma célula e, com base nisso, escolham onde se alocar no sistema. Sendo assim, as configurações ilustradas nos mapas desta medida constituem parte da explicação pelos padrões observados nos outros resultados que já foram apresentados.

Nas primeiras iterações da simulação, as áreas de maior convergência são aquelas que combinam uma localização central com proximidade às principais vias de tráfego (pontos A1 e B1). Ao fim das simulações, tais áreas permanecem entre aquelas com destaque (pontos A2 e B2), mas passam a estar acompanhados também por outras partes da área de estudo: pela área de Imbé que, como mencionado nos itens anteriores, apresentou significativo crescimento populacional (ponto C), pelas regiões caracterizadas como pólos comerciais no entorno do centro (ponto D) e pelo entorno da RS-030, principal conexão da área de estudo com as cidades vizinhas (ponto E).

Os padrões indicados pelos pontos A, B, C e E apresentam situações alinhadas ao conceito por trás da medida de convergência espacial: identificar as unidades da rede viária com maior probabilidade de servir como conexão entre agentes residenciais e outros tipos de uso, as quais tendem a configurar um melhor ponto comercial por estarem próximas aos principais fluxos de pessoas. Inclusive, o fato da convergência ser utilizada como referência de atratividade para as ofertas de serviço é o que explica a similaridade dos mapas dessa medida com aqueles de localização dos agentes comerciais da Figura 38.

Porém, as áreas identificadas com o ponto D configuram um caso especial, em que a localização por si só não torna os locais atrativos para agentes comerciais, mas que - devido à presença de inúmeros agentes residenciais nos arredores e devido às reduzidas opções de vias realizando a conexão com tais residências - no momento em que alguns poucos agentes comerciais se instalam ali, a convergência espacial da região tende a crescer de forma acelerada devido a uma espécie de efeito funil. A Figura 40 ilustra conceitualmente o referido efeito: nota-se que, na situação *a*, as poucas opções de caminho existentes entre demandas e oferta fazem com que o contraste entre valores de convergência espacial seja maior do que o observado na situação *b*, em que múltiplos percursos são oferecidos.

A Figura 41 ilustra como possivelmente ocorreu tal efeito no modelo. Partindo do mapa de impedâncias das vias do sistema, verifica-se que a bifurcação da RS-030 valores para tal atributo menores que os das vias adjacentes. Isso acarreta que os percursos em sua proximidade que conectam demandas residenciais centrais a ofertas de serviço periféricas tendem, em algum ponto, a se afunilar por um único caminho mínimo com valor de convergência superior ao restante de seus arredores, tornando as células intermediárias bastante atrativas para estabelecimento de agentes comerciais.

Efeito da limitação de caminhos na convergência espacial

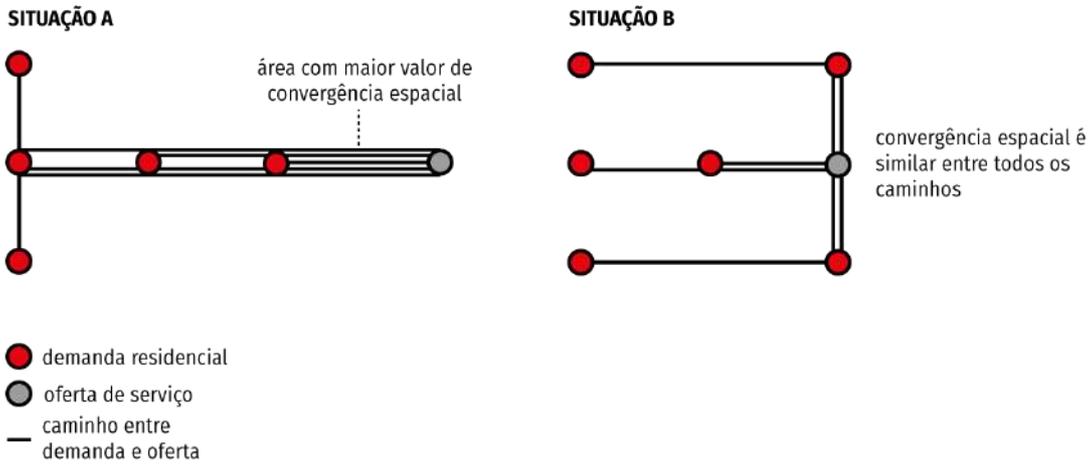


Figura 40: Exemplos conceituais do efeito da limitação de alternativas de caminho no cálculo da medida de convergência espacial.

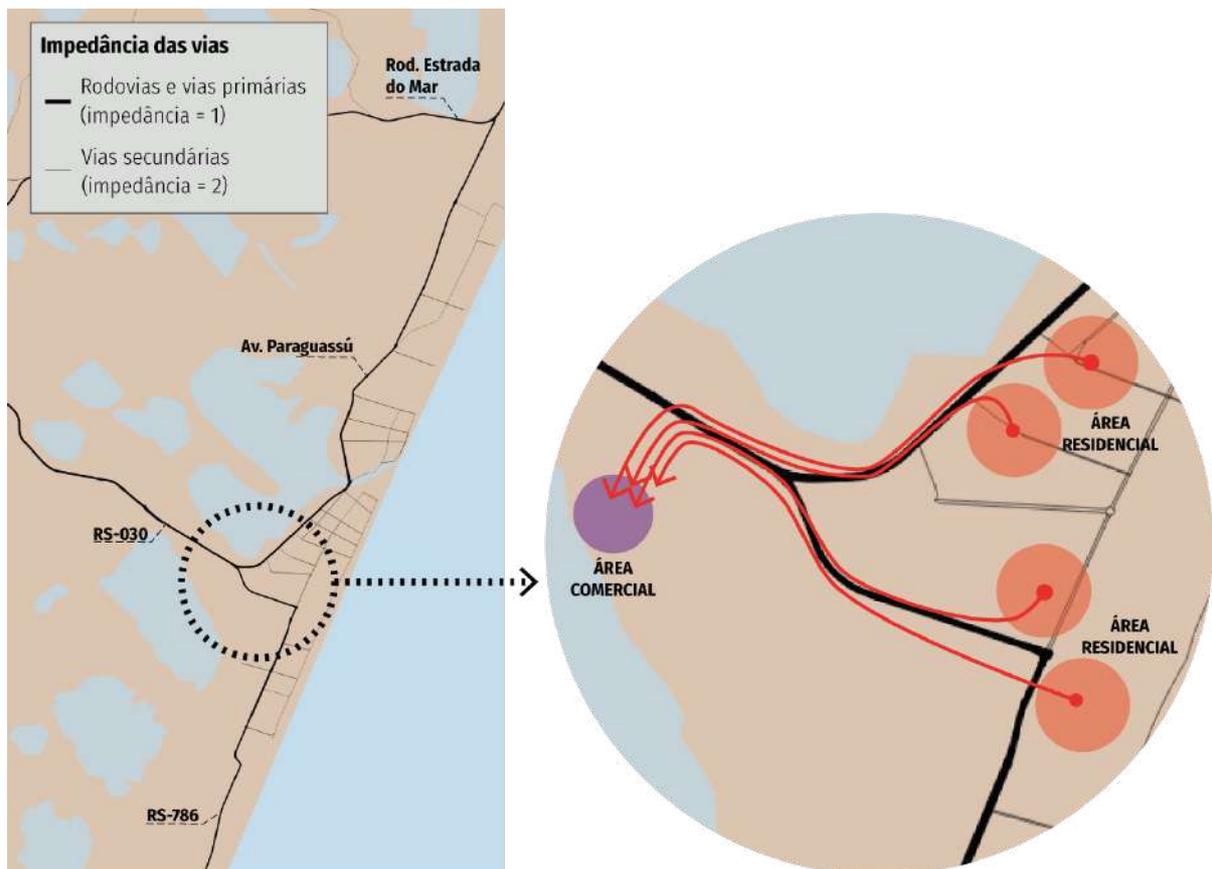


Figura 41: Descrição diagramática do efeito que favoreceu o surgimento de pólos comerciais nos arredores da área central de Tramandaí.

Apesar de estar presente em um grande número de simulações - por isso sua aparição no diagrama-síntese - este é um fenômeno para o qual o modelo provavelmente

indica uma probabilidade de ocorrência maior do que seria observado na realidade. Isso se deve porque há fatores não considerados neste trabalho, mas que teriam influência negativa sobre tal fenômeno. Um exemplo é o fato de que, para que ocorra a sobrevivência a longo prazo do primeiro estabelecimento a se inserir em uma área afastada do centro, é necessário que ele possua capacidade de gerar sua própria demanda, tal qual um shopping center, por exemplo, consegue atrair consumidores apenas pelos atrativos contidos nele mesmo. Porém, um estabelecimento de comércio local - uma sapataria, por exemplo - provavelmente não teria esse mesmo potencial e, portanto, não teria condições de sobreviver em um local com baixo fluxo de pessoas.

Visto que tal aspecto não foi considerado na elaboração do modelo, o que parece ocorrer é que todo agente comercial inserido em uma área remota funciona como um estabelecimento capaz de gerar sua própria demanda e criar condições para mais agentes comerciais se instalarem em sua proximidade. Isso cria uma relativa distorção da configuração dos estabelecimentos comerciais, aparentemente tornando esse tipo de fenômeno mais provável do que ele de fato parece ocorrer na realidade, especialmente em cidades de pequeno ou médio porte como Tramandaí e Imbé.

4.6 OPORTUNIDADE ESPACIAL

A Figura 42 apresenta a síntese da oportunidade espacial conforme ela é calculada para os agentes permanentes. Nela, quanto mais escura a cor da célula, mais próximo seu valor de oportunidade está do máximo existente no sistema.

Nota-se que os maiores valores tendem a inicialmente se concentrar ao redor do encontro da RS-030 com a avenida Paraguassú (pontos A1); enquanto que, em iterações finais, tais picos do sistema tendem a estarem também distribuídos em áreas próximas à divisa entre Tramandaí e Imbé, mais especificamente nos arredores das vias estruturadoras da rede de mobilidade (pontos B e C).

Durante a evolução entre esses dois momentos, ocorre uma modificação na configuração espacial da medida: ela deixa de ser uma medida cujo foco se situa no centro da área de análise e passa a apresentar uma configuração mais difusa, com múltiplos focos ao longo da área junto à faixa de praia. Tendo em vista o conceito dessa medida - a qual mede a distância em relação às ofertas de serviço do sistema - pode-se afirmar que as referidas alterações observadas ao longo das simulações se devem principalmente à alocação difusa dos agentes comerciais, causado pelos efeitos observados para a medida de convergência espacial, como mencionado anteriormente.

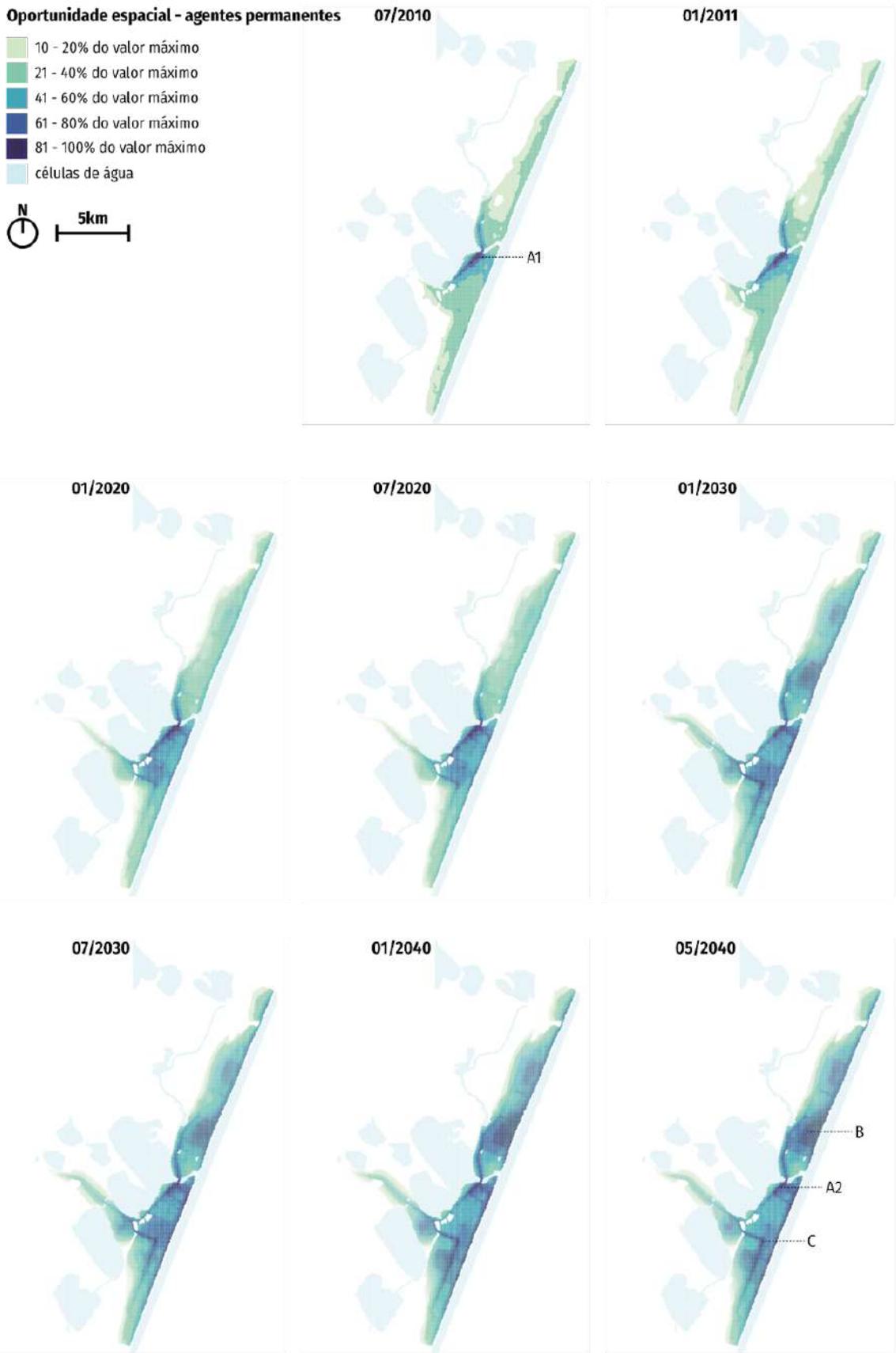


Figura 42: Síntese da evolução da oportunidade espacial para a população permanente.

A Figura 43 ilustra diagramaticamente esse processo de mudança de configuração. No estado inicial do modelo, havia uma tendência das ofertas de serviço estarem localizadas ao longo das vias de maior hierarquia do sistema, fazendo com que as áreas mais atrativas para agentes residenciais fossem aquelas no entorno de tais eixos. É por isso que nas primeiras iterações da Figura 42 se observa os picos de oportunidade espacial bastante concentrados no entorno do eixo da RS-030 na área central da Tramandaí. Porém, devido aos efeitos discutidos para a medida de convergência espacial, em iterações posteriores os agentes comerciais tendem a sair de tais vias principais e passam a estar mais difusos no território, originando agrupamentos em forma de nuvem. Isso faz com, do ponto de vista das residências, as áreas mais atrativas passem a ser o entorno de tais grupos comerciais, resultando na configuração observada para os mapas finais da Figura 42, em que há múltiplos núcleos de altos valores de oportunidade, cada um provavelmente representando o entorno de um desses ajuntamentos de agentes comerciais.

Alteração da configuração da oportunidade espacial

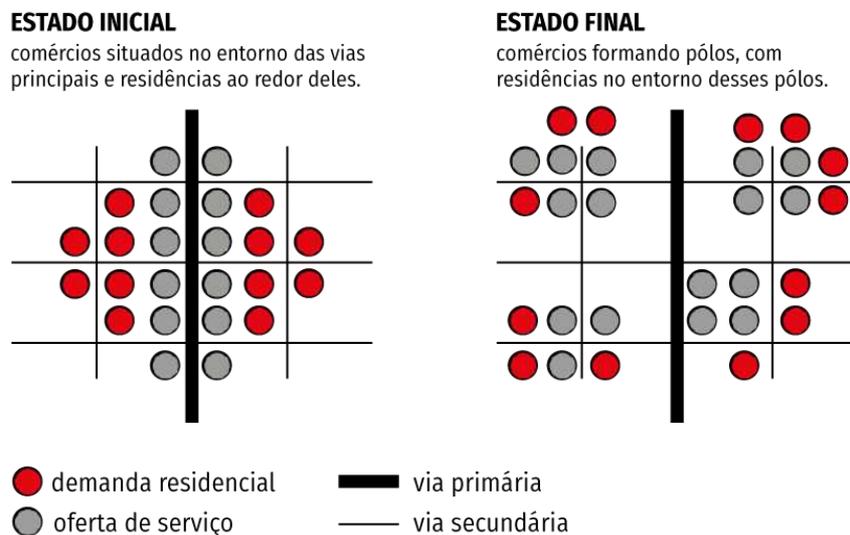


Figura 43: *Processo de redistribuição espacial dos agentes que resulta nas diferenças observadas para a oportunidade espacial entre os estados inicial e final.*

Essa dinâmica, portanto, parece ser uma consequência da distorção discutida anteriormente quanto ao comportamento dos agentes comerciais. Ela será retomada na análise geral dos resultados e no capítulo de conclusões.

