



**ENAN
PUR 2023**
Belém 22 a 26 de maio



Modelagem dinâmica espacial da expansão urbana na Zona Norte de Teresina-PI

Rômulo Marques-Carvalho

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Pedro Marcelo de Sousa Ferreira

Universidade Federal do Piauí

Guilherme Ignácio Reis

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Fernanda Eduarda de Sousa Lima

Universidade Federal do Piauí

Ana Lucia Ribeiro Camillo da Silveira

Universidade Federal do Piauí

Sessão Temática 7: [Socio] tecnologia para o planejamento urbano e regional

Resumo. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento do processo de expansão urbana em uma área de Teresina-PI, entre 2005 e 2020, a partir da modelagem dinâmica espacial. As simulações foram geradas no software Dinamica EGO, que emprega a cadeia de Markov e a inferência bayesiana, por meio de algoritmos de alocação de mudanças aleatórias, para modelar o fenômeno dinâmico espacial estudado. As simulações foram capazes de detectar as principais mudanças no espaço construído que contribuíram com a expansão urbana. Esta pesquisa evidencia a potencialidade da modelagem dinâmica espacial como instrumento de auxílio na elaboração das políticas locais de ordenamento territorial.

Palavras-chave: geotecnologias; sensoriamento remoto; gestão territorial; espaço urbano.

Spatial dynamic modeling of urban growth in the Northern Zone of Teresina-PI

Abstract. *This work is committed to analyze the behavior of the urban sprawl process in an area of Teresina-PI, between 2005 and 2020, from spatial dynamic modeling. The simulations were generated in the software Dinamica EGO, which employs the Markov chain and Bayesian inference, through random change allocation algorithms, to model the dynamic spatial phenomenon studied. The simulations were able to detect the main changes in the built space that contributed to urban sprawl. This research shows the potential of dynamic spatial modeling as a tool to support the development of local policies for land use planning.*

Keywords: geotechnologies; remote sensing; territorial management; urban space.

Modelación espacial dinámica de la expansión urbana en la Zona Norte de Teresina-PI

Resumen. *El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento del proceso de expansión urbana en un área de Teresina-PI, entre 2005 y 2020, a partir de la modelación espacial dinámica. Las simulaciones se generaron en el software Dinamica EGO, que utiliza la cadena de Markov y la inferencia bayesiana, mediante algoritmos de asignación aleatoria de cambios, para modelizar el fenómeno dinámico espacial estudiado. Las simulaciones permitieron detectar los principales cambios en el espacio construido que contribuyeron a la expansión urbana. Esta investigación pone de relieve el potencial de la modelación espacial dinámica como herramienta de ayuda a la elaboración de políticas locales de ordenación del territorio.*

Palabras clave: geotecnologías; percepción remota; gestión territorial; espacio urbano.

1. Introdução

Durante a segunda metade do século XX, as cidades brasileiras passaram por um forte crescimento demográfico e espacial que afetou diversas escalas da conjuntura urbana, as relações sociais e a forma de “produção da cidade”. Como pontuado por Abramo (2007, p.2) “[...] nos países latino-americanos, a produção das cidades modernas resulta do funcionamento das duas lógicas [...] (mercado e Estado), mas também [...] da lógica da necessidade [...] que moveu, e continua a mover, [...] o processo de consolidação dos assentamentos populares informais”.

A influência dessas “lógicas” é evidenciada ao analisarmos as cidades brasileiras, pois, a título de exemplificação, ao longo dos anos 1970 e 1980, observa-se a atuação do Estado como financiador e construtor de conjuntos habitacionais, do mercado imobiliário como promotor de loteamentos privados distantes dos centros das cidades e da população de baixa renda como produtora de ocupações espontâneas em áreas ambientalmente vulneráveis. Ainda neste período, a rápida transição do Brasil rural para o urbano também exerceu influência sobre a produção do espaço urbano. De acordo com Pantaleão e Ferreira (2011), os centros urbanos não estavam preparados para receber o crescente contingente populacional oriundo da área rural, o que ocasionou *déficit* de moradias, e alta demanda dos serviços urbanos. Assim, diante desses processos, as paisagens naturais e rurais foram modificadas, alterando consigo as relações sociais e o meio ambiente natural. (SANTOS, 2004)

Conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017), o percentual de pessoas residentes de área urbana no Brasil, nos anos 1950, era de aproximadamente 30%. Enquanto que, em 2015, a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD (2015) evidenciou que este valor atingira a marca de 84,72%, fato que demonstra uma intensificação do fenômeno de expansão urbana até a atualidade.

A projeção desse processo pode ser observada na cidade de Teresina, capital do Piauí, que passou por um grande crescimento urbano a partir de 1960 e continuou a apresentar altas taxas de expansão da área urbanizada, sendo que nos últimos 20 anos, apresentou crescimento de 27,35% em sua área urbana (MAPBIOMAS, 2021). Consoante com Lima (2002), Moura (2006) e Pessoa (2019), durante o século XX, o crescimento de Teresina foi influenciado pela ação do Estado como financiador da construção de conjuntos habitacionais distantes do centro consolidado, do mercado imobiliário como indutor da ocupação de áreas nas margens dos rios e da própria população por meio de ocupações espontâneas na periferia urbana.

Esse panorama é visto na Zona Norte de Teresina, em especial ao extremo norte, área com elevado potencial de expansão devido à abundância de bancos de terra. Porém, Moura (2006) atenta para o fato de que, apesar da disponibilidade, grande parte dessas áreas são inaptas à urbanização em decorrência da proximidade aos rios, lagoas e áreas de declividade acentuada. Com base em noticiários locais (G1, 2013; VEJA, 2016; PORTALODIA, 2022), dados oficiais da Prefeitura Municipal de Teresina (Teresina, 2011, 2020, 2022) e dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2022), observou-se que, nos últimos anos, esta região passou por diversos eventos climáticos extremos, tais como alagamentos, inundações e deslizamentos de massa.

Sendo assim, adotou-se como problema de pesquisa deste artigo o estudo da expansão urbana ao extremo norte da Zona Norte de Teresina, uma vez que essa porção territorial é caracterizada por um dinâmico processo de crescimento urbano, protagonizado em mesmo grau por todos os agentes sociais, isto é, o Estado, o povo e a iniciativa privada. Além disso, trata-se de um território ladeado por rios e repleto de lagoas, cujas margens apresentam indícios de atividades urbanas inapropriadas, como a residencial. Dessa forma, tem-se por objetivo compreender a expansão das áreas urbanizadas, entre 2005 e 2020, por meio da modelagem dinâmica espacial desse fenômeno, de maneira a parametrizar e calibrar um modelo capaz de gerar cenários futuros. Os resultados poderão ser utilizados na criação de simulações que subsidiem as tomadas de decisão por parte dos gestores que integrem a governança territorial dessa área, de modo a conduzir, com maior segurança, o planejamento urbano local.

2. A área de estudo: Zona Norte além rios

A área adotada como objeto de estudo deste trabalho foi a parcela da Zona Norte além do encontro dos rios Poti e Parnaíba, delimitada ao norte pelo perímetro urbano, ao leste pelo bairro Alegre e perímetro urbano, ao sul pelo rio Poti e ao oeste pelo rio Parnaíba (Figura 1). Esta área possui aproximadamente 3560 ha (hectares), sendo 33,62% de área urbanizada e 66,38% de área livre, em consonância com dados do MapBiomas (2022) referentes ao ano de 2020.