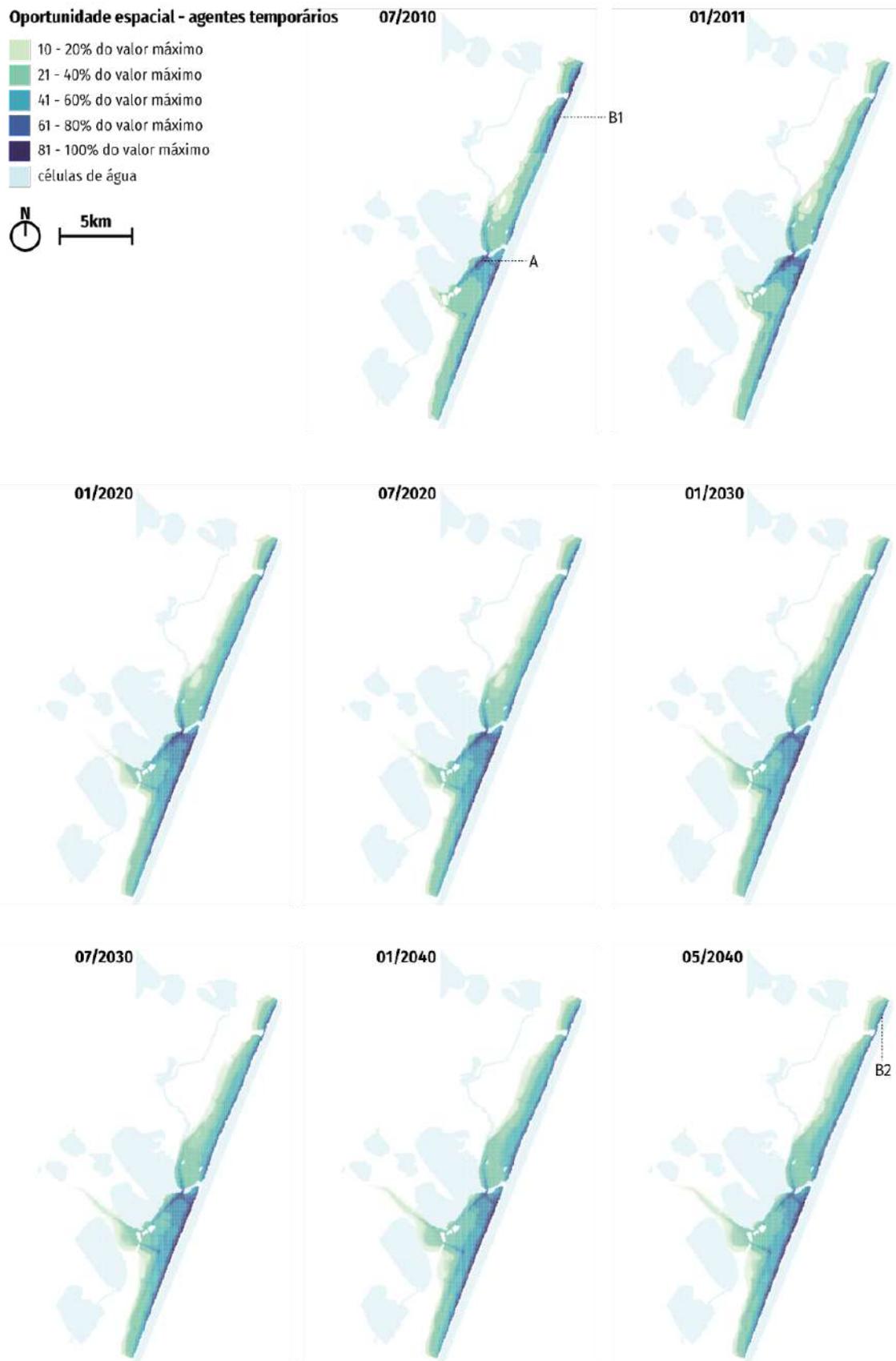


Figura 44: Síntese da evolução da oportunidade espacial para a população temporária.

Por outro lado, a oportunidade espacial calculada para agentes temporários apresenta evolução significativamente diferente do observado para a população permanente. Como pode se observar nos mapas da Figura 44, a hierarquia espacial dos valores da medida permanece similar ao longo das iterações: quanto mais próximo da faixa de praia, maiores os resultados, ao mesmo tempo que a proximidade à área central de Tramandaí tende a gerar um aumento dos valores também. Essa estabilidade se deve ao fato da faixa de praia ser um elemento imóvel do modelo ao mesmo tempo em que é a principal ponderação utilizada para o cálculo dessa versão da oportunidade, diminuindo, nesse caso, o efeito causado pela instabilidade da posição dos agentes comerciais.

Por fim, é válido mencionar que a área de Atlântida Sul, na parte norte da área de estudo junto à divisa com o município de Osório, apresenta o maior decaimento nos mapas apresentados na Figura 44 (pontos B1 e B2). Como neste estudo os valores de oportunidade são calculados como a proporção em relação ao maior valor do sistema, essa queda observada em Atlântida Sul provavelmente não significa que a área foi abandonada pelos indivíduos que a habitavam - até porque ela não foi afetada pelo aumento do nível do mar - mas que outras áreas atraíram uma quantidade maior de agentes durante as iterações e, assim, elevaram o valor máximo de oportunidade do sistema, reduzindo o valor relativo de Atlântida Sul.

4.7 VALOR DO SOLO

A Figura 45 apresenta a síntese do valor médio das subdivisões de cada célula durante as simulações. Nela, quanto mais escura a cor, maior o valor do solo observado ali. Nota-se que alguns dos padrões formados pelos maiores valores dessa medida, especialmente em iterações finais, remontam ao mapa da quantidade de unidades construídas da Figura 38. Tal associação se deve à ação dos empreendedores imobiliários, os quais justamente tendem a criar edificações em células com alto potencial de valorização.

O ponto A indica a área de Tramandaí junto à divisa com Imbé como sendo uma das áreas que mais se valorizou, o que provavelmente se deve ao fato de ali também estarem os maiores valores das medidas de convergência espacial e oportunidade espacial devido a sua localização central e flexibilidade quanto à área construída permitida pela legislação. Os pontos B e C apresentam regiões que se valorizaram após o ponto A, o que provavelmente demonstra que a área deste último era inicialmente mais atrativa e apenas quando os espaços nela se tornaram escassos é que a ocupação das áreas B e C se intensificaram.

Valor do solo

- média entre 1 e 20 unidades
- média entre 21 e 40 unidades
- média entre 41 e 80 unidades
- média entre 81 e 160 unidades
- média entre 161 e 240 unidades
- média entre 241 e 320 unidades
- média acima de 321 unidades
- células de água

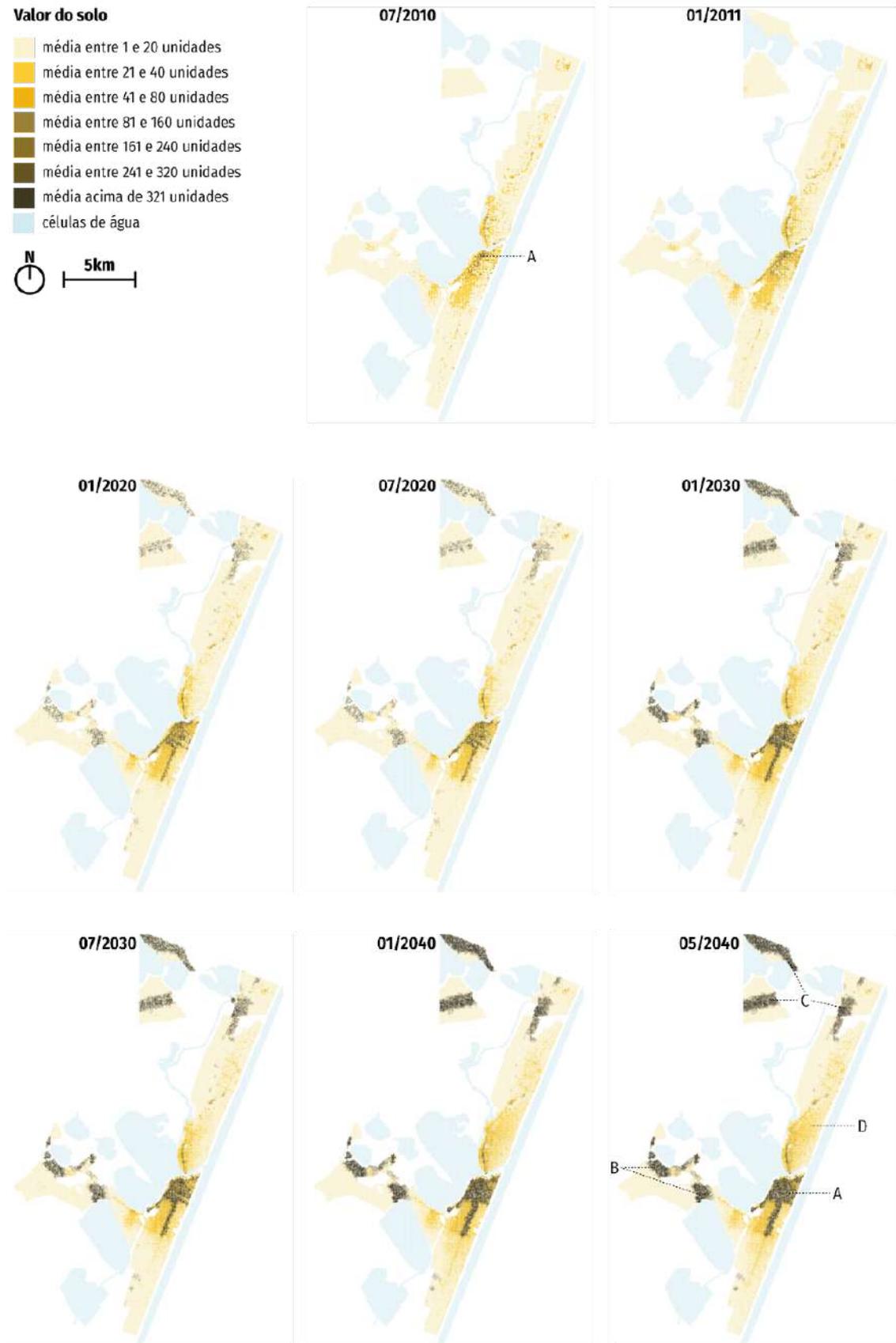
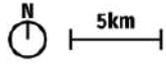


Figura 45: Síntese da evolução do valor do solo das células durante as simulações

Nota-se que a área D - que em subitens anteriores apareceu como um local de significativo crescimento urbano e com atratividade relativamente alta - apresenta baixo valor do solo quando comparada com os outros locais descritos. Isso provavelmente se deve ao fato da intensificação da ocupação ali ter ocorrido ainda mais tardiamente do que a ocupação dos pontos B e C, de modo que, ao fim das simulações, o local ainda está em fase de expansão e com seu valor da terra em ascensão.

Uma característica desses mapas é o fato das áreas mais atrativas do modelo saturarem seus valores de forma desproporcional ao restante do território, como pode-se notar pela cor preta intensa existente nas iterações finais do sistema. Acreditava-se que esse efeito seria menos intenso, pois o mecanismo de variação do valor do solo prevê que, conforme tal valor aumenta, a demanda pela subdivisão da célula diminui porque haverá menos agentes com renda suficientemente alta para se interessarem por ela e, assim, a valorização tenderia a ser contida. Entretanto, tal processo tende a ser desequilibrado principalmente devido à inserção de indivíduos temporários durante as iterações dos meses de verão.

Nesse sentido, deve-se ter em mente que, conforme mencionado no capítulo de metodologia, a variação do valor do solo ocorre em dois momentos específicos: i) durante a busca de um agente por uma célula; e ii) ao fim das iterações, quando ele é modificado de acordo com a média de sua vizinhança. O primeiro desses mecanismos tem ocorrência reduzida na população permanente, visto que estes são inseridos em pequenas taxas no modelo e tendem a passar a maior parte de seu tempo inativos em uma célula do que procurando trocar de localização. Por outro lado, os agentes temporários possuem comportamento oposto, visto que, a cada doze iterações do novo, toda a população flutuante é alterada e, ao ser reinserida, seu processo de busca por uma célula causa a valorização das células do sistema. Tendo em vista a quantidade desse tipo de indivíduo que é adicionado ao modelo, verifica-se que, de fato, o aumento do valor do solo causado por eles é exponencialmente maior do que a diminuição causada pelos mecanismos de desvalorização existentes no modelo.

Se, por um lado, tal comportamento poderia ser similar ao que se observa na realidade, em que áreas turísticas tendem a ter seu preço inflacionado quando comparadas com áreas menos atrativas dos arredores; por outro lado, zonas mais afastadas do centro da cidade, como aquelas indicadas pelos pontos B e C na Figura 45, não parecem ser do tipo que naturalmente se tornam regiões altamente valorizadas, pelo menos não pelos fatores considerados neste trabalho. Assim, cria-se a suposição de que o método de estabelecimento do valor do solo pode estar criando distorções na precificação das células do modelo no sentido de aumentar exageradamente o valor de algumas células.

4.8 RENDA MÉDIA DOS AGENTES

A Figura 46 apresenta a síntese da renda média dos agentes de cada célula durante as simulações. Nela, pontos de coloração mais avermelhada indicam uma renda média correspondente aos menores estratos econômicos da população, enquanto que tons esverdeados indicam renda correspondente aos estratos de maior renda.

Em termos gerais, nota-se que, com a ocorrência do crescimento populacional da área analisada, há a tendência dos agentes de menor renda migrarem para as áreas periféricas conforme a ocupação urbana da região se intensifica. Isso indica a reprodução de uma lógica compatível à realidade, em que áreas mais atrativas acabam se valorizando e sendo ocupadas pela população de maior renda, enquanto indivíduos de menor renda migram para áreas de menor custo.

Entretanto, especialmente nas iterações finais da Figura 46, observa-se um desequilíbrio em relação à configuração de renda, parecendo que há o predomínio de células da cor verde (indicando agentes mais ricos) do que espaços de cor avermelhada. Isso parece ocorrer devido às regras de alocação espacial dos agentes: conforme o valor do solo no modelo cresce - especialmente durante os meses de verão, como mencionado no item anterior - diminui a quantidade de células compatíveis com a renda da população de menor poder econômico, de modo que aumentam as chances desses indivíduos não encontrarem espaços adequados durante sua busca por novas subcélulas e, por isso, abandonem o sistema. Tal fenômeno talvez não corresponda exatamente ao que ocorre na realidade, já que poderia-se supor que seriam os agentes da maior renda os quais teriam a capacidade de abandonar o sistema caso estivessem insatisfeitos com as opções existentes; os indivíduos de menor renda, possivelmente, teriam um leque menor de escolhas e por isso eventualmente talvez não tivessem a escolha de deixar o sistema e, sim, se alocar nele em alguma localização pouco atrativa.

Esse predomínio de uma população de maior renda também contribui para o elevado aumento do valor do solo observado na Figura 45. Como mencionado anteriormente, a limitação da renda dos agentes era um dos fatores que se esperava que criasse um maior equilíbrio na evolução dos preços das subcélulas. Todavia, se a renda média da população aumenta devido à fuga dos indivíduos mais pobres, então a referida limitação do valor dos terrenos tende a perder força.

Renda média dos agentes

- média abaixo de 40,0 unidades
- média entre 40,1 e 80,0 unidades
- média entre 80,1 e 120,0 unidades
- média entre 120,1 e 200,0 unidades
- média acima de 200,0 unidades
- células de água

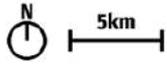


Figura 46: Síntese da evolução da renda média dos agentes nas células.

4.9 AUMENTO DO NÍVEL DO MAR

A Figura 47 mostra a evolução do risco de inundação devido ao aumento do nível do mar - conforme descrito no capítulo de metodologia - no modelo entre os anos de 2020 e 2040. Nela, podemos observar basicamente três áreas de influência do fenômeno nas simulações: na área central de Tramandaí, junto ao rio (ponto A), na parte sudoeste de Imbé (ponto B) e ao longo do trecho norte da RS-786 (ponto C). Outras partes do território são afetadas, mas são de menor relevância devido à menor intensidade de sua ocupação.

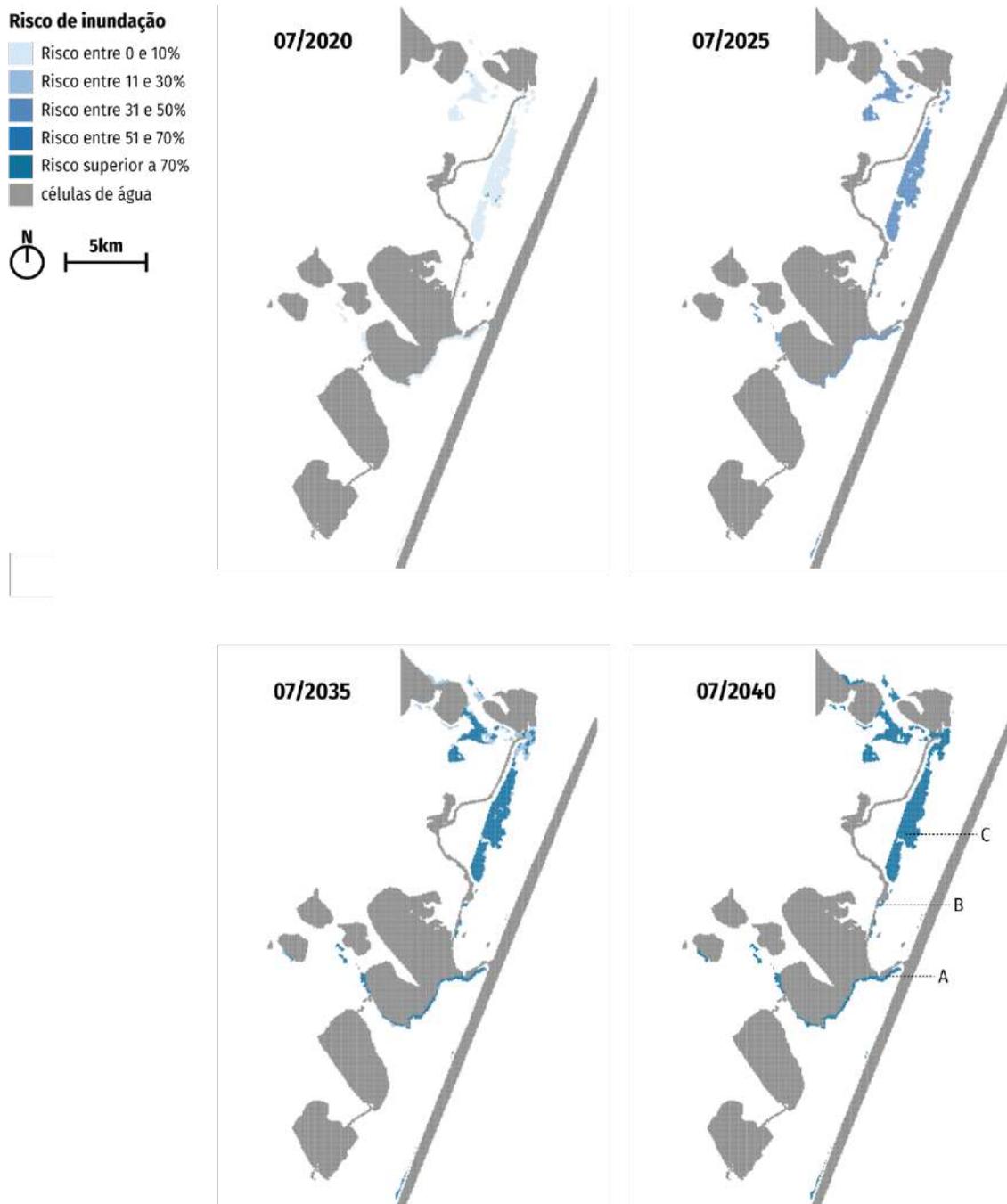


Figura 47: *Evolução do risco de inundação devido ao aumento do nível do mar.*

Porém, como pode-se observar nos resultados apresentados até o momento, tal influência apresenta consequências limitadas no modelo. Isso parece ocorrer porque, ao incidir apenas nas células contidas dentro dos polígonos de inundação, o risco parece se tornar um aspecto apenas dessas células, não se espalhando para células vizinhas. A Figura 48 ilustra tal aspecto para a quantidade de unidades construídas. Nela, a linha azul indica a divisão entre as áreas que, no ano de 2040, foram afetadas pelo risco de inundação e aquelas que não foram. Se percebe que, do ano de 2020 para o de 2040, ocorre o esvaziamento das áreas junto ao rio Tramandaí; porém, as construções que se localizavam ali parecem ter simplesmente migrado para as células vizinhas, visto que nestas a intensidade da ocupação parece inalterada.