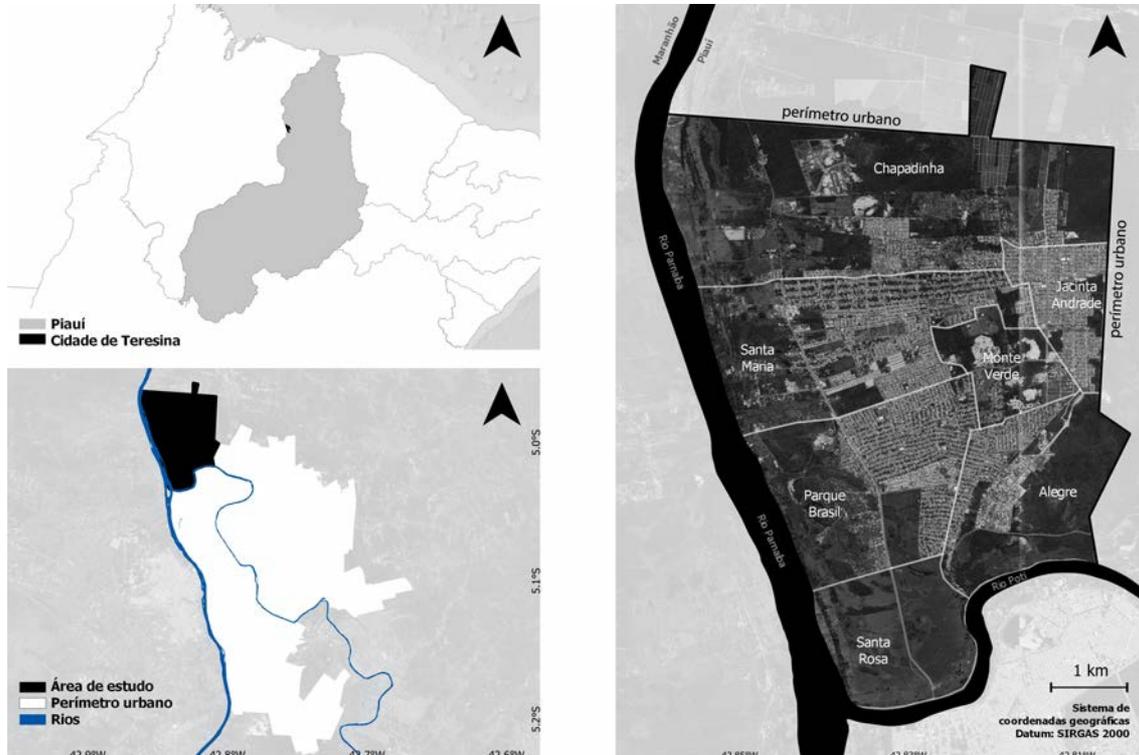


Figura 1. Área de estudo (fonte: elaborada pelos autores).

Atualmente, a Zona Norte de Teresina é uma das zonas administrativas com maior estoque de terras da cidade. Contudo, grande parte dessa área está indisponível para ocupação, pois possui aspectos físicos e ambientais que configuram um estado de fragilidade ambiental – como a proximidade aos rios, lagoas de detenção, áreas com declividade alta e afins. Em conformidade com Vale (2016) e Santos e Marchioro (2020), áreas de fragilidade ambiental são espaços com alta vulnerabilidade física, ecossistemas sensíveis e que devem apresentar restrições à urbanização no intuito de evitar a ocorrência de possíveis desastres ambientais. Situação não verificada na área de estudo:

[...] a Zona Norte apresenta uma tendência para a consolidação da ocupação de seus espaços vazios, uma vez que as intervenções públicas quanto à política habitacional e à infraestrutura valorizaram (e seguem valorizando) a terra urbana... (OLIVEIRA, 2020, p.165)

A partir de imagens capturadas pelo satélite Landsat 5 e de dados históricos apresentados por Teresina (2018), observou-se que a ocupação urbana da área de estudo iniciou em meados da década de 1980. Este fenômeno ocorreu inicialmente ao longo da estrada municipal N° 150 (hoje av. Poti Velho), paralela ao rio Parnaíba, passando pelos povoados Chapadinha e São Domingos, à orientação norte. Essa zona começou a ser ocupada em 1985 no, até então, extremo norte de Teresina (distanto aproximadamente 12 km lineares do Centro). Posteriormente, essa ocupação originou o bairro Santa Maria, o primeiro da área de estudo, e, a partir dele, a urbanização passou a ser direcionada no sentido sul. (FAÇANHA, 2003; LIMA, 2017)

Entre os anos 1980 e 1990 a área de estudo ainda se encontrava pouco ocupada, com exceção do bairro Santa Maria. Porém, em 1991, houve um grande impulso à urbanização, pois a ponte Mariano Castelo Branco foi construída, conectando as duas parcelas da zona norte separadas

pelo rio Poti. No início dos anos 2000, a urbanização do extremo norte continuou avançando na direção sul. Neste período, novas vias coletoras foram executadas, perpendiculares à av. Poti Velho, favorecendo as ocupações espontâneas e os loteamentos privados, que se estabeleceram em seu entorno, à orientação Leste. Em 2008, o Governo do Estado, por intermédio da Agência de Desenvolvimento Habitacional do Piauí (ADH-PI), com financiamento do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), também passou a atuar nesta área promovendo a construção do conjunto habitacional Jacinta Andrade, com 4.300 unidades habitacionais, adjacente a um grande fundo de vale da zona norte de Teresina. (BRUNA *et. al.*, 2014; OLIVEIRA, 2020; LOPES *et. al.*, 2020)

Na década de 2010, a urbanização chegou à av. Josué Moura Santos e parou de avançar no sentido sul, provavelmente em função dos condicionantes físicos e ambientais (como o rio Poti), voltou-se à ocupação dos vazios urbanos existentes na área. No ano de 2013, o Poder Público Executivo municipal sancionou a Lei Ordinária nº 4.423, de 16 de julho de 2013, que delimitou e criou os bairros que compõem a área de estudo: Alegre, Chapadinha, Monte Verde, Jacinta Andrade, Parque Brasil, Santa Maria e Santa Rosa. (TERESINA, 2013; MELO, 2015)

Entre os anos 2010 e 2020, a dinâmica de ocupações espontâneas se tornou ainda mais intensa nesta zona. De acordo com dados de Teresina (2011), no ano de 2011 muitas famílias ocuparam a área ao norte do bairro Santa Maria, fundando a Vila Dilma Rousseff. Além disso, por volta do ano de 2015, a área entre a av. Poti Velho e o rio Parnaíba começou a ser ocupada, inicialmente com o “Assentamento Lindalma Soares”, em uma porção do território sujeita a inundações. No ano de 2017, uma nova ocupação espontânea iniciou na área ao norte do residencial Jacinta Andrade, formando o “Residencial Dandara dos Cocais”. (TERESINA, 2021)

Por fim, no ano de 2020, em concordância com Teresina (2020), o poder público inaugurou o “Residencial Parque Brasil” com 1.022 unidades habitacionais, ocupando um grande vazio urbano dentro da área de estudo. Ainda em 2020, a iniciativa privada concluiu a primeira etapa do loteamento “Conviver Teresina”, nas proximidades da avenida Dr. Josué Moura Santos. Esse empreendimento será construído em quatro etapas e, pela sua dimensão, é de se esperar que se torne um dos principais vetores de indução de novos processos de ocupação na zona. A Figura 2 mostra a expansão urbana da área de estudo ao longo dos anos.

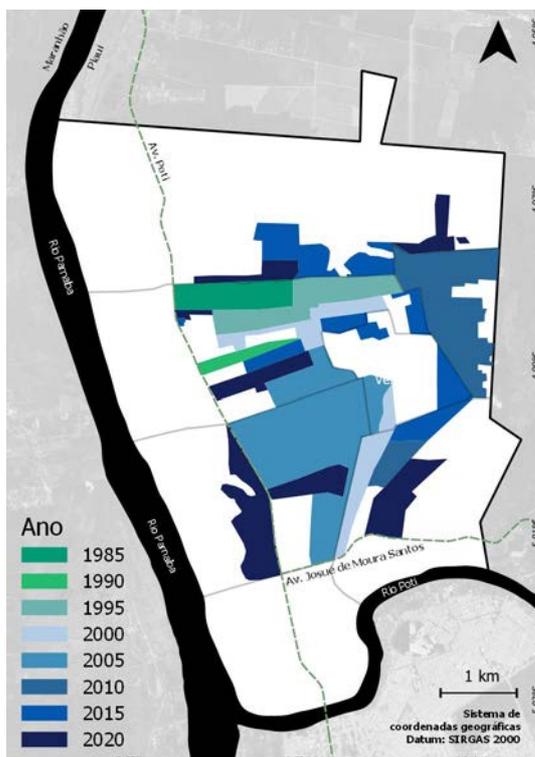


Figura 2. Expansão urbana da área de estudo (fonte: elaborada pelos autores).

3. Modelagem dinâmica espacial aplicada ao planejamento urbano e regional

As técnicas e produtos do sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são importantes ferramentas para a identificação e monitoramento de mudanças no uso e cobertura da terra ao longo do tempo (BAIG *et al.*, 2022). Os conceitos de uso e cobertura da terra são comumente confundidos em estudos e levantamentos que utilizam imagens de sensoriamento remoto para a sua identificação. A definição de cobertura da terra engloba a camada de solo, vegetação natural, culturas e estruturas humanas que cobrem a superfície terrestre. Portanto, a cobertura da terra pode ser determinada pela observação direta da superfície terrestre a partir de uma imagem orbital. Por outro lado, o uso do solo se refere ao propósito pelo qual o ser humano explora a cobertura da terra. Dessa forma, a identificação do uso da terra deriva de uma interpretação das atividades antrópicas na superfície terrestre. (COMBER, 2008; VERBURG *et al.*, 2009)

No geral, as mudanças de uso e cobertura da terra estão ligadas a decisões e políticas públicas e podem provocar impactos ambientais em curto e longo prazo (BRIASSOULIS, 2000). Por isso, modelar essas mudanças torna-se uma importante ferramenta para compreender como ocorrem esses processos e também para simular cenários futuros (BRANCO; ALMEIDA; FRANCISCO, 2021). A modelagem possibilita representar os processos de mudanças no uso e cobertura da terra incorporando um conjunto de variáveis que podem estar associadas às mudanças analisadas (GIRMA; FURST; MOGES, 2022). Portanto, a modelagem possibilita a quantificação e espacialização das alterações ocorridas no uso e cobertura da terra em um determinado momento pretérito, ou a criação de futuros, assim como também identificar as causas que podem estar por trás destas mudanças por meio da incorporação de um conjunto de variáveis no modelo. (BRIASSOULIS, 2020)

Briassoulis (2000) propõe uma categorização de modelos de mudanças no uso e cobertura do solo onde a classificação leva em consideração os diferentes aspectos metodológicos e funcionais existentes. Dessa forma, a autora categoriza os modelos em: modelos econométricos, modelos de interação espacial, modelos de otimização, modelos integrados, modelos baseados em ciências naturais, modelos baseados em GIS e modelos baseados na cadeia de Markov. Almeida (2003) propõe uma outra classificação para os modelos, focada em seus aspectos conceituais e operacionais, como a capacidade de um modelo apreender e lidar com representações de eventos espaço-temporais, observando uma sequência cronológica em relação ao seu aparecimento. A autora classifica os modelos em: modelos não dinâmicos de mudanças do uso do solo, modelos dinâmicos não espaciais e modelos dinâmicos espaciais ou espacialmente explícitos. O modelo utilizado no presente trabalho é classificado como um modelo dinâmico espacial, pois possui a dimensão temporal explícita e suas entradas e saídas variam com o tempo e seus estados dependem de seus estados anteriores.