Efeito do risco de inundação na quantidade de unidades construídas

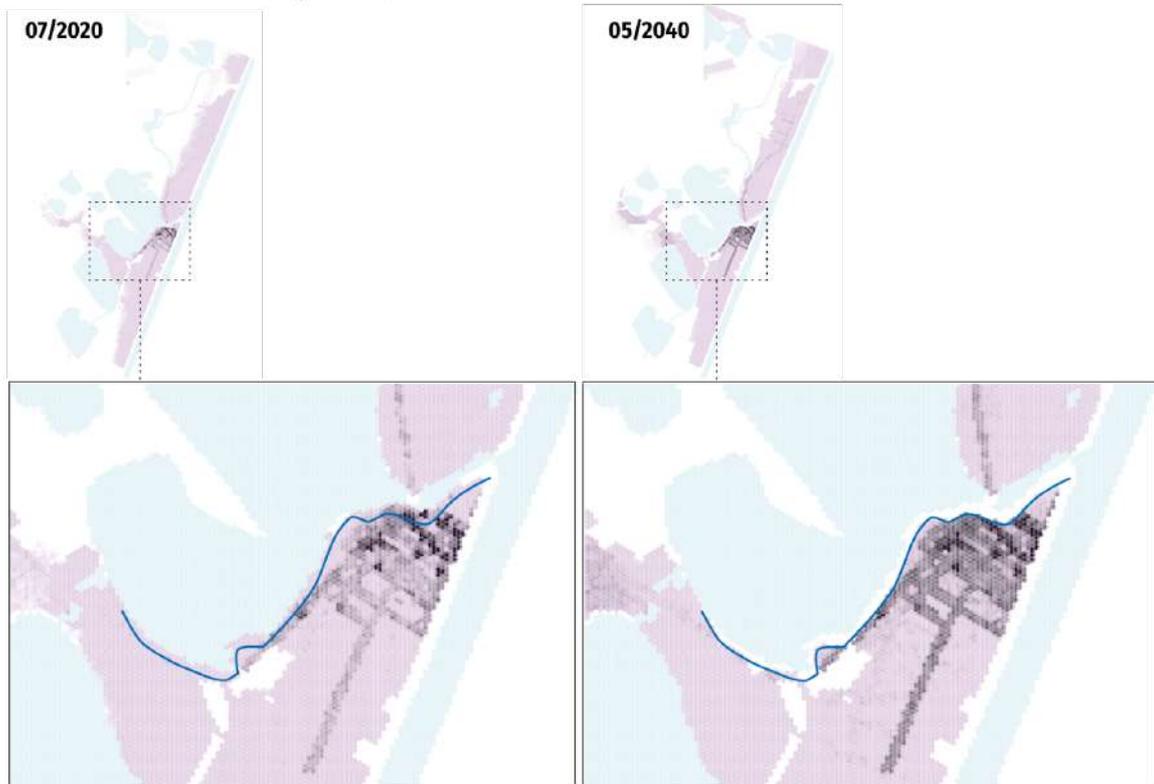


Figura 48: Detalhe da ação do risco de inundação na quantidade de unidades construídas na área central de Tramandaí.

Sendo assim, o principal efeito do aumento do risco de inundação no modelo parece ter sido a redução de área disponível e consequente aumento da competição pelos espaços centrais, especialmente de Tramandaí. Tal aspecto pode ter contribuído, inclusive, para a valorização excessiva do valor do solo discutida anteriormente. A Figura 49 ilustra como, na área central de Tramandaí, a borda que descreve a ação do risco de inundação é justamente um dos locais de maior contraste entre os valores do solo medidos.

Efeito do risco de inundação no valor do solo

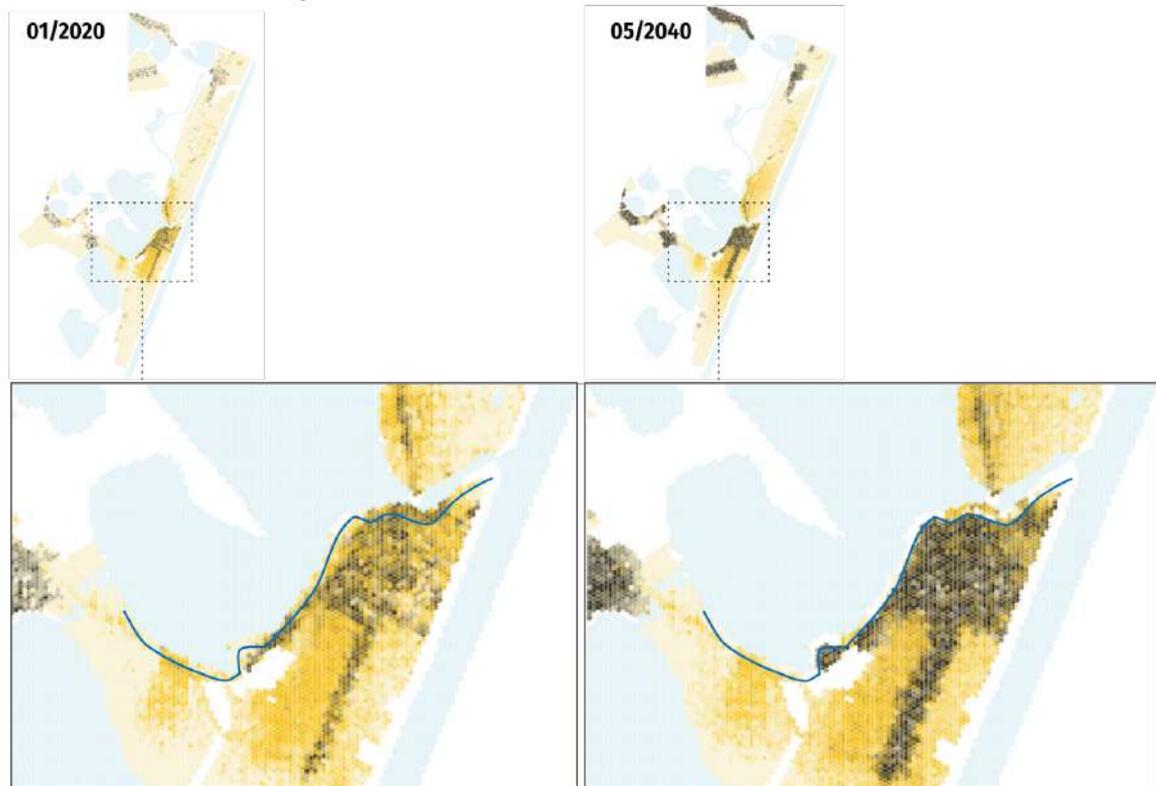


Figura 49: Detalhe da ação do risco de inundação no valor do solo de células na área central de Tramandaí.

4.10 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação dos resultados foi realizada por meio do cálculo de três medidas: a qualidade do ajuste para múltiplas resoluções, a dimensão radial e a distribuição da frequência dos tamanhos dos *clusters*. A primeira teve o objetivo de indicar a proximidade entre resultados simulados e os dados reais da área analisada, enquanto as outras duas medidas indicam se os resultados obtidos para cenários futuros são coerentes com características típicas de sistemas urbanos.

4.10.1 Qualidade do Ajuste

A Figura 50 apresenta os valores resultantes para a qualidade do ajuste calculada de acordo com quatro escalas espaciais distintas. Tais resultados foram obtidos a partir da média e do desvio padrão dos valores calculados para cada simulação realizada.

Média e desvio padrão da qualidade do ajuste para múltiplas escalas

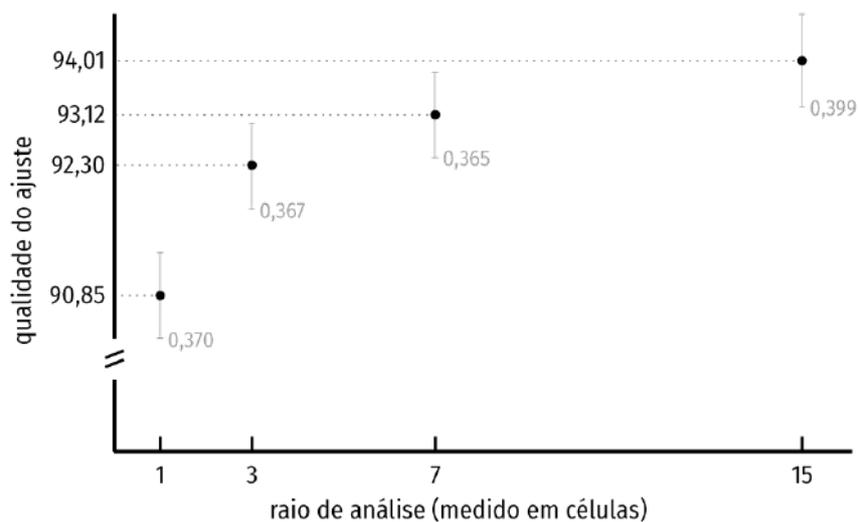


Figura 50: Resultados numéricos da qualidade do ajuste conforme calculado para quatro diferentes resoluções espaciais.

Tendo em vista que, neste estudo, a qualidade do ajuste foi calculada com base na divisão das células em grupos conforme a quantidade de unidades construídas que elas contém, em termos numéricos, os resultados apresentados indicam que a margem de erro no acerto do grupo ao qual as células pertencem foi, no pior dos casos, menor que 13,0%. Ao se expandir a análise para janelas de amostragem com raio igual a três, sete e quinze células, verifica-se a precisão subir para até 94,01%, visto que muitas vezes ocorre de não ser acertado o ponto exato em que ocorreu uma edificação alta, mas acerta-se a área aproximada em que ela se localiza.

A análise individual de tais resultados numéricos parecem indicar um grau de precisão satisfatório. Entretanto, o entendimento desses valores é melhor esclarecido pela representação das células do modelo em que geralmente ocorreram as diferenças entre simulação e realidade. Por isso, foi gerada a Figura 51, que apresenta a diferença média observada nas células do CA entre a quantidade de unidades construídas simuladas e os dados reais das edificações locais para o ano de 2020. Nela, polígonos de cor verde indicam áreas onde foram indicadas mais unidades construídas do que o observado na realidade, enquanto cores alaranjadas ou avermelhadas mostram partes para as quais o modelo tende a indicar construções de menor porte do que o observado na realidade.

Unidades construídas: simulação x realidade

- entre 1,1 e 2,0 pavimentos a mais na simulação
- entre 0,6 e 1,0 pavimentos a mais na simulação
- diferença abaixo de 0,5
- entre 0,6 e 1,0 pavimentos a menos na simulação
- entre 1,1 e 2,0 pavimentos a menos na simulação
- entre 2,1 e 4,0 pavimentos a menos na simulação
- células de água



Figura 51: *Localização das diferenças observadas entre simulação e realidade no ano de 2020 para o atributo de quantidade de unidades construídas.*

Essa análise espacial indica padrões bastante característicos para a ocorrência das imprecisões entre simulação e realidade. Em primeiro lugar, o ponto A da imagem indica a tendência do modelo não reproduzir todas as edificações de maior porte que surgem na área de estudo durante a simulação do período entre os anos de 2010 e 2020, com uma boa parte delas se localizando nos arredores dessa área, como mostrado pelo polígono marcado com o ponto B. A principal causa desse problema parece ter sido o método utilizado para definir a quantidade máxima de unidades construídas nas subdivisões das células: foi feita a análise de quais zonas do plano diretor faziam interseção com cada célula e atribui-se a cada célula o menor valor de quantidade máxima de pavimentos dentre aqueles das zonas intersectantes. O objetivo desse método era garantir que não se estaria desobedecendo o regime urbanístico local nas simulações, mas, aparentemente, essa solução causou uma diminuição exagerada do potencial construtivo da área central, acarretando em sua migração para as áreas adjacentes, as quais possuíam maior flexibilidade construtiva.

Além disso, os pontos C e D indicam áreas que não eram urbanizadas em 2010 e permaneciam assim nas imagens aéreas de 2020, mas que as simulações indicaram como parte do crescimento urbano que ocorreu entre esses anos. Isso parece indicar uma deficiência do modelo em caracterizar as situações em que de fato ocorre a ocupação de uma área ainda não urbanizada. Tal deficiência parece ser causada pelo modo como se pensou a relação entre agentes permanentes e temporários, pois, devido aos já mencionados efeitos da reinserção “anual” da população flutuante no modelo, há uma tendência dos residentes fixos serem empurrados para áreas periféricas com valor reduzido do solo, causando tal processo exagerado de urbanização.

Já os pontos E e F indicam duas situações em que áreas bastante periféricas receberam uma ocupação maior nas simulações do que na realidade. Tal padrão parece ter sido causado por uma possível calibragem errada do efeito das impedâncias viárias nas medidas de oportunidade e convergência, a qual teria dado às principais vias do sistema uma capacidade de aproximar o indivíduo dos recursos da cidade maior do que de fato é observado na realidade. Esse aspecto aumentou a atratividade das células locais, gerando tais diferenças no mapa de ocupação.

Por fim, o ponto G indica a área em que um condomínio fechado se instalou entre os anos de 2010 e 2020, fenômeno que não foi previsto pelo modelo. Esse tipo de empreendimento, por ter sua localização dependente de um grande número de fatores, muitos deles arbitrários, torna-se improvável de ser previsto pelo tipo de modelo proposto neste estudo. Por isso, dentre todos os erros observados, esse é o que menos parece ter uma solução que permita seu aperfeiçoamento para versões futuras do modelo.

Em resumo, enquanto as medidas numéricas de qualidade de ajuste parecem indicar uma precisão aceitável por parte do modelo, a espacialização das diferenças entre realidade e simulação indicam que, de fato, há tipologias de ocupação que o modelo não foi capaz de reproduzir coerentemente durante as simulações.

4.10.2 Dimensão Radial

A Figura 52 apresenta o gráfico resultante da dimensão radial para a iteração final de três simulações realizadas e a média geral obtida considerando todas as simulações realizadas para este trabalho. O objetivo de mostrar o resultado dessas três execuções individuais é para possibilitar a análise da semelhança entre elas e com a média geral obtida.

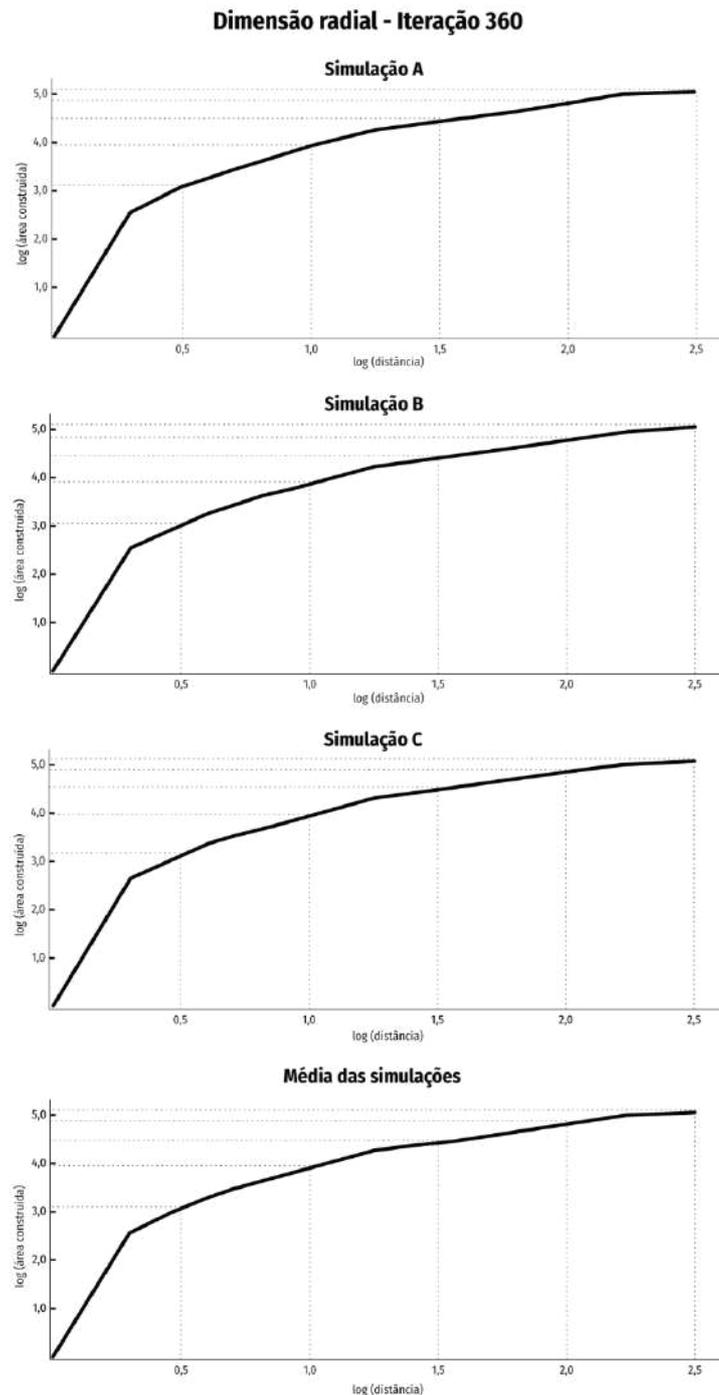


Figura 52: Gráfico da dimensão radial gerado para três simulações para a iteração final do modelo - mostrando a semelhança de seus resultados - e para a média de todas as simulações realizadas.