Os modelos dinâmicos espaciais normalmente são representados por uma estrutura de quadriculas (células ou pixels) que é a base para modelos baseados em autômato celulares. Wolfram (2002) exemplifica o conceito de autômato celular como: “uma linha de células, cada uma colorida de preto ou branco. A cada passo de tempo, existe uma regra definida que determina a cor de uma determinada célula, a partir da cor dessa mesma célula e de suas vizinhas imediatas à esquerda e à direita no passo de tempo anterior” (WOLFRAM, 2002, p. 24). Os autômatos celulares são um dos métodos mais comuns usados na modelagem e simulação de mudanças no uso e cobertura da terra. Nessa representação, o estado do pixel (classe de uso e cobertura) tem seu estado definido a partir do seu estado no início do período considerado na simulação, dos pixels que representam as classes circundantes e um conjunto de regras de transição que normalmente são condicionadas por uma série de variáveis forçantes, tais como: características ambientais, condições de acessibilidades, características sociodemográficas, estrutura fundiária, dentre outras. (LIU *et al.*, 2022)

O Dinâmica EGO, acrônimo para *Environment for Geoprocessing Objects*, é um *software* de modelagem dinâmica espacial baseado em autômatos celulares e foi utilizado nas simulações realizadas no presente trabalho. O Dinâmica recorre ao uso da cadeia de Markov para quantificar as mudanças no uso e cobertura da terra bem como autômatos celulares para reproduzir os padrões espaciais dessas mudanças, baseando-se por sua vez em mapas de probabilidade de mudanças calculados a partir do método de pesos de evidência. (SOARES-FILHO *et al.*, 2002). Como definido pelo CSR/UFMG (2022), “não é apenas um modelo de mudança do uso do solo, mas uma plataforma de modelagem ambiental”. Logo, diversas têm sido as suas aplicações, o que inclui modelagens urbanas. Como exemplos de trabalhos de modelagens urbanas com o Dinâmica EGO, pode-se citar: o realizado por Campos *et al.*, (2022) que realizou a modelagem das mudanças do uso e cobertura nas redondezas de escolas públicas na cidade de São Paulo; o estudo de caso de Freitas e Araki (2021), que realizaram simulações pretéritas para analisar a expansão urbana ocorrida na cidade de Curitiba entre os anos de 2006 a 2014; o trabalho desenvolvido por Bedewy *et al.*, (2021) que buscou analisar a relação entre a rede de transportes e o crescimento urbano verificado na cidade de Al-Diwaniyah e o desenvolvido por Almeida *et al.*, (2008) que utilizou redes neurais artificiais para parametrizar um modelo de mudança de uso da terra intraurbana no município de Piracicaba entre os anos de 1985 a 1999.

O processo de urbanização tem se intensificado nas últimas décadas em função do êxodo rural e do aumento populacional, que demandam mais espaço construído nas cidades para acomodação de pessoas e suporte à vida urbana. De modo geral, essa demanda habitacional tem sido resolvida de forma planejada ou espontânea, provocando o crescimento acelerado de manchas urbanas para áreas até então rurais ou agrícolas, gerando cidades espraiadas, sintomáticas de uma urbanização corporativa. (SANTOS, 1993)

A importância do desenvolvimento de pesquisas que buscam elucidar e analisar as dinâmicas e impactos associados ao crescimento urbano reside no fato que há uma tendência de que a maior parte da população irá residir em áreas urbanas. Além disso, as cidades tornaram-se os centros de controle da economia global, de onde são gerenciadas transações financeiras, fluxos de informações e onde são instalados os principais centros de pesquisa. Neste sentido, torna-se cada vez mais essencial a criação de planos estratégicos locais que tem como objetivo analisar e ter um melhor entendimento das dinâmicas que ocorrem na esfera física das áreas urbanas.