Em primeiro lugar, se observa que o pré-requisito da *estrutura bifractal* foi cumprido: é possível identificar nos gráficos uma inclinação inicial descrevendo uma taxa acelerada de crescimento das unidades construídas em áreas próximas ao centro do modelo, enquanto que, para partes mais afastadas, o crescimento da área construída simulada decai, acarretando uma menor inclinação no gráfico. A existência de tal aspecto foi citada no capítulo de revisão bibliográfica como sendo essencial para demonstrar que os padrões

simuladas podem, de fato, ser considerados como possivelmente pertencentes a uma cidade.

Em segundo lugar, a similaridade obtida entre os gráficos provavelmente se deve a dois aspectos principais: i) o porte das cidades utilizadas como objetivo de estudo, cuja variação da área construída, ao ser representada em escala logarítmica, não apresentou muita diferença em termos estatísticos; e ii) alguns parâmetros das simulações, por não serem muito variáveis de uma execução para a outra, tornaram a variação quantidade das unidades construídas algo relativamente estável. Esse último aspecto se deve especialmente à taxa de crescimento dos agentes (que segue a mesma regra para todas as simulações) e à evolução dos agentes e do valor do solo das células. Tais parâmetros não apresentam uma variação grande o suficiente de uma simulação para a outra para resultar em uma quantidade de unidades construídas muito diferente, por isso que a análise estatística desses valores, especialmente em escala logarítmica, parece não indicar muita diferença entre uma simulação e outra.

4.10.3 Distribuição da frequência dos tamanhos dos *clusters*

A Figura 53 apresenta o gráfico gerado para a distribuição da frequência dos tamanhos dos *clusters* para cinco das simulações realizadas, as quais estão identificadas com cores diferentes. O objetivo do gráfico é mostrar, utilizando escala logarítmica, a frequência observada para cada tamanho de *clusters* de células contendo quantidade similar de unidades construídas.

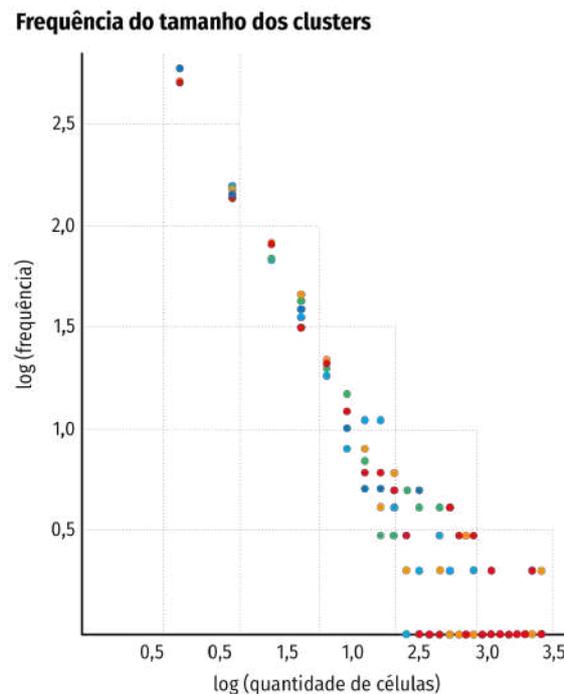


Figura 53: Gráfico da frequência dos tamanhos de clusters.

Nota-se que o conjunto de pontos plotados indicam uma espécie de relação linear decrescente. Conforme descrito no capítulo de revisão bibliográfica, essa relação é característica de um sistema urbano, tendo em vista que, geralmente, se espera que seja observado uma quantidade muito maior de *clusters* pequenos do que de *clusters* grandes. Tal caracterização, além de indicada pelo gráfico, também encontra respaldo nos mapas dos atributos apresentados até o momento neste trabalho.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve o objetivo de propor um modelo computacional que possibilitasse reflexões acerca do desenvolvimento urbano futuro do litoral norte do Rio Grande do Sul. A motivação por trás dessa proposta foi a observação de dinâmicas populacionais (o crescimento demográfico e a variação sazonal da região) e ambientais (a relação entre área construída e elementos naturais, bem como a questão do aumento do nível do mar) que tem potencial para influenciar a configuração dessa zona do estado pelas próximas décadas. O efeito futuro desses fatores na área de estudo não é geralmente discutido na bibliografia, do mesmo modo que os fenômenos descritos não são comuns de serem simulados por trabalhos de planejamento urbano, por isso o objetivo justificava sua utilidade.

Os municípios de Imbé e Tramandaí, no Rio Grande do Sul, foram escolhidos como recorte espacial a ser analisado. Tal decisão se deu por eles apresentarem as referidas dinâmicas observadas no litoral norte e por serem relevantes economicamente e demograficamente para a região. Assim, para tal área, foi proposto um modelo que visava simular o seu funcionamento partindo do enquadramento do ambiente urbano como um sistema complexo. Tal proposta de modelo se estruturou em torno da interação entre três entidades - frações territoriais, agentes e empreendedores imobiliários - para reproduzir como a cidade se desenvolve em sentido *bottom-up*. A lógica dessa proposta era que tais elementos poderiam contribuir para a explicação de como os fenômenos característicos do litoral norte podem afetar o funcionamento da região para as próximas décadas.

As simulações realizadas indicaram comportamentos inesperados por parte de elementos do modelo, os quais tendiam a criar distorções nos resultados. Em primeiro lugar, ao utilizar a medida de convergência como indicativo de atratividade para agentes comerciais, criou-se um efeito de afunilamento que, em alguns casos, encorajava os comércios e serviços a se afastarem dos principais eixos de mobilidade e passarem a se concentrar em pólos nos arredores do centro da cidade. Essa alteração de posicionamento ocasionou a mudança da configuração das áreas residenciais, porque sua atratividade era medida justamente a partir de sua distância às ofertas de serviço. Por fim, distorções no mecanismo de variação do valor do solo podem ter causado os preços das células a subirem exageradamente, especialmente nas iterações correspondentes aos meses de verão.

Somado a isso, as medidas utilizadas para validação dos resultados indicaram um bom desempenho quando avaliadas em termos estatísticos, mas sua representação de modo espacial apontou para a necessidade de aperfeiçoamentos a fim de fazer o modelo reproduzir com maior precisão o comportamento específico dos agentes nas áreas

analisadas. Todavia, mesmo com tais deficiências, as representações de cenários futuros para o recorte de estudo ainda assim possibilitam que se reflita sobre alguns aspectos de seu funcionamento, os quais são aprofundados nas subseções a seguir.

5.1 DESENVOLVIMENTO URBANO DA ÁREA DE ESTUDO

Em primeiro lugar, o aumento do valor do solo causado pela chegada da população visitante durante os meses de verão, mesmo tendo sido representada de forma exagerada, é um fator a ser considerado para o planejamento futuro do local. Os efeitos que o modelo mostra - excessiva valorização e expulsão dos agentes de menor renda das áreas centrais (ou até mesmo do modelo) - são similares ao que se noticia para a cidade de Veneza (R7, 2019), onde habitantes de longa data foram expulsos para cidades vizinhas devido ao encarecimento dos locais de moradia causado pela atratividade turística local e pelo advento da plataforma de aluguéis *AirBnb*. Visto que, dentre os indivíduos de baixa renda no litoral norte que poderiam sofrer tal tipo de expulsão, muitos dependem dos empregos existentes nas áreas centrais, o agravamento desse fenômeno exigiria a elaboração de políticas públicas específicas para evitar que se prejudique a economia local, especialmente propostas voltadas para novos meios de transporte público e infraestrutura para loteamentos populares.

O modelo também faz indicações quanto a possíveis eixos de crescimento da área de Imbé e Tramandaí, com o eixo da RS-030 em direção a Osório sendo um dos pontos cuja importância relativa mais cresceu durante as simulações. Isso parece ocorrer especialmente devido à hierarquia da rodovia como um dos principais eixos de mobilidade da região e sua ligação direta com a área central da cidade. Entretanto, caso ela de fato venha a configurar o principal eixo de crescimento da região, seriam necessários projetos urbanos para adaptar a área para receber uma nova onda de urbanização, uma vez que, além de estar junto a zonas essencialmente rurais, ela faz parte do polígono de risco de inundação devido ao aumento do nível do mar. Outro fator a ser considerado é o fato de que, por estar junto à divisa com o município de Osório, esse eixo de crescimento talvez implique em um crescimento demográfico mais relevante para este último município do que para Imbé ou Tramandaí.

A expansão de Tramandaí em direção sul, ao longo da RS-786, foi essencialmente limitada no modelo devido às restrições do regime urbanístico local, que limitam o porte das edificações especialmente junto à faixa de praia. Tal restrição pode estar diretamente relacionada com o referido crescimento ao longo da RS-030, o qual pode ter sido acarretado justamente pelo esgotamento de áreas mais centrais. Portanto, visando

descentralizar tal aumento de densidade que se prevê para as áreas junto à divisa com Osório - de modo a se tentar evitar a densificação junto ao cordão de lagoas existente naquela área - poderia-se considerar um aumento controlado das regiões junto à RS-786.

Quanto à evolução de Imbé, observa-se principalmente o crescimento das densidades em uma área central um pouco ao norte da divisa com Tramandaí. O ganho de importância de tal área faria sentido tendo em vista a inserção do local na configuração urbana geral: ela é próxima tanto à ligação com a RS-030 quanto à conexão ao norte com a Estrada do Mar, além de estar localizada à beira-mar. Tamanho é o potencial de tal área para funcionar como uma expansão para a área central de Tramandaí que ela se destacou nas simulações mesmo que suas regras urbanísticas não sejam muito flexíveis à densificação.

Por fim, no modelo como um todo, observou-se dois estados contrastantes para a medida de oportunidade espacial: inicialmente as simulações apresentavam uma configuração com um claro ponto concentrador e, ao fim das iterações, havia uma outra em que os maiores valores do sistema estavam distribuídos pelo território. Tal aspecto poderia indicar para a região a compatibilidade com um modelo de planejamento mais parecido com o do município de Xangri-lá, por exemplo, no qual as áreas da cidade são propostas para possuírem, cada uma, seu próprio centro comercial, funcionando de maneira modular.

5.2 AUMENTO DO NÍVEL DO MAR

O aumento do nível do mar foi simulado tendo como base as estimativas da área de estudo para os anos de 2030 e 2040. Foi definido o crescimento do risco de inundação como um atributo que cresce gradativamente ao longo das iterações até alcançar o valor de referência das referidas estimativas, de modo que ele indiretamente afeta a atratividade das células por meio da expulsão dos agentes com baixa tolerância ao risco de inundação. Mas, tendo em vista os resultados obtidos, é provável que esse funcionamento não corresponda ao que ocorre na realidade. Pode-se especular que talvez fosse mais preciso associar o avanço do nível das águas às taxas de crescimento populacional: se estas, ao invés de serem fixadas exogenamente ao modelo, fossem variáveis, teria-se uma representação de como a taxa de crescimento projetada se torna menor do que a projetada quando a atratividade geral da região diminui.

Apesar dessa questão, observando a dinâmica de aumento do nível do mar que, de fato, foi implementada, pode-se estabelecer que seu principal efeito na configuração urbana tenha sido a contribuição para a ocorrência de um relativo esvaziamento da área central de Tramandaí e maior difusão das densidades do sistema ao longo do território. Assim, em tal

processo de diminuição da importância da área central, não houve um espaço específico que tomou seu lugar, novamente indicando o potencial da área de estudo para uma eventual maior distribuição dos recursos urbanos.

5.3 APERFEIÇOAMENTO DO MODELO

Tendo em vista os aspectos verificados como possíveis deficiências do modelo e de suas simulações, pode-se prever alguns aperfeiçoamentos que teriam o potencial de tornar seus resultados mais precisos. Em primeiro lugar, sobre os efeitos inesperados que ocorrem em relação à convergência espacial e ao modo como isso altera a alocação espacial dos agentes, poderia-se utilizar outras medidas configuracionais auxiliares para guiar o comportamento dos agentes em conjunto com a convergência. A utilização de uma medida baseada na distância dos agentes comerciais em relação às residências - ou seja, algo similar à oportunidade espacial, mas em sentido contrário - permitiria que se considerasse a quantidade de residências nos arredores de um local, sendo esse dado útil para verificar se tal público consumidor é suficiente para fazer um comércio sobreviver ali. Assim, evitaria-se que agentes comerciais se localizassem em áreas remotas, como foi observado nos resultados do capítulo anterior.

As observações referentes ao aumento excessivo do valor do solo poderiam ser melhoradas se o processo de compra e venda das subdivisões de células seguisse mais fielmente o método proposto por Filatova (2015), em que o preço da transação é definido apenas após o proprietário da subcélula colocá-la à venda e realizar um processo de leilão. Por um lado, isso faria com que a variação de preços fosse menos influenciada pela quantidade de agentes inseridos no sistema, evitando aumentos de preço exponenciais no caso de uma grande quantidade de novos indivíduos. Por outro lado, haveria a complexidade de serem criadas regras para descrever tanto o procedimento de um indivíduo que deseja colocar sua subcélula à venda, quanto a própria negociação entre comprador e vendedor.

Além disso, a ocupação de células não urbanizadas, aspecto que contribui para diminuir a precisão do modelo, pode ser aperfeiçoada por meio de duas ações complementares. A primeira seria a melhor caracterização dos fatores envolvidos nessa dinâmica específica, possibilitando que outras características do território ou dos indivíduos fossem levadas em conta para decidir se o agente deve, de fato, dar início à ocupação de uma área ainda não urbanizada. Eventualmente, até mesmo agentes de influência *top-down* no sistema - como a administração pública - poderiam ser modelados para representar

como estes influenciam no território por meio de políticas públicas, obras e novos loteamentos.

A segunda ação seria a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina que dessem aos agentes a capacidade de antever fenômenos complexos do território com base em reconhecimento de padrões nos dados que o descrevem. Tais instrumentos poderiam, por exemplo, dar aos agentes a capacidade de identificar que, apesar de uma célula ser pouco atrativa em uma determinada iteração, ainda assim ela pode ser a melhor opção existente porque acontecimentos anteriores no modelo mostraram que áreas com a mesma configuração tendem a se valorizar rapidamente. É inviável que este tipo de análise seja definida de antemão pelo desenvolvedor do modelo, por isso a utilidade dos referidos algoritmos em tornar as simulações ainda mais fiéis aos acontecimentos reais que ocorrem em uma cidade.

Por fim, quanto ao tempo de execução das simulações e o uso de memória computacional, poderia-se tornar o modelo mais eficiente por meio da simplificação de alguns de seus elementos. Por exemplo, poderia-se não calcular as medidas de convergência e oportunidade individualmente para todas as células do sistema, mas calculá-las para um grupo de células vizinhas que teriam sempre o mesmo valor de tais medidas. Medidas como essa tendem a não alterar significativamente o resultado das simulações - visto que a diferença dos referidos atributos em células vizinhas tende a ser pequena - enquanto que, por outro lado, contribuem para tornar o modelo mais eficiente.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo que o modelo proposto tenha apresentado eficiência limitada, acredita-se que ele apresenta potencial para ser uma ferramenta útil para a prática de planejamento urbano caso sejam implementadas algumas das melhorias propostas. Essa expectativa se baseia, em parte, no fato de que a principal dificuldade deste trabalho foi desenvolver desde o início o código que constitui o modelo, de modo que, tendo essa estrutura já iniciada para trabalhos futuros, o potencial de obter bons resultados torna-se maior. Porém, mesmo que isso não ocorra, o relato do que se obteve com as soluções propostas neste trabalho podem, por si só, contribuir para que outros trabalhos decidam sobre sua utilização. A área de modelagem computacional aplicada ao planejamento urbano está em pleno desenvolvimento e possui novas propostas a todo mês. Portanto, acredita-se que a tendência é de que o tipo de pesquisa proposta por este trabalho deve manter-se relevante pelo futuro próximo, especialmente no cenário brasileiro em que sua aplicação ainda é restrita.

Além disso, provavelmente a existência de bases de dados mais abrangentes e detalhadas poderia contribuir com os resultados alcançados. Em especial, a realização de um novo Censo Demográfico permitiria que se ampliasse as análises realizadas para os procedimentos de validação do modelo para além de apenas o atributo de área construída.

Ainda em relação a essa questão de validação, uma eventual aplicação operacional do modelo proposto a ser considerada em trabalhos futuros seria a proposição de mecanismos de conferência entre resultados modelados e o desenvolvimento urbano observado anualmente. Desse modo, com a contínua calibração do modelo a partir dessa conferência, o foco se tornaria menos a sua capacidade preditiva e mais o seu uso como instrumento para aumentar o conhecimento sobre o comportamento dos sistemas urbanos.

Por fim, as discussões sobre o futuro do litoral norte permanecem um tema relevante para pesquisas de planejamento urbano. Como discutido ao longo do trabalho, a tendência é que a manutenção de um equilíbrio entre crescimento urbano e preservação ambiental se torne cada vez mais desafiadora, exigindo novos paradigmas de gestão e planejamento público. Acredita-se que este modelo pode, nos próximos anos, evoluir em conjunto com tal situação de forma a contribuir de maneira mais eficaz com sua resolução.

6. REFERÊNCIAS

- ALLEN, P. M. **Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity**. Luxembourg: Gordon and Breach, 1997.
- BALL, P. **Beyond weird: why everything you thought you knew about quantum physics is different**. Chicago: The University of Chicago Press, 2018.
- BARREIRA GONZÁLEZ, P.; AGUILERA-BENAVENTE, F.; GÓMEZ-DELGADO, M. Partial validation of cellular automata based model simulations of urban growth: An approach to assessing factor influence using spatial methods. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 69, p. 77–89, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815215000882>. Acesso em: 1 fev. 2021.
- BATTY, M. Big data, smart cities and city planning. **Dialogues in Human Geography**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 274–279, 2013. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2043820613513390>. Acesso em: 9 fev. 2021.
- BATTY, M. **Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals**. 1. paperback ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2007a.
- BATTY, M. **Complexity in City Systems: Understanding, Evolution and Design**: Working Paper Series. Londres: Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), 2007b. Disponível em: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/3473/>. Acesso em: 27 out. 2020.
- BATTY, M. Fifty Years of Urban Modeling: Macro-Statics to Micro-Dynamics. In: ALBEVERIO, S. *et al.* (org.). **The Dynamics of Complex Urban Systems**. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2008. p. 1–20. *E-book*. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-7908-1937-3_1. Acesso em: 25 jul. 2020.
- BATTY, M. **The new science of cities**. First paperback ed. Cambridge, Massachusetts London, England: MIT Press, 2017.
- BATTY, M.; TORRENS, P. M. Modelling and prediction in a complex world. **Futures**, [s. l.], v. 37, n. 7, p. 745–766, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016328704001788>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- BENENSON, I. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. **Computers, Environment and Urban Systems**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 25–42, 1998. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0198971598000179>. Acesso em: 3 jul. 2022.
- BETTENCOURT, L. **The Use of Big Data in Cities**: SFI Working Paper. Santa Fe: Santa Fe Institute, 2013. Disponível em: <https://www.santafe.edu/research/results/working-papers/the-uses-of-big-data-in-cities>. Acesso em: 9 fev. 2021.
- BONETT NETO, J. *et al.* Panorama sobre métodos quantitativos de análise espacial, modelagem urbana e geotecnologias aplicados ao planejamento urbano no Brasil: evolução histórica e perspectivas contemporâneas. In: XVI ENANPUR - Espaço, Planejamento e Insurgências, 2015, Belo Horizonte. **Anais do XVI ENANPUR**. Belo Horizonte: [s. n.], 2015. Disponível em: <http://anais.anpur.org.br/index.php/anaisenanpur/article/view/2464>. Acesso em: 3 mar. 2021.
- BROWN, D. G. *et al.* Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use. **International Journal of Geographical Information Science**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 153–174, 2005. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658810410001713399>. Acesso em: 17 jul.

2020.

CASALI, Y.; HEINIMANN, H. R. A topological characterization of flooding impacts on the Zurich road network. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. e0220338, 2019. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0220338>. Acesso em: 29 out. 2020.

CASTLE, C.; CROOKS, A. **Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations**: Working Paper Series. Londres: Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), 2006. Disponível em: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/3342/>. Acesso em: 30 out. 2020.

CLIMATE CENTRAL. **Coastal Risk Screening Tool**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://coastal.climatecentral.org/map>. Acesso em: 26 out. 2020.

COLANDER, D. C.; KUPERS, R. **Complexity and the art of public policy: solving society's problems from the bottom up**. Princeton: Princeton University Press, 2014.

COREDE LITORAL. **Plano Estratégico Participativo de Desenvolvimento Regional do COREDE Litoral do Rio Grande do Sul**. Osório: Conselho Regional de Desenvolvimento do Litoral, 2017. Disponível em: <https://governanca.rs.gov.br/upload/arquivos/201710/09144219-plano-litoral.pdf>. Acesso em: 23 out. 2020.

CROOKS, A. T.; PATEL, A.; WISE, S. Multi-Agent Systems for Urban Planning. *In*: PINTO, N. N. *et al.* (org.). **Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories**. [S. l.]: IGI Global, 2014. p. 29–56.

DAHAL, K. R.; CHOW, T. E. An agent-integrated irregular automata model of urban land-use dynamics. **International Journal of Geographical Information Science**, [s. l.], v. 28, n. 11, p. 2281–2303, 2014. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2014.917646>. Acesso em: 20 jul. 2020.

DALCIN, G. *et al.* Jaguarão: Horizonte Urbano no Pampa. *In*: 6ª CONFERÊNCIA DA REDE LUSÓFONA DE MORFOLOGIA URBANA, 2017, Vitória. **Anais da 6ª Conferência da Rede Lusófona de Morfologia Urbana**. Vitória: UFES, 2017. p. 302–312. Disponível em: <https://pnum2017.wixsite.com/pnum2017/copia-hospedagem>. Acesso em: 29 nov. 2020.

DE ROO, G. Spatial Planning, Complexity and a World 'Out of Equilibrium': Outline of a Non-linear Approach to Planning. *In*: DE ROO, G.; HILLIER, J.; VAN WEZEMAEL, J. (org.). **Complexity and Spatial Planning: Systems, Assemblages and Simulations**. Farnham, UK: Ashgate Publishing, 2012.

DEE-RS. **PIB Municipal**. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão: Departamento de Economia Estatística, 2021. Disponível em: <https://dee.rs.gov.br/pib-municipal>. Acesso em: 5 jul. 2022.

FENG, Y. *et al.* Urban expansion simulation and scenario prediction using cellular automata: comparison between individual and multiple influencing factors. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 191, n. 5, p. 291, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10661-019-7451-y>. Acesso em: 18 jul. 2020.

FILATOVA, T. Empirical agent-based land market: Integrating adaptive economic behavior in urban land-use models. **Computers, Environment and Urban Systems**, [s. l.], v. 54, p. 397–413, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0198971514000714>. Acesso em: 21 jul. 2020.

FILATOVA, T.; PARKER, D.; VAN DER VEEN, A. Agent-Based Urban Land Markets: Agent's Pricing Behavior, Land Prices and Urban Land Use Change. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, [s. l.], 2009. Disponível em: <https://www.jasss.org/12/1/3.html>. Acesso em: 3 jul. 2022.

FREEMAN, L. C. A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. **Sociometry**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 35, 1977. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3033543?origin=crossref>. Acesso em: 30 jun. 2022.

GLEICK, J. **The information: a history, a theory, a flood**. 1st Vintage Books ed., 2012. New York: Vintage Books, 2011.

GOOGLE EARTH. C++. Versão 7.3.3.7786. [S. l.]: Google, 2020. Windows. *E-book*. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>.

GUEDES, G. Mar causa estragos no litoral norte após vendaval. **Correio do Povo**, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://www.correiodopovo.com.br/not%C3%ADcias/geral/mar-causa-estragos-no-litoral-norte-ap%C3%B3s-vendaval-1.444719>. Acesso em: 3 abr. 2022.

HEWITT, R.; VAN DELDEN, H.; ESCOBAR, F. Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 52, p. 149–165, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815213002624>. Acesso em: 25 jul. 2020.

HILLIER, B.; HANSON, J. **The social logic of space**. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

HUNTER, E.; MAC NAMEE, B.; KELLEHER, J. Correction: An open-data-driven agent-based model to simulate infectious disease outbreaks. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. e0211245, 2019. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0211245>. Acesso em: 30 out. 2020.

IBGE. **Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por Setor Censitário**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2011. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>. Acesso em: 5 set. 2020.

IBGE. Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE). *Em*: [s. d.]. Disponível em: <https://respondendo.ibge.gov.br/voce-foi-procurado-pelo-ibge/pesquisas/outras-pesquisas/cnefe.html>. Acesso em: 18 maio 2021.

IBGE. **Estimativas da População Residente para os Municípios e para as Unidades da Federação Brasileiros com Data de Referência em 1º de Julho de 2020**. [S. l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 5 set. 2020.

IBGE. **Grade Estatística do Censo 2010**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2016. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/en/estrutura/natjur-estrutura/77-mapas/mapas-interativos/8537-grade-estatistica.html>. Acesso em: 18 maio 2021.

IBGE. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 17 jun. 2021.

IMBÉ. Gabinete do Prefeito Municipal de Imbé. **Lei nº 1474, de 2 de julho de 2013**. Dispõe sobre a Revisão da Lei 1.072/2007 que Trata do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Imbé e dá Outras Providências. 2013. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-imbe-rs>. Acesso em: 25 jan. 2021.

IMBÉ RS. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/search?query=imb%C3%A9#map=12/-29.9355/-50.1156>. Acesso em: 28 out. 2020.

INGRAM, D. R. The concept of accessibility: A search for an operational form. **Regional Studies**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 101–107, 1971. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09595237100185131>. Acesso em: 31 ago. 2020.

KIM, Y.; NEWMAN, G. Advancing scenario planning through integrating urban growth prediction with future flood risk models. **Computers, Environment and Urban Systems**, [s. l.], v. 82, p. 101498, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0198971520302313>. Acesso em: 21 jul. 2020.

KLUGE, I. **A Articulação entre Urbanização, Economia e Mercado Imobiliário em Cidades Litorâneas e a Relação com o Ambiente Construído: o estudo de caso do município de Capão da Canoa - RS**. 2015. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional (PROPUR/UFRGS) como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Planejamento Urbano e Regional - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/130719/000978907.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 fev. 2021.

KRAFTA, R. Modelling intraurban configurational development. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 67–82, 1994. Disponível em: <http://epb.sagepub.com/lookup/doi/10.1068/b210067>. Acesso em: 21 jul. 2020.

KRAFTA, R. **Notas de aula de morfologia urbana**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014.

KRAFTA, R. Urban Convergence: Morphology and Attraction. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 37–48, 1996. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/b230037>. Acesso em: 21 jul. 2020.

KRAFTA, R. **Spatial self-organization and the production of the city**. *Cybergeo*, 24 mar. 1999, doi:10.4000/cybergeo.4985.

KULP, S. A.; STRAUSS, B. H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. **Nature Communications**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 4844, 2019. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s41467-019-12808-z>. Acesso em: 21 jul. 2020.

LEGEBY, A. From Housing Segregation to Integration in Public Space: A Space Syntax Approach Applied on the City of Södertälje. **The Journal of Space Syntax**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 92–107, 2010. Disponível em: <http://joss.bartlett.ucl.ac.uk/journal/index.php/joss/article/view/22>.

LEVY, S.; MARTENS, K.; VAN DER HEIJDEN, R. Agent-based models and self-organisation: addressing common criticisms and the role of agent-based modelling in urban planning. **Town Planning Review**, [s. l.], v. 87, n. 3, p. 321–338, 2016. Disponível em: <https://online.liverpooluniversitypress.co.uk/doi/10.3828/tpr.2016.22>. Acesso em: 21 jul. 2020.

- LI, X. *et al.* Experiences and issues of using cellular automata for assisting urban and regional planning in China. **International Journal of Geographical Information Science**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 1606–1629, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2017.1301457>. Acesso em: 30 out. 2020.
- LI, S. *et al.* Simulation of spatial population dynamics based on labor economics and multi-agent systems: a case study on a rapidly developing manufacturing metropolis. **International Journal of Geographical Information Science**, [s. l.], v. 27, n. 12, p. 2410–2435, 2013. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658816.2013.826360>. Acesso em: 29 out. 2020.
- LIU, Y. *et al.* Modelling urban change with cellular automata: Contemporary issues and future research directions. **Progress in Human Geography**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 3–24, 2021. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309132519895305>. Acesso em: 8 fev. 2021.
- MAGLIOCCA, N. *et al.* An economic agent-based model of coupled housing and land markets (CHALMS). **Computers, Environment and Urban Systems**, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 183–191, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0198971511000056>. Acesso em: 3 jul. 2022.
- MANSON, S. M.; SUN, S.; BONSAI, D. Agent-Based Modeling and Complexity. *Em*: HEPPENSTALL, A. J. *et al.* (org.). **Agent-Based Models of Geographical Systems**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 125–139. *E-book*. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-8927-4_7. Acesso em: 1 fev. 2021.
- MATOS, M. Análise de córregos à beira mar mostram que seis praias têm pontos contaminados no Litoral Norte do RS. **Portal G1**, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2020/02/28/analises-de-corregos-a-beira-mar-mostram-que-seis-praias-tem-pontos-contaminados-no-litoral-norte-do-rs.ghtml>. Acesso em: 3 abr. 2022.
- MITCHELL, M. **Complexity: a guided tour**. New York, NY: Oxford University Press, 2011.
- MORONI, S.; COZZOLINO, S. Action and the city. Emergence, complexity, planning. **Cities**, [s. l.], v. 90, p. 42–51, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264275118306735>. Acesso em: 19 jul. 2020.
- MTE. CAGED - Cadastro Nacional de Empregados e Desempregados. *In*: BRASÍLIA: MINISTÉRIO DO TRABALHO. 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/solicitar-consulta-as-estatisticas-da-rais-e-do-caged>. Acesso em: 16 jun. 2021.
- MTE. Relação Anual de Informações Sociais - RAIS. *In*: 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/solicitar-consulta-as-estatisticas-da-rais-e-do-caged>. Acesso em: 17 jun. 2021.
- MUSA, S. I.; HASHIM, M.; REBA, M. N. M. A review of geospatial-based urban growth models and modelling initiatives. **Geocarto International**, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 813–833, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049.2016.1213891>. Acesso em: 30 out. 2020.
- NGO, T. A.; SEE, L. Calibration and Validation of Agent-Based Models of Land Cover Change. *Em*: HEPPENSTALL, A. J. *et al.* (org.). **Agent-Based Models of Geographical Systems**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 181–197. *E-book*. Disponível em:

http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-8927-4_10. Acesso em: 1 fev. 2021.

OSÓRIO. Gabinete do Prefeito Municipal de Osório. **Lei nº 3902, de 06 de outubro de 2006**. Institui o Plano Diretor do Município de Osório. 2006. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-osorio-rs>. Acesso em: 25 jan. 2021.

POLIDORI, M. C. **Crescimento Urbano e Ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade**. 2004. - Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POLIDORI, M. C.; KRAFTA, R. Simulando Crescimento Urbano com Integração de Fatores Naturais, Urbanos e Institucionais. **GeoFocus (Artículos)**, [s. l.], v. 5, p. 156–179, 2005.

PORTUGALI, J. Self-organizing cities. **Futures**, [s. l.], v. 29, n. 4–5, p. 353–380, 1997. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016328797000220>. Acesso em: 19 jul. 2020.

PORTUGALI, J. What Makes Cities Complex?. *Em*: PORTUGALI, J.; STOLK, E. (org.). **Complexity, Cognition, Urban Planning and Design**. Cham: Springer International Publishing, 2016. (Springer Proceedings in Complexity). p. 3–19. *E-book*. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32653-5_1. Acesso em: 19 jul. 2020.

PORTUGALI, J.; BENENSON, I. Human agents between local and global forces in a self-organizing city. *Em*: SCHWEITZER, F. **Self-organization of complex structures: From individual to collective dynamics**. Londres: Gordon and Breach, 1997. p. 537–546.

R7. Veneza: Aumento do turismo faz com que moradores deixem cidade. 2019. Disponível em: <https://noticias.r7.com/internacional/veneza-aumento-do-turismo-faz-com-que-moradores-deixem-cidade-14042019>. Acesso em: 10 jul. 2022.

RAND, W. Complex Systems: Concepts, Literature, Possibilities and Limitations. *In*: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P.; TÓVOLI, M. H. (org.). **Modeling Complex Systems for Public Policies**. Brasília: Institute for Applied Economic Research (IPEA), 2015. p. 37–53. *E-book*. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=25858.

RIO GRANDE DO SUL. **Perfil Socioeconômico COREDE Litoral**. Porto Alegre: Secretaria do Planejamento, Mobilidade e Desenvolvimento Regional do Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <https://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/201512/15134132-20151117102724perfis-regionais-2015-litoral.pdf>. Acesso em: 25 out. 2020.

SANTOS, A. P. **O Lugar dos Pobres na Cidade: Crescimento urbano e localização da baixa renda vista através da modelagem por agentes**. Dissertação - Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas, 2015. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/prograu/dissertacoes-urbanismo-contemporaneo/2/>. Acesso em: 3 mar. 2021.

SANTOS, A. P. *et al.* O lugar dos pobres nas cidades: exploração teórica sobre periferização e pobreza na produção do espaço urbano Latino-Americano. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 430–442, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-33692017000300430&lng=pt&tling=pt. Acesso em: 21 jul. 2020.

SARAIVA, M. **Simulação de crescimento urbano em espaços celulares com uma medida de acessibilidade: método e estudo de caso em cidades do sul do Rio Grande**

do Sul. Dissertação - Universidade Federal de Pelotas, 2017. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.27133.36326>. Acesso em: 21 jul. 2020.

TABERNA, A. *et al.* Tracing resilience, social dynamics and behavioral change: a review of agent-based flood risk models. **Socio-Environmental Systems Modelling**, [s. l.], v. 2, p. 17938, 2020. Disponível em: <https://sesmo.org/article/view/17938>. Acesso em: 11 jan. 2021.

TAILLANDIER, P. *et al.* Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. **Geoinformatica**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 299–322, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10707-018-00339-6>. Acesso em: 28 out. 2020.

TORRENS, P. M. Automata-based models of urban systems. *In*: LONGLEY, P.; BATTY, M. (org.). **Advanced Spatial Analysis**. Redlands: ESRI Press, 2003. p. 61–79.

TORRENS, P. M. **How Cellular Models of Urban Systems Work. (1. Theory)**: Working Paper Series. Londres: Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), 2000a. Disponível em: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1371/>. Acesso em: 27 out. 2020.

TORRENS, P. M. **How Land-Use-Transportation Models Work**: Working Paper Series. Londres: Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), 2000b. Disponível em: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1365/>. .

TRAMANDAÍ. Gabinete do Prefeito Municipal de Tramandaí. **Lei Complementar nº 29, de 20 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre o Uso e Ocupação do Solo e sobre o Zoneamento e dá outras providências. 2017. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/rs/t/tramandai/lei-complementar/2017/2/29/lei-complementar-n-29-2017-dispoe-sobre-o-uso-e-ocupacao-do-solo-e-sobre-o-zoneamento-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 25 jan. 2021.

WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I. **Modeling Cities and Regions As Complex Systems : From Theory to Planning Applications**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2015.

WILENSKY, U.; RAND, W. **An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2015.

ZELLNER, M.; CAMPBELL, S. D. Planning for deep-rooted problems: What can we learn from aligning complex systems and wicked problems?. **Planning Theory & Practice**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 457–478, 2015. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14649357.2015.1084360>. Acesso em: 19 jul. 2020.

ZUANAZZI, P. T.; BARTELS, M. **Estimativas para a população flutuante do Litoral Norte do RS**. Porto Alegre: Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser, 2016.