No escopo do planejamento urbano, o uso da modelagem centra-se na avaliação de impactos no meio no meio natural e antropogênico, auxiliando a estruturação de planos diretores, setoriais, programas, ações e projetos estruturantes integrantes de certas políticas públicas (LIN *et al.*, 2023). Ademais, em face dos acordos internacionais para a execução de ações locais que busquem o desenvolvimento sustentável, a modelagem de mudanças do uso do solo passou a se projetar como uma atividade científica significativa, uma vez que seus impactos adversos “reduzem o capital natural, econômico, humano e social disponível para as gerações futuras” (BRIASSOULIS, 2020, p. 14).

Como exemplos de trabalhos que utilizaram a modelagem no escopo do planejamento urbano, têm –se: o trabalho realizado por Okwuashi e Ndehedehe que buscou simular cenários futuros do crescimento urbano da cidade de Lagos, Nigéria, considerando o ano de 2030; o estudo de caso desenvolvido por Zhang *et al* (2022) que utilizou um modelo baseado em autômatos celulares baseado nas condições de acessibilidade urbana relacionadas com a estrutura viária para simular mudanças no uso do solo urbano na cidade de Toronto, Canadá; Lin *et al.*, (2022) propuseram um modelo para analisar potenciais áreas de risco a inundações que poderiam surgir a partir do processo de mudanças no uso e cobertura da terra em ambientes urbanos; Wang *et al* (2022) utilizaram um conjunto de métricas da paisagem em conjunto a cadeias de Markov para simular as mudanças no e cobertura da terra em uma área de conservação ecológica nas proximidades de Pequim, China, ocorridas entre 2020 e 2020 e também projetaram cenários futuros considerando o ano de 2030.

4. Materiais e métodos

O desenvolvimento desta pesquisa foi substancialmente dividido em duas etapas. Na primeira, montou-se o banco de dados, composto pelos mapas binários de identificação das áreas urbanizadas e das variáveis explicativas do fenômeno estudado. Esses dados foram criados a partir de procedimentos de geoprocessamento em ambiente SIG no QGIS 3.22.11, um *software* livre. Ao passo que na segunda etapa, realizou-se a modelagem da expansão urbana na área de estudo. Para tanto, empregou-se um modelo baseado em autômato celular implementado no *Dinamica EGO 7.1.1*, um *software* livre de modelagem ambiental. Em síntese, a modelagem compreende as subetapas de parametrização, calibração e validação da simulação. A Figura 3 apresenta o fluxograma metodológico.

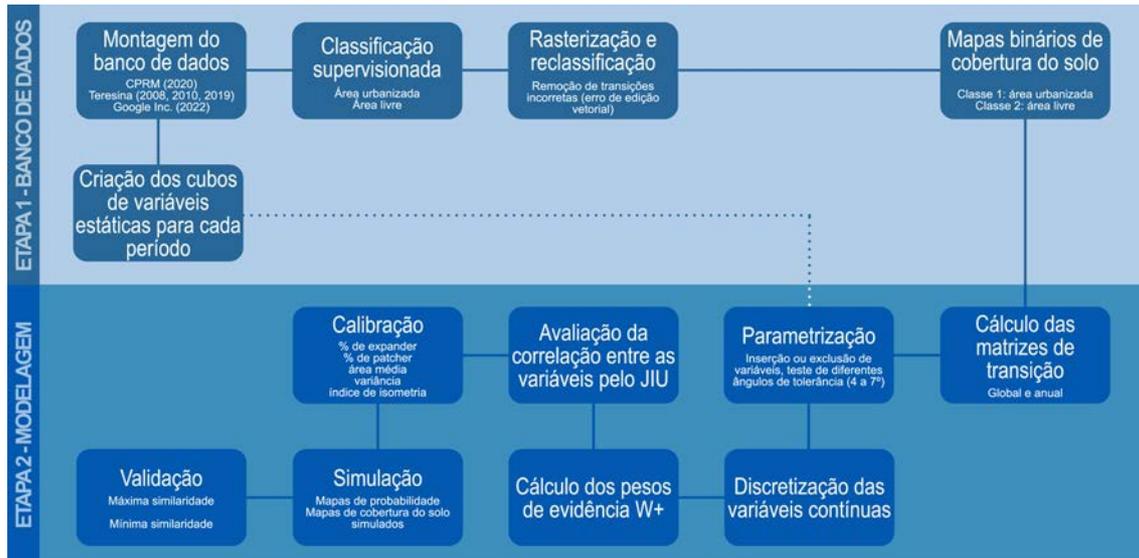


Figura 3. Fluxograma da abordagem metodológica (fonte: elaborada pelos autores).