ANEXO A - Artigo da Qualificação da Pesquisa

Article

Full-text available

Sea level rise and Real Estate Market Impacts on Urban Development in a CA/Agent-Based Model

June 2021 · [Brazilian Journal of Development](#) 7(6):63383-63403

DOI: [10.34117/bjdv7n6-627](#)

Lab: [Sistemas Urbanos - Urban Systems](#)

 Guilherme Dalcin ·  Romulo Krafta

2.4

Research Interest Score



55

Reads



[Show breakdown](#)

Sea level rise and real estate market impacts on urban development in a ca/agent-based model

Modelo baseado em agentes e autômatos celulares para estimativa de impactos do aumento do nível do mar e do mercado imobiliário no desenvolvimento urbano

DOI:10.34117/bjdv7n6-627

Recebimento dos originais: 25/05/2021

Aceitação para publicação: 25/06/2021

Guilherme Kruger Dalcin

Mestrando em Planejamento Urbano e Regional
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Endereço: Rua Sarmento Leite, 320, Porto Alegre
E-mail: guilherme.dalcin@ufrgs.br

Romulo Krafta

Arquiteto e Urbanista, PhD – University of Cambridge, Inglaterra
Professor na Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Endereço: Rua Sarmento Leite, 320, Porto Alegre
E-mail: krafta@ufrgs.br

ABSTRACT

This study presents a proposal for a hybrid model (based on agents and cellular automata) which aims to analyse the long-term effects of sea level rise and real estate market dynamics on the urban development of coastal cities in Rio Grande do Sul, a state located in south Brazil. The model's operation is based on the Complexity Theory of Cities and seeks to simulate the study area's urban growth by replicating the process of spatial allocation of residential and commercial activities and the variations in built form and territorial attributes - such as land value and attractiveness - that result from this process. To accomplish this, specific modules were developed to determine the land value of each part of the territory through the behaviour of individual agents and to compute land attractiveness metrics through the representation of the cellular automaton as a graph. The proposed model is tested in an experiment for Tramandaí and Imbé - two coastal municipalities in Rio Grande do Sul - considering different scenarios of building restrictions and sea level rise. The results show: i) the model's ability to contribute to the development of planning policies for the study area; ii) indications of its consistency in relation to theoretical statements; and iii) its limitations in reproducing the dynamics that generate diffuse urban growth patterns.

Keywords: Urban Modelling, Cellular Automata, Agent-Based Modelling, Urban Planning, Complexity Theory of Cities.

RESUMO

Este estudo apresenta uma proposta de modelo híbrido (baseado em agentes e autômatos celulares) que visa analisar os efeitos de longo prazo do aumento do nível do mar e das dinâmicas do mercado imobiliário no desenvolvimento urbano de cidades do litoral do Rio Grande do Sul. A operação do modelo é baseada na Teoria da Complexidade aplicada

às cidades e busca simular o crescimento urbano da área de estudo replicando o processo de alocação espacial de atividades residenciais e comerciais, bem como as variações da forma construída e de atributos territoriais - como valor e atratividade do solo - que resultam desse processo. Para tanto, foram desenvolvidos módulos específicos para determinar o valor do solo de cada parte do território por meio do comportamento individual dos agentes urbanos e para calcular métricas de atratividade das frações do território por meio da representação do autômato celular como um grafo. O modelo proposto é testado em um experimento para Tramandaí e Imbé - dois municípios conurbados do litoral norte gaúcho - considerando diferentes cenários de legislação urbanística e elevação do nível do mar. Os resultados mostram: i) a capacidade do modelo em contribuir para o desenvolvimento de políticas de planejamento para a área de estudo; ii) indícios de sua consistência em relação a enunciados teóricos; e iii) suas limitações em reproduzir as dinâmicas que resultam em um crescimento urbano difuso.

Palavras-Chave: Modelagem Urbana, Autômatos Celulares, Modelagem Baseada em Agentes, Planejamento Urbano, Teoria da Complexidade Aplicada às Cidades.

1 INTRODUCTION

The coastal cities of Rio Grande do Sul, a state located in south Brazil, present demographic and environmental dynamics that may significantly impact its urban configuration, natural environment and quality of urban life in the near future. First of all, the region has presented the highest population growth rates of Rio Grande do Sul in the last two decades (RIO GRANDE DO SUL, 2015) and its number of inhabitants increases up to 250% during summer months due to the touristic attractiveness of local beaches (ZUANAZZI; BARTELS, 2016). These aspects create challenges for urban management and also contribute to the existence of an intense local real estate market based on the sale of holiday houses and on short-term rentals for tourists (KLUGE, 2015), which creates pressure in favour of the growth of urban areas over the natural environment. The main effect of this urban growth is the suppression of vegetation and dunes, making cities more susceptible to natural disasters (RIO GRANDE DO SUL, 2015), such as storms, floods or even the sea level rise due to climate change that are expected to impact the coast of Rio Grande do Sul before the end of the century (CLIMATE CENTRAL, 2020).

In the literature, no studies of these issues were found for this specific region, even though modelling and simulation methods have been recurrently applied for other regions of the world to investigate possible future changes in urban areas (CASALI; HEINIMANN, 2019; KIM; NEWMAN, 2020; TABERNA et al., 2020). In order to contribute with this set of studies by adapting existing modelling and simulation methods to a specific empirical context, this research aims to analyse future development scenarios

of coastal municipalities in Rio Grande do Sul using cellular automata and agents. More specifically, the study intends to simulate the spatial distribution of residential and commercial activities, as well as land value dynamics, based primarily on the modelling of: i) the locational preferences of the different population groups that inhabit the study area; ii) the economic relations that affect the local real estate market; and iii) the impacts of sea level rise on the urban environment. Such analysis is expected to anticipate relevant urban trends resulting from the dynamics of the study area.

This paper presents the model that was developed to simulate the behaviour of the study area and also an experiment for the municipalities of Tramandaí and Imbé – located in the coast of Rio Grande do Sul - considering different scenarios of building restrictions and sea level rise. The results of such experiment prove the model's ability to contribute to the development of planning policies for the study area, especially those regarding building restrictions, and also show its limitations in reproducing the dynamics that generate diffuse urban growth patterns.

2 RESEARCH BACKGROUND

Complex systems are systems whose components are other complex systems and whose functioning presents the emergence of decentralized processes that influence its global behaviour (BATTY, 2007a). Cities are complex systems, because they consist of numerous individuals with complex behaviour that interact locally with each other and with the surrounding environment, influencing the general shape of the city (BATTY, 2007b). Besides, cities are also self-organizing systems, since their components don't exclusively react to top-down ruling, but also generate endogenous and emergent forms of organization (PORTUGALI, 2016).

Because the city is a complex self-organizing system, its functioning presents characteristic dynamics of these systems: emergency, far-from-equilibrium functioning, non-linearity, path dependence and robustness (BATTY, 2007a). Therefore, in order to model cities as self-organizing complex systems, it is necessary to treat them as processes, incorporating time in the model and assuming an algorithmic approach in which the model is executed iteratively step by step (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). For the implementation of this approach, two specific models stand out: Cellular Automata (CA) and Multi-Agent Models (MAM).

CA consists of the subdivision of the territory into cells (BATTY, 2007a) that present: i) a state, which assumes a value from a predefined list of possibilities; ii) a set

of transition rules that indicate how the state change over time; and iii) other internal attributes that can be used in the definition of the transition rules (TORRENS, 2000; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). The states and attributes generally provide a geographical description of the territory - land cover, use, population density - and the transition rules tend to incorporate spatial or economic statements referring to city dynamics (TORRENS, 2003).

MAMs distinguish themselves from CAs because their constituent agents can move within the model. Each agent also has its own state, attributes and transition rules (BATTY, 2007b). However, due to their mobility, they do not have an immutable neighbourhood (TORRENS, 2003), hence interactions between agents generally happen either between those who become close enough during simulation or those connected by remote means of communication (CROOKS; PATEL; WISE, 2014; DAHAL; CHOW, 2014). Agents can also interact with the territory through the use of CAs and MAMs in a hybrid model, which also enables the territory - usually represented by the CA - to be modified according to the interaction with the agents and to modify these agents (TORRENS, 2003).

3 METHODOLOGY

This study aims to develop a model that will support the analysis of urban development scenarios for coastal municipalities of Rio Grande do Sul considering their specific population and environmental dynamics. To this end, the analysed municipalities are considered to be complex systems, their form being the result of the emergence of the local actions of their inhabitants and their interaction with the territory and the existing planning rules. Because of the use of this approach, MAMs and CAs become the most appropriate options to represent the dynamics of the study area of this study. In this section, the elements that constitute such proposed model are described.

3.1 STUDY AREA

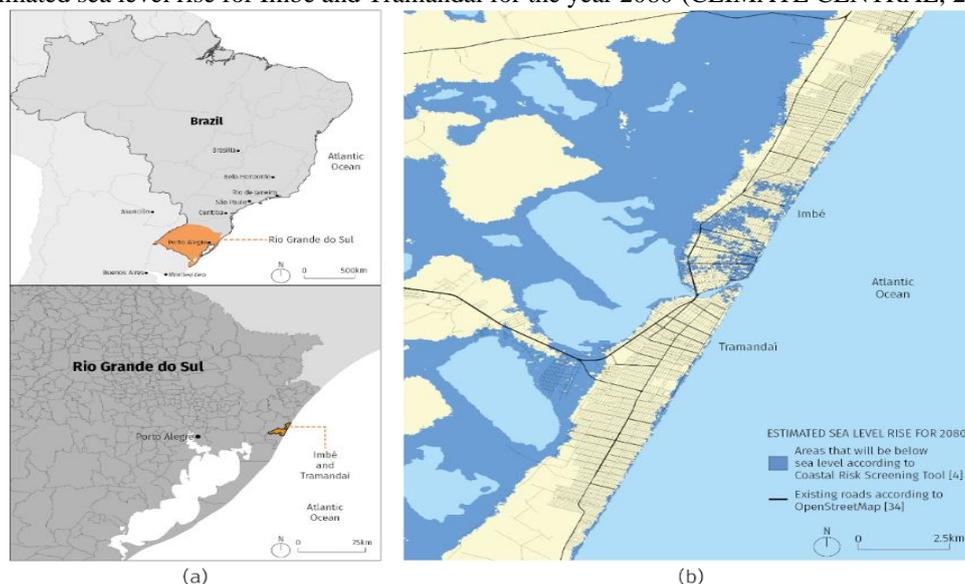
This study aims to analyse the north coast of Rio Grande do Sul due to its specific demographic and environmental dynamics that may impact the local urban configuration in the coming decades. The first of these dynamics is the significant seasonal variation of the region's population, which is approximately 3.5 times higher during summer months due to the tourism of the local beaches (ZUANAZZI; BARTELS, 2016), resulting in the overuse of urban infrastructure during summer and its underuse in the winter. Also, the

region has shown the highest demographic growth of Rio Grande do Sul in the last two decades, in contrast to the population decrease observed in the rest of the state (RIO GRANDE DO SUL, 2015). Such dynamics generate an intense real estate market - based mainly in the acquisition of buildings to be used as vacation residence and in short term rents for summer tourists (KLUGE, 2015) – that presses for the flexibilization of planning and building rules in order to accommodate more inhabitants and tourists, consequently requiring higher investments in public infrastructure.

Another issue is the increase of sea level caused by climate change. Estimates by Kulp and Strauss (2019) - illustrated by Climate Central (2020) - indicate that parts of the north coast of Rio Grande do Sul may be below sea level by the end of this century. This phenomenon has the potential to cause: i) the spatial redistribution of the population that inhabits the areas at risk of flooding; ii) the necessity to build water containment infrastructure; and iii) the decrease of land value in the areas at risk of flooding.

Among the coastal municipalities of Rio Grande do Sul, Imbé and Tramandaí (Figure 1a) - two conurbated municipalities - were chosen as the study area because of their importance for the region in demographic and economic terms. In addition, the area is the most threatened by an eventual sea rise in Rio Grande do Sul (Figure 1b). It is understood, therefore, that the application of modelling and simulation techniques can be useful to anticipate possible effects of such phenomena on the region’s urban configuration, enabling more efficient urban planning policies for all coastal municipalities of Rio Grande do Sul.

Figure 1. (a) Location of the state of Rio Grande do Sul and of the municipalities of Imbé and Tramandaí; (b) Estimated sea level rise for Imbé and Tramandaí for the year 2080 (CLIMATE CENTRAL, 2020).

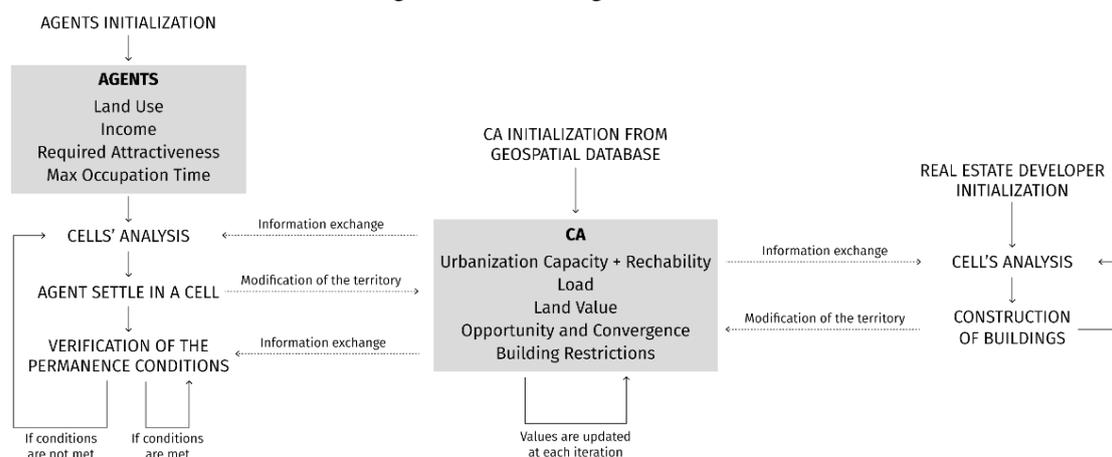


3.2 MODEL COMPONENTS

The model is composed by: i) agents that represent individuals with different incomes and locational preferences who settle in cities to perform residential or commercial activities¹; ii) territorial fractions represented by the cells of a CA that incorporate the computation of evolving land values, building restrictions and locational privileges in order to represent the territorial dynamics that are generated by the agents' behaviour; and iii) Real Estate Developers (REDs), which construct new building units in the most sought regions when it is observed the opportunity of profiting from this operation.

Figure 2 diagrammatically represents the simulation process considering the actions of the three described entities. Such process can be summarized as follows: i) the simulation begins with the creation of the CA from geospatial bases; ii) each cell has different attributes and such differentiation enables the computation of the shortest paths between cells, which are later used to update the attractiveness attributes of the CA throughout the simulation; iii) a random number of agents are added to the CA with random characteristics; iv) agents look for a cell to settle in and, in each of the following iterations, check if that cell still meets its requirements; when this ceases to occur, they search for another cell to settle in; v) during this entire process, the cells constantly update their state and attributes according to its neighbours' behaviour; vi) these changes induce REDs to analyse the territory and expand cells that may generate profit for them.

Figure 2. Functioning of the model.



¹ The selection of these two kinds of activities is due to the fact that the economy of the study area is predominantly based on commercial activities, with little participation from other land uses (RIO GRANDE DO SUL, 2015).

3.2.1 Cellular Automata (CA)

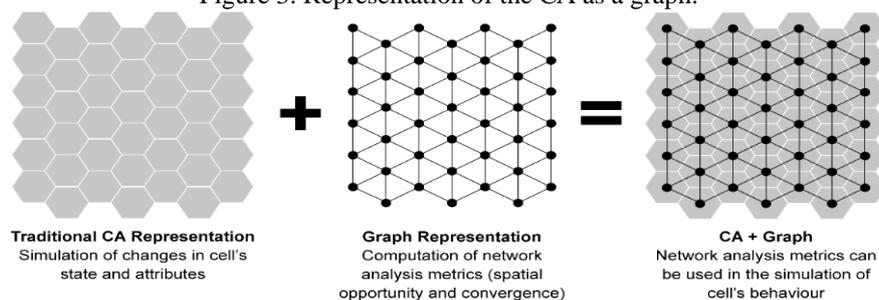
The cells of the CA represent hexagonal fractions of the territory whose edges measure approximately 75 meters in length. Since the general objective of the model is to represent the occupation intensity of the territory, it was defined that the state of the cells would represent the quantity of agents located in it. The computation of such state depends on a set of attributes which is common to all cells (Table 1) and represents the characteristics of the study area's territory with relevant influence on its land occupation. These attributes are constantly updated during simulation as the cells interact with agents and REDs. Also, their value also influences the actions of these other two entities, as will be described in the following subsections. Such dynamics result in the constant variation of the cells' state, which changes each time an agent settles in or leaves it.

Table 1. Description of the CA's attributes

Attribute	Description
Urbanization Capacity	Describes whether buildings can be built in the cell to house agents.
Reachability	Indicates whether the cell may be part of the path of an agent between cells. It is used in the computation of the network analysis metrics that measure the cells' attractiveness.
Capacity of Agents	Maximum number of agents that can settle in the cell. Reproduces the influence of the building restrictions established by local legislation.
Load	An estimate of the attractors existing in the cell, divided into natural load (such as beaches and vegetation areas) and urban load (active residences and commerce).
Spatial Opportunity	Measures the accessibility to commercial use and services from the point of view of residential demands as proposed by Krafta (1999).
Spatial Convergence	Measures the spatial privileges of the territory from the point of view of commerce and services as proposed by Krafta (1996).
Land Value	An estimate of the expected sale value of the cell.

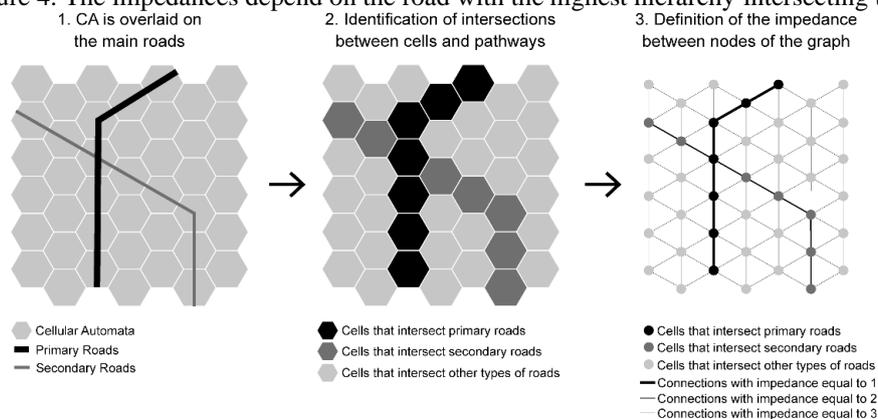
An auxiliary layer was added to the CA in which the set of cells is represented as a graph: each cell's centroid is a node connected to its reachable neighbours (Figure 3), following the nodal representation of urban systems as defined by Krafta (2014). This additional layer enables the use of network analysis measures - such as spatial opportunity and convergence (KRAFTA, 1996, 1999) - as attributes of the CA cells, which can be used in the exchange of information between non-adjacent cells.