4.1 Mapas binários de áreas livres ou urbanizadas

Os mapas de representação das áreas urbanizadas (Figura 4) foram elaborados para os anos de 2005, 2010, 2015 e 2020, de modo a resultar em um intervalo de tempo de cinco anos entre cada período, que para Wegener *et al.* (1986), é o máximo para percepção das mudanças no espaço urbano sem tornar o modelo inadequado. Esses mapas são binários, ou seja, apresentam uma classe para áreas livres e outra para as áreas urbanizadas. Para os fins desta pesquisa, agregou-se na classe “áreas livres”, rios efêmeros e intermitentes, lagoas, coberturas vegetais e solos expostos, estes últimos, desde que não apresentassem aspectos de terra urbanizada, tais como vias asfaltadas, sistema de transmissão de energia elétrica, edificações, dentre outros. Enquanto que a classe “áreas urbanizadas” corresponde ao espaço construído em si (edificações e vias pavimentadas).

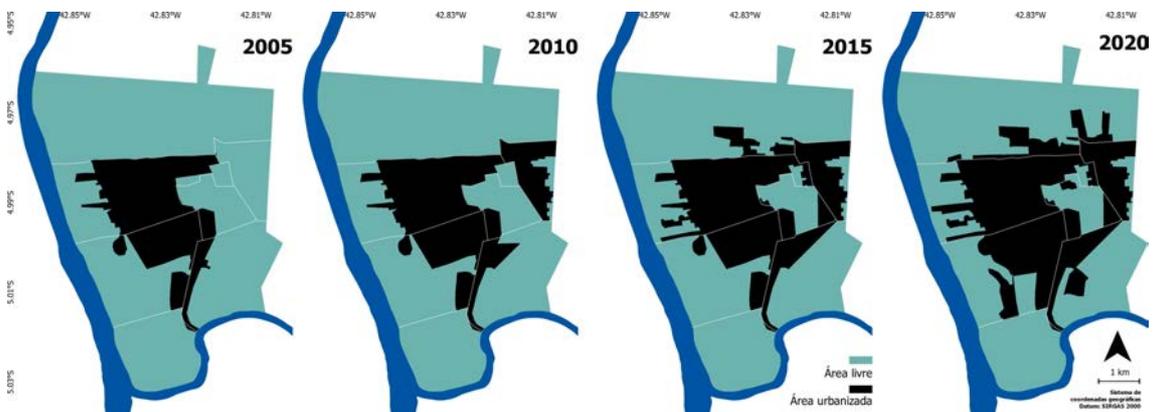


Figura 4. Mapas de entrada para o modelo (fonte: elaborada pelos autores).

A diferenciação entre as classes deu-se por fotointerpretação de imagens de satélite de altíssima resolução espacial disponibilizadas no *software Google Earth Pro*. Após o procedimento de edição vetorial, os mapas foram convertidos para dados matriciais. Com o intuito de remover transições espúrias, isto é, que não ocorreram no período simulado, procedeu-se com uma operação de tabulação cruzada e, em seguida, de reclassificação do dado matricial, de forma a eliminar os eventuais erros cometidos no procedimento de edição vetorial.

4.2 Variáveis forçantes

O Dinamica EGO emprega a cadeia de Markov e a inferência bayesiana, por meio de algoritmos de alocação de mudanças aleatórias, para modelar o fenômeno dinâmico espacial estudado. Como entradas do modelo, são necessários mapas (dado matricial) que representem o fenômeno nos tempos inicial e final do período considerado. Além disso, o modelo demanda a inserção, também na forma de dado matricial, de variáveis explicativas do fenômeno estudado, definidas de acordo com o conhecimento técnico do pesquisador e/ou buscas na literatura publicada.

Essas variáveis podem ser contínuas ou discretas, estáticas ou dinâmicas. Reis e Reis (2002), definem variáveis contínuas como aquelas que assumem valores não inteiros, ao passo que as discretas, somente um número contável no conjunto dos números inteiros. Como explicado por Almeida (2004), as variáveis estáticas são compostas por valores que não se alteram após cada iteração de mudança de estado das células, enquanto as variáveis dinâmicas são atualizadas a cada nova iteração, de maneira a exercer influência na probabilidade de mudança de estado da célula na iteração seguinte. Neste estudo, foram empregadas variáveis dinâmicas (calculadas dentro do próprio Dinamica EGO), variáveis estáticas contínuas, na forma de mapas de distância, e variáveis estáticas categóricas, na forma de mapas temáticos.

As variáveis forçantes ou explicativas empregadas na parametrização do modelo foram classificadas, além da sua natureza (dinâmica ou estática), como imutáveis e transmutáveis, para fins de organização do banco de dados e de melhor controle das fases de parametrização e calibração. Como imutáveis, entendeu-se àquelas que se mantiveram inalteradas ao longo de todo o período simulado, ou seja, ao decorrer dos 15 anos, sendo elas: distância a lagoas, distância a rios, distância a vias arteriais, declividade, unidades geológicas, tipo de solo, modelo digital de elevação (MDE) e áreas de especulação imobiliária (Figura 5). Essas variáveis foram empregadas em todos os períodos de simulação.