Figure 3. Representation of the CA as a graph.



In such graph representation, the impedance of the connections – i.e., the cost for an agent to move from one cell to another - is defined according to the cell's proximity to the main existing roads: connections between cells that intersect highways have a lower impedance value - because they allow greater flows - than connections that depend on lower hierarchical roads (Figure 4). This attribute affects the system's behaviour because it affects the computation of spatial opportunity and convergence metrics, since they are based on the shortest path (the one with the lowest sum of impedances) between each pair of reachable cells.

Figure 4. The impedances depend on the road with the highest hierarchy intersecting the cell.



The attractiveness of the cell – measured by the network analysis metrics - as well as its building restrictions, directly influence the cells' land value. Filatova (2015) states that the prices of land properties depend not only on its physical and geographical characteristics, but also on the existing conditions of the market. Therefore, to better reproduce the dynamics of land value variation, it is required to somehow represent the level of interest of existing agents for each cell. To this end, the following process of land value estimation was proposed, loosely based on Filatova (2015): each time an occupied cell is evaluated as adequate by an agent, its land value is increased; on the other hand, if a cell does not receive any interest from an agent during an iteration, its land value decreases. This way, cells that constantly attract agents have increasing land values, while cells that do not generate interest see their value gradually decreasing.

3.2.2 Agents

Agents represent individuals who carry out residential and commercial activities in urban areas. Their individual behaviour is dictated by the attributes presented in Table 2, being Land Use the most influential one, since it defines, based on Krafta

(1996,1999), the kind of cell the agent will look for: residential agents seek the ones with higher values of spatial opportunity, while commercial agents seek cells with higher values of spatial convergence. As for the other attributes, Income and Required Attractiveness basically limit the set of possible cells where the agents may settle in, while the Maximum Occupation Time limits the time an agent may spend in a single cell.

Table 2. Description of the agents' attributes

Attribute	Description
Land Use	Indicates whether the agent represents a commercial or residential activity.
Income	Maximum land value of a cell that the agent can afford in order to settle in it.
Required Attractiveness	Minimum value of spatial opportunity (for residential agents) or spatial convergence (for commercial agents) that the agent requires in order to settle in a cell.
Maximum Occupation Time	An estimate of the attractors existing in the cell. Divided into natural load (such as beaches and vegetation areas) and urban load (active residences and commerce).

Simulation effectively starts when agents are initialized and start to interact with the CA. When initialized, each agent analyses the land value and attractiveness attributes of a set of randomly selected cells, being verified: i) whether the cell has a lower land value than the agent's income; ii) whether its attractiveness is greater than the agent's requirement; and iii) if it is the most attractive among analysed cells. If such a cell is found and it is not fully occupied, it will be defined as the agent's current best option. If the cell is already occupied, the agent will discard it, but the value of that cell will increase in order to reflect the existing demand for it. At the end, the agent establishes itself in the best option it finds, increasing the cell's urban load value. If no suitable location is found, the agent leaves the system. There are three conditions that cause the agent to leave a cell: i) if the cell's value becomes higher than the agent's income; ii) if the attractiveness becomes lower than the agent's requirement; or iii) if the maximum occupation time is reached. When one of these situations occurs, the agent searches for another location following the previously described process.

3.2.3 Real Estate Developers (RED)

REDs increase the number of units in a cell - i.e., the number of agents that it can host - when they verify the possibility of profiting from this operation. At each iteration, the developer computes, for a random set of cells, the expected profit from the

construction and sale of new units according to the entrepreneur's equation (KRAFTA, 1994), as presented in Equation 1:

$$L = (u * p) - (ct - cc), \quad (1)$$

Where profit L is equal to expected earnings - average value of neighbouring cells (p) multiplied by the number of units (u) - subtracted by the cost of land purchase ct and the cost of construction cc . The cells where the REDs expect to profit have their capacity expanded to the maximum allowed by local legislation.

REDs do not have a physical presence in the model, only the changes they make to the built form are visible. Therefore, they are represented by a computational function, meaning that, unlike what happens with agents and CA cells, the developer consists of a single homogeneous entity.

4 EXPERIMENT

The proposed model was tested in experiments for the municipalities of Tramandaí and Imbé, Brazil. Because the main objective was to make an initial analysis of the model, it was decided to start the simulations with the CA cells all unoccupied². Three different scenarios were considered: i) the entire territory could be occupied and all cells had the same building limits; ii) the occupation of the territory respected the buildings limits defined by current legislation; and iii) a situation similar to the previous one, but considering that in the hundredth iteration a set of areas at risk of flooding is defined and the agents inhabiting these cells must move to another cell.

The implementation of the model was executed on the Gama platform, which is a computational environment for the development of agent-based models and CAs (TAILLANDIER et al., 2019). The geospatial data that enabled the differentiation of the territory was obtained from the OpenStreetMap platform (IMBÉ RS, 2020), while the data of building limits was obtained from current legislation.

4.1 SCENARIO 1: SIMILAR BUILDING RESTRICTIONS

The first simulated scenario considered that all cells are capable of being urbanized and had the same building restrictions - up to five agents inhabiting each cell -

² The simulation of scenarios containing real data of population and built area is planned for the future stages of the research.

so its initial configuration is the one of Figure 6. Figure 7 shows that, because cells with positive load values were initially all located in the beach, its surroundings ended up concentrating most of the agents. This concentration gave rise to a positive feedback in which, due to having more agents, the attractiveness of the cells next to the beach increased, causing even more agents to move there. Figure 8 shows that the value of the cells near the beach become higher than the other parts of the territory due to the described concentration of agents. Also, the occupation of areas located far away from the beach intensifies after iteration 80 due to the depletion of cheap land by the sea and the consequent expulsion of lower income agents from there. Figure 9 and Figure 10 show that cells with higher convergence and opportunity values are located near the beach throughout the simulation.

Figure 6. Initial configuration for the simulation of the first scenario.



Figure 7. Number of agents and predominant use in cells during the simulation of the first scenario.

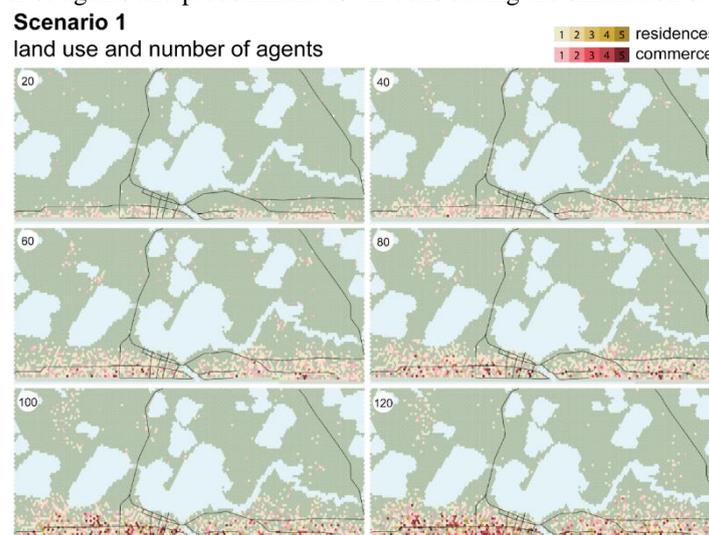


Figure 8. Land value during the simulation of the first scenario.

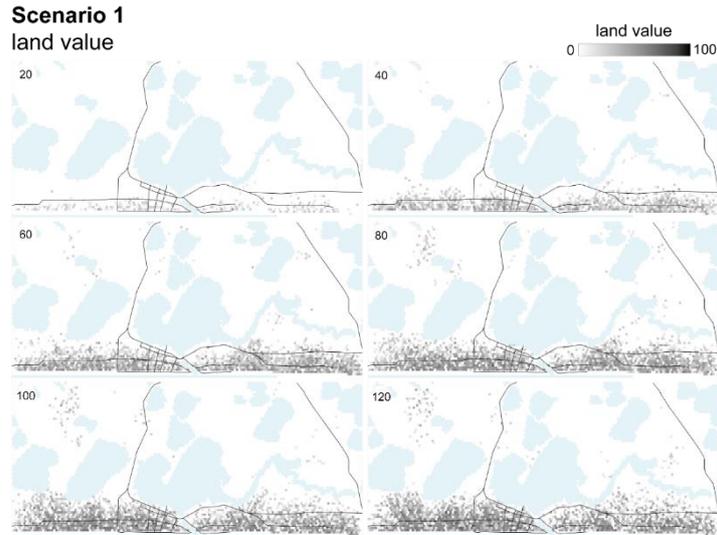


Figure 9. Spatial convergence of cells during the simulation of the first scenario.

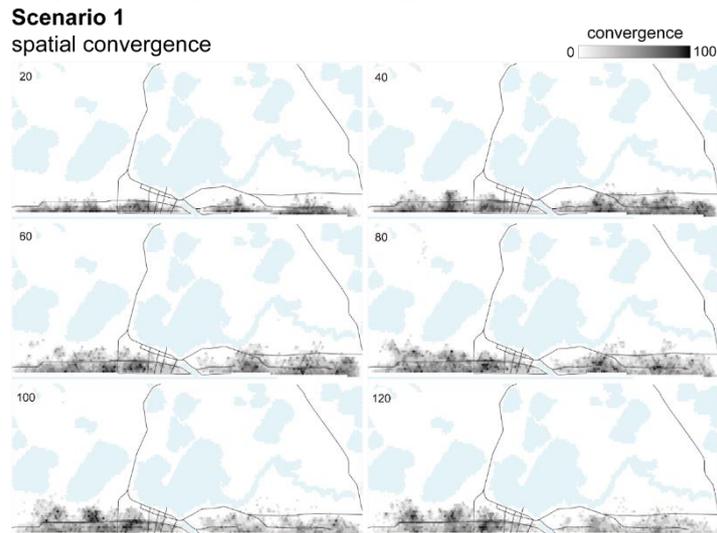
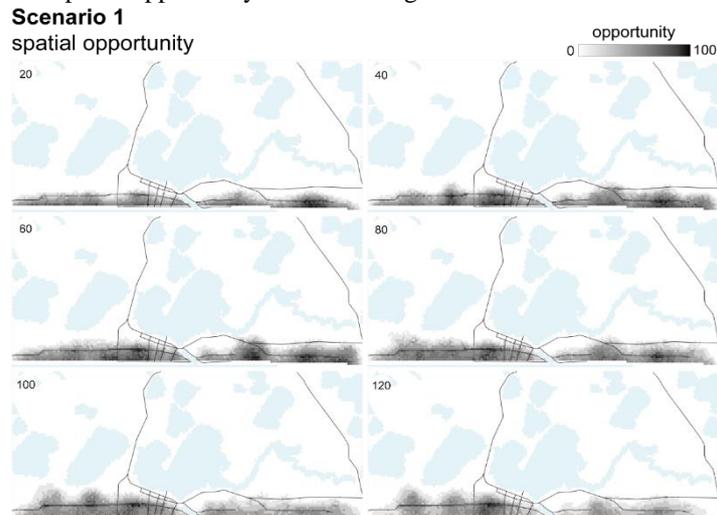


Figure 10. Spatial opportunity of cells during the simulation of the first scenario.



4.2 SCENARIO 2: BUILDING RESTRICTIONS ACCORDING TO CURRENT LEGISLATION

The second scenario used the rules of current urban legislation as reference for the definition of the cells' capacity (Figure 11). In Figure 12, there is a greater concentration of agents in the so-called central area of Tramandaí where building restrictions are more permissible. As the occupation of this area intensifies, it seems to attract even more agents. Because the building restrictions allowed a higher number of agents than the previous simulation, there is no shortage of free spaces and, therefore, the occupation of the areas away from the beach is less intense.

In Figure 13, the lightest grey cells are those occupied by only one built unit, while the other shades of grey indicate cells whose capacity was increased by the action of REDs. Generally, the cells that were expanded by developers were the ones with more permissible building restrictions and with greater accessibility to main roads. Besides, the presence of buildings in an area accelerates the occupation of these same areas because it increases the urban load of its cells, making the appearance of new developments more likely there.

Figure 14 shows that more permissible building restrictions result in lower land values due to the lack of competition for the best locations. This phenomenon, in real life, would probably cause the increase of external individuals migrating to the region due to the lower prices. However, this is not currently being considered in the model, since the number of new agents in each iteration is, for now, the same for all iterations.

Figure 15 and Figure 16 reinforce the idea that the concentration of agents tends to reinforce itself and become increasingly more attractive. Such a process would probably end with the exhaustion of the area's vacant cells, a factor that would cause the increase of land values and the appearance of new urban centres in remote locations.

Figure 11. Initial configuration of the 2nd scenario and the number of floors allowed by local legislation.

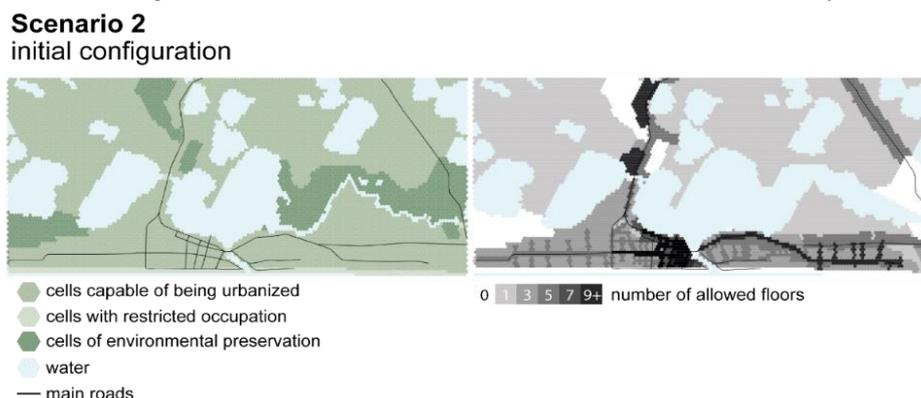


Figure 12. Number of agents and predominant use in cells during the simulation of the second scenario.

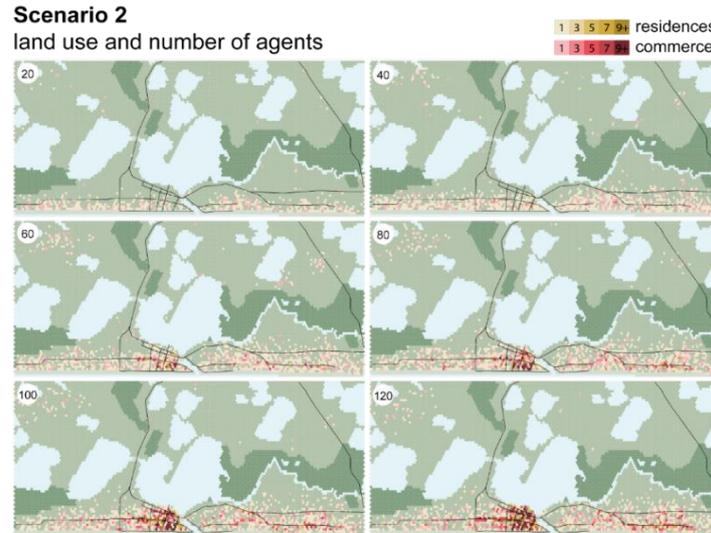


Figure 13. Number of built units in the cells during the simulation of the second scenario.

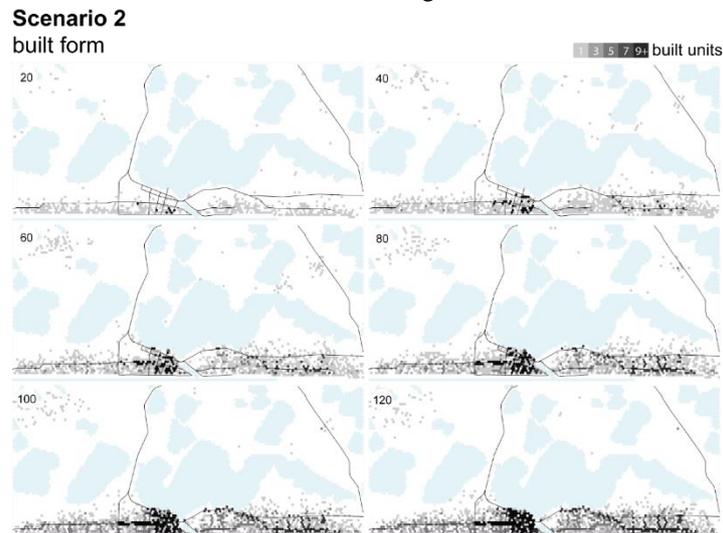


Figure 14. Land value of cells during the simulation of the second scenario.

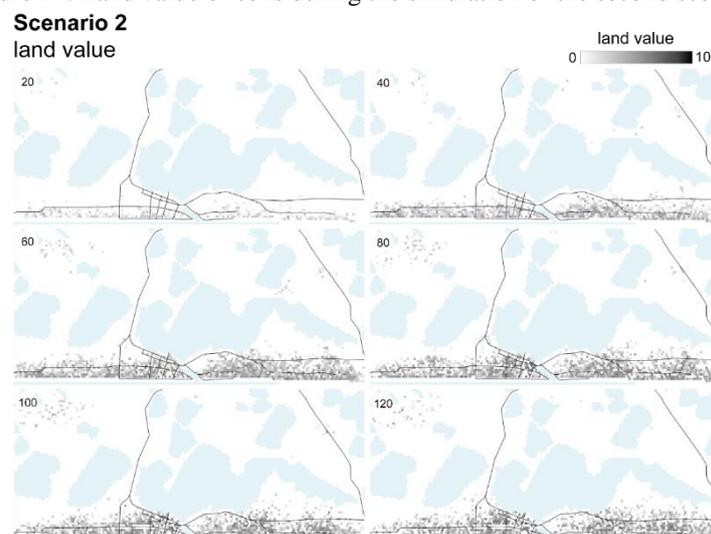


Figure 15. Spatial convergence of cells during the simulation of the second scenario.

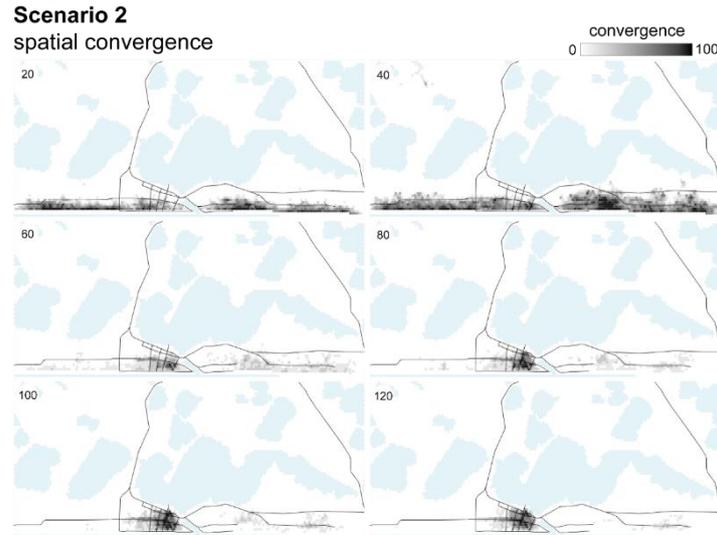
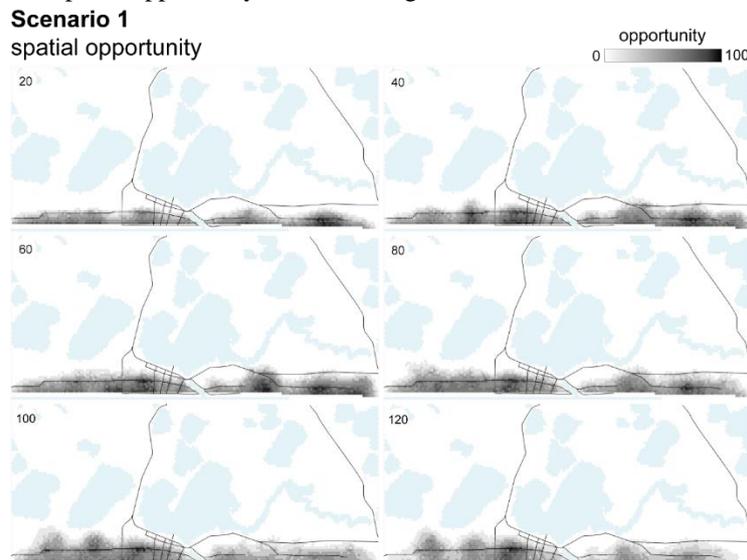


Figure 16. Spatial opportunity of cells during the simulation of the second scenario.



4.3 SCENARIO 3: FLOOD RISK SITUATION

The third scenario considers the effect of the risk of flooding due to sea level rise. The simulation started with a similar configuration to the previous scenario; however, after the 100th iteration, the cells belonging to the area at risk of flooding - according to the mapping of Climate Central (2020) for the year 2070 - cannot receive buildings and its agents must search for another cell to settle in. The behaviour of the system prior to the introduction of the flooding risk presented similar characteristics to those observed in the previous scenario, which is justified by the use of the same initial configurations.

Figure 17. Number of agents and predominant use in the third scenario considering risk of flooding.

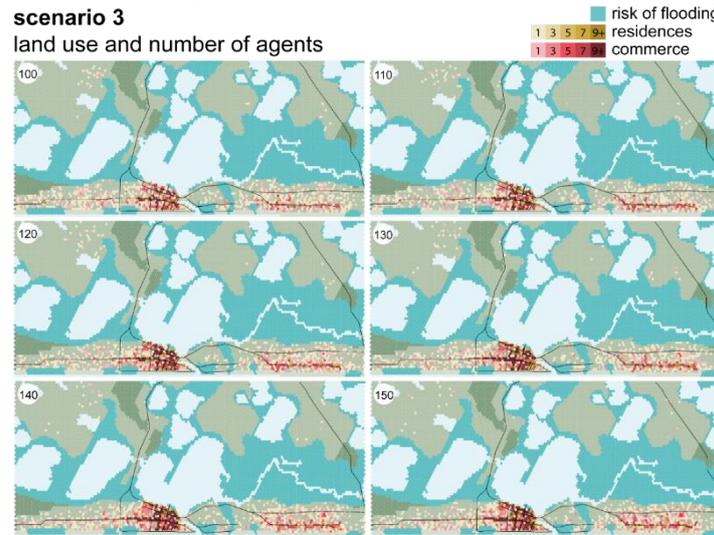


Figure 18. Land value in the cells in the third scenario considering risk of flooding.

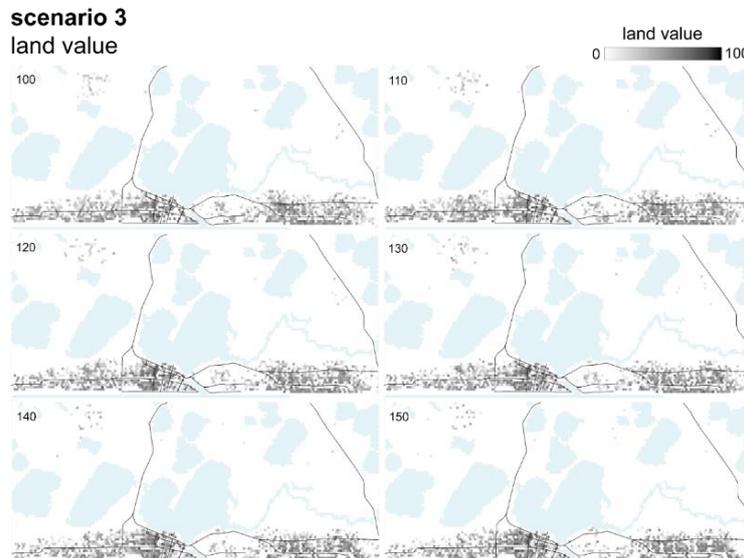
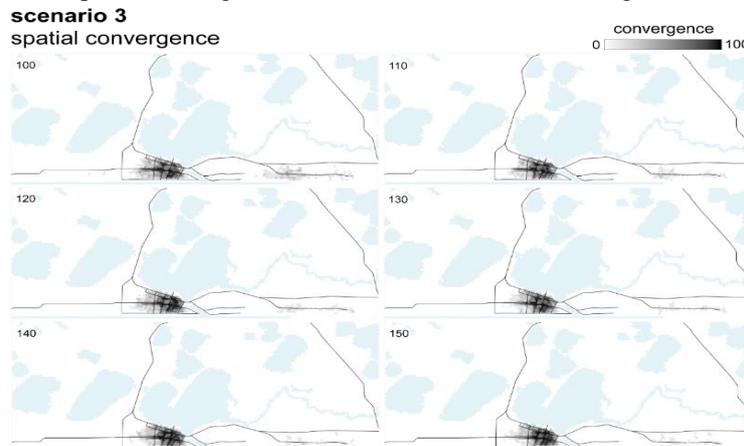
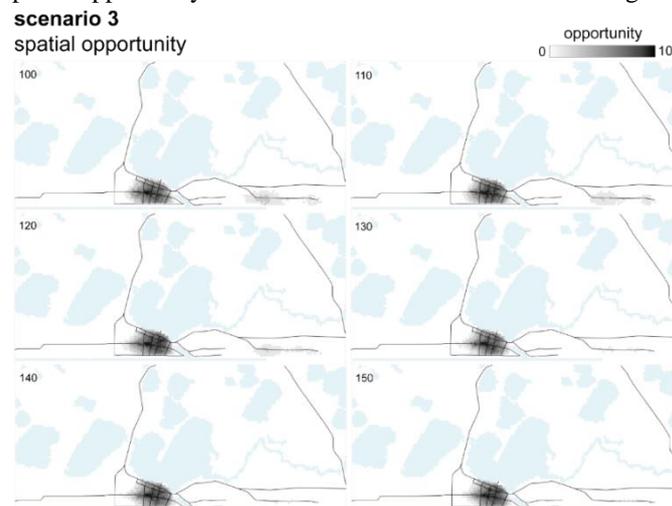


Figure 19. Spatial convergence in the third scenario considering risk of flooding.



The behaviour after the introduction of the risk of flooding is presented from Figure 17 to Figure 20. Figure 17 shows that, as the risk of flooding is considered, the occupation of the central area of Tramandaí intensifies, as well as in Imbé, next to one of its main roads. Figure 18 shows that the land value presents higher values, in relation to the previous scenario, in the central area of Tramandaí. Figure 19 and Figure 20 show an intensification of the concentration of the highest values of opportunity and convergence in a single focal point located in the central area of Tramandaí. These factors seem to be caused by the decrease in the number of available cells due to the risk of flooding, resulting in greater pressure on the remaining cells.

Figure 20. Spatial opportunity in cells in the third scenario considering risk of flooding.



5 DISCUSSION

The first scenario indicates a tendency for the population to spread evenly over the area along the beach, showing that, when we do not consider the differences between building limits, the locational privileges tend to be relatively homogenous in that area. The simulation of the second scenario, on the other hand, show a higher concentration of agents in a reduced area of Tramandaí due to the combination of more permissible building rules with better mobility and accessibility to commercial services. The attractiveness of this area tends to reinforce itself due to the agglomeration forces generated by such a combination of factors, a dynamic that becomes even more intense in the third scenario, in which, as the risk of flooding is inserted in the model, the concentration of agents in the border between Tramandaí and Imbé tends to be even more contrasting in relation to the number of agents inhabiting the rest of the territory.

From the point of view of planning policies, these results show that more permissible construction restrictions are effective in directing the population to certain areas. Therefore, because of the tendency of spatial concentrations to reinforce itself, it may be interesting for the municipalities to introduce more rigid building restrictions aiming at the creation of multiple development focuses, which was proved feasible by the simulation of the first scenario. Such planning policy seems even more appropriate when considering the effect of sea level rise: a more homogeneous distribution of population would offer more alternative places to receive individuals who inhabited the areas at risk of flooding, making less drastic the addition of required infrastructure in such areas.

As for the model's operating logic, despite the consistent reproduction of typical phenomena and dynamics of cities, the predominance of agglomeration forces in the simulations may be related to the absence of dynamics that would counterbalance their effects. Thus, it is possible that the insertion of the following items in the model may contribute to make it more accurate: a) the disadvantages generated by higher population densities, such as road congestion³. Considering this type of factor would result in remote areas having a higher attractiveness, enabling the reproduction of polycentric structures as is commonly observed in cities; b) the decrease in the attractiveness of buildings as they age, which would enable the representation of the cyclical substitution of buildings and the internal migration of agents it generates; and c) the incompatibility between certain types of agents, due to differences in use or income, which makes the proximity between certain agents unlikely, resulting in the homogenization of certain areas.

Another observation to be made is that the agents' behaviour seems robotic: they analyse a set of cells and always choose the most attractive one. One reason for this is that the model does not consider the arbitrariness that is inherent to human decisions, whose choices are not necessarily made based on the maximization of locational privileges, either because of personal motivation or due to bounded rationality. According to Batty (2007a), this arbitrariness can be represented with the addition of a degree of noise to the modelled decision-making process.

³ The increase in the impedance of paths located in the most populated areas was tested in order to take into account the effect of road congestion on the attractiveness of these areas. However, this proved to be computationally inefficient. It is expected, for future stages of the study, the use of some type of road performance metric in order to achieve the effect – such as those proposed Kureke and Bernardinis (2019).

6 FINAL REMARKS

The current work aimed to propose a predictive model of the urban configuration of the municipalities of Imbé and Tramandaí considering the locational preferences of its population groups, its intense real estate market dynamics and the impacts that the expected sea level rise may cause in the study area. The model was used to analyse future development scenarios of the north coast of Rio Grande do Sul in a set of experimental simulations that were executed considering three different development scenarios for the municipalities of Imbé and Tramandaí. The results seem to be coherent with the theoretical bases used to support the study and demonstrate the relevance of simulating the impacts of sea level rise and of the land market dynamics, since both interfered significantly in the urban configuration when they were introduced in the model. Besides, it is possible to draw conclusions about urban planning policies for the study area, especially regarding the definition of building restrictions, which, when permissible, contributed for the emergence of concentrations of agents in certain reduced areas, while, when more restrict, enable a more homogeneous urban growth. Considering the risk of flooding due to sea level rise, the concentration of agents in specific areas intensifies, indicating the necessity of encouraging the emergence of multiple urban centres in order to create multiple alternatives for those who eventually will be impacted by the flood.

The proposed model can still be further refined by, for example, using real population data as the simulation's initial configuration or by making the area at risk of flooding grow gradually instead of directly appearing in its final form. Besides, additional methodological elements are planned to be included in the model, potentially changing the patterns observed in the results: i) the representation of the seasonality of land occupation, which would be achieved with the creation of agents that repeatedly inhabit the model for short periods of time; and ii) the insertion of long-term institutional equipment – such as parks, police stations, schools and hospitals – in the model's initial configuration, which may affect the attractiveness of certain regions due to its location commonly being decided by top-down planning.

The described approach provided insights about the future of the study area, while still presenting the potential to provide more accurate results if specific complementary changes are performed. Therefore, it could become a relevant tool for urban modelling, justifying future studies aiming to develop this tool or to compare its performance with other predictive models proposed for different regions of the world.

REFERENCES

BATTY, M. Complexity in City Systems: Understanding, Evolution and Design: Working Paper Series. Londres: Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), 2007a. Available online: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/3473/> (accessed on 6 June 2021)

BATTY, M. Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. 1. paperback ed ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2007b.

CASALI, Y.; HEINIMANN, H. R. A topological characterization of flooding impacts on the Zurich road network. PLOS ONE, v. 14, n. 7, p. e0220338, 31 jul. 2019, doi:10.1371/journal.pone.0220338.

CLIMATE CENTRAL. Coastal Risk Screening Tool. Available online: <https://coastal.climatecentral.org/map> (accessed on 26 October 2020)

CROOKS, A. T.; PATEL, A.; WISE, S. Multi-Agent Systems for Urban Planning. In: PINTO, N. N. et al. (Eds.). . Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories. [s.l.] IGI Global, 2014. p. 29–56.

DAHAL, K. R.; CHOW, T. E. An agent-integrated irregular automata model of urban land-use dynamics. International Journal of Geographical Information Science, v. 28, n. 11, p. 2281–2303, 2 nov. 2014, doi:10.1080/13658816.2014.917646..

FILATOVA, T. Empirical agent-based land market: Integrating adaptive economic behavior in urban land-use models. Computers, Environment and Urban Systems, v. 54, p. 397–413, nov. 2015, doi:10.1016/j.compenvurbsys.2014.06.007..

IMBÉ RS. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/search?query=imb%C3%A9#map=12/-29.9355/-50.1156>>. Acesso em: 28 out. 2020.

KIM, Y.; NEWMAN, G. Advancing scenario planning through integrating urban growth prediction with future flood risk models. Computers, Environment and Urban Systems, v. 82, p. 101498, jul. 2020, doi:10.1016/j.compenvurbsys.2020.101498..

KLUGE, I. A. Articulação entre Urbanização, Economia e Mercado Imobiliário em Cidades Litorâneas e a Relação com o Ambiente Construído: o estudo de caso do município de Capão da Canoa - RS. Dissertation. Porto Alegre, Brazil: Federal University of Rio Grande do Sul - UFRGS, 2015. Available online: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/130719> (accessed on 28 February 2021).

KRAFTA, R. Modelling intraurban configurational development. Environment and Planning B: Planning and Design, v. 21, n. 1, p. 67–82, 1994, doi:10.1068/b210067.

KRAFTA, R. Urban Convergence: Morphology and Attraction. Environment and Planning B: Planning and Design, v. 23, n. 1, p. 37–48, fev. 1996, doi:10.1068/b230037.
KRAFTA, R. Spatial self-organization and the production of the city. Cybergeogeo, 24 mar. 1999, doi:10.4000/cybergeogeo.4985.

KRAFTA, R. Notas de aula de morfologia urbana. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014; ISBN 978-85-386-0227-9.

KULP, S. A.; STRAUSS, B. H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, p. 4844, dez. 2019, doi:10.1038/s41467-019-12808-z.

KUREKE, B.; BERNARDINIS, M. Indicadores de mobilidade urbana sustentável para cidades de médio porte: uma aplicação em cidade de região metropolitana do Paraná. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 9, 2019, doi: 10.34117/bjdv5n9-019.

PORTUGALI, J. What Makes Cities Complex? In *Complexity, Cognition, Urban Planning and Design*; Portugali, J., Stolk, E., Eds.; Springer Proceedings in Complexity; Springer International Publishing: Cham, 2016; pp. 3–19 ISBN 978-3-319-32651-1.

RIO GRANDE DO SUL. Perfil Socioeconômico COREDE Litoral. Porto Alegre: Secretaria do Planejamento, Mobilidade e Desenvolvimento Regional do Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2015. Available online: <https://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/201512/1513413220151117102724perfi-s-regionais-2015-litoral.pdf> (accessed on 28 February 2021).

TABERNA, A. et al. Tracing resilience, social dynamics and behavioral change: a review of agent-based flood risk models. *Socio-Environmental Systems Modelling*, v. 2, p. 17938, 8 dez. 2020, doi:10.18174/sesmo.2020a17938..

TAILLANDIER, P. et al. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica*, v. 23, n. 2, p. 299–322, abr. 2019, doi:10.1007/s10707-018-00339-6.

TORRENS, P. M. How Cellular Models of Urban Systems Work. (1. Theory): Working Paper Series. Londres: Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), 2000. Available online: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1371/> (accessed on 28 February 2021)

TORRENS, P. M. Automata-based models of urban systems. In: LONGLEY, P.; BATTY, M. (Eds.). . *Advanced Spatial Analysis*. Redlands: ESRI Press, 2003. p. 61–79. WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I. *Modeling Cities and Regions As Complex Systems : From Theory to Planning Applications*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2015.

ZUANAZZI, P. T.; BARTELS, M. Estimativas para a população flutuante do Litoral Norte do RS. Porto Alegre: Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser, 2016.