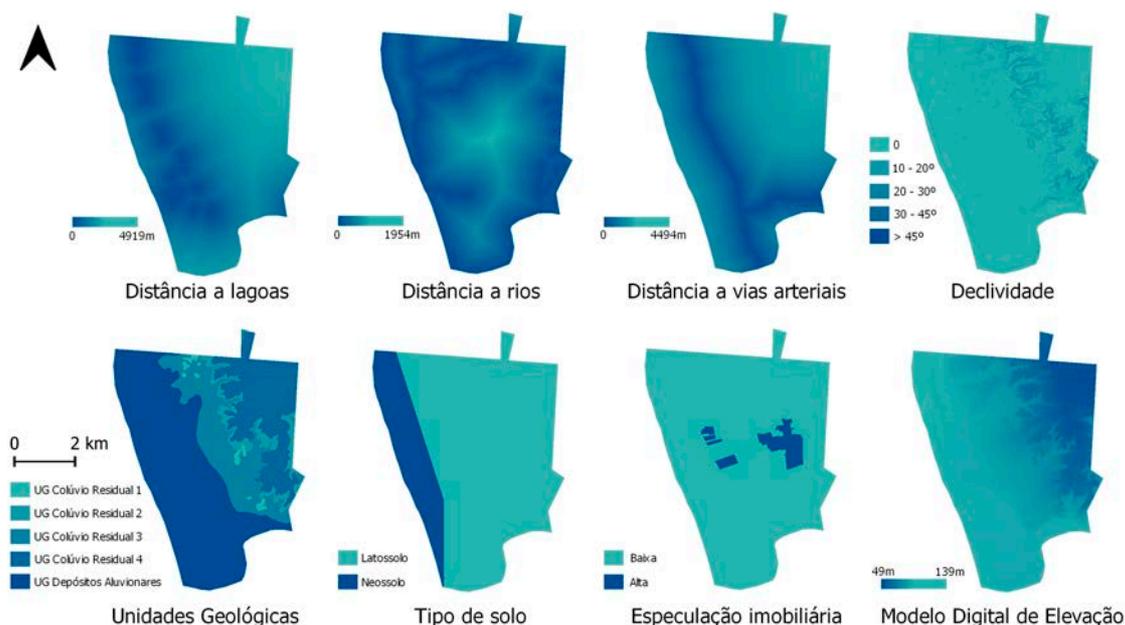


Figura 5. Conjunto de variáveis imutáveis utilizadas no modelo (fonte: elaborada pelos autores).

Tendo em vista que o período total da simulação foi dividido em intervalos de cinco anos, foi possível identificar variáveis distintas que condicionaram a ocorrência do fenômeno estudado em cada passo de tempo. Por exemplo, notou-se que a distância a vias coletoras influenciou a expansão urbana nos períodos de 2005 a 2010 e 2010 a 2015, mas o mesmo não foi observado entre 2015 e 2020, portanto, esta variável não foi empregada na parametrização da expansão urbana nesse intervalo de tempo. A descrição de cada variável é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1. Descrição das variáveis estáticas forçantes do modelo (fonte: elaborado pelos autores).

Variável	Período: 2005 a 2020		
	Descrição	Escala/ Resolução	Fonte
Distância a lagoas	Distância euclidiana ¹ a lagoas	2,5m	Teresina (2010)
Distância a rios	Distância euclidiana a rios	2,5m	Teresina (2010)
Distância a vias arteriais	Distância euclidiana a vias de ligação entre zonas da cidade	2,5m	Teresina (2008)
Declividade	Níveis de inclinação existentes	2,5m	CPRM (2020)
Unidades geológicas	Conjunto de agrupamentos de rochas	1:10000	CPRM (2020)
Tipo de solo	Classes de solo	1:10000	CPRM (2020)
Modelo digital de elevação	Altitude em relação ao nível do mar	2,5m	CPRM (2020)
Áreas de especulação imobiliária	Glebas sem qualquer função atribuída	2,5m	Google Inc. (2022)
Distância à zona rural	Distância euclidiana ao limite do perímetro urbano	2,5m	Teresina (2019)
Distância a áreas queimadas ²	Distância euclidiana a áreas com cicatrizes de queimadas	2,5m	Google Inc. (2022)
Distância a áreas terraplanadas ²	Distância euclidiana a áreas de solo exposto decorrente de intervenções construtivas	2,5m	Google Inc. (2022)
Distância a equipamentos comunitários ²	Distância euclidiana a equipamentos públicos de educação, cultura, saúde, lazer e similares	2,5m	Google Inc. (2022)
Distância a vias coletoras ²	Distância euclidiana a vias que ligam vias locais às vias arteriais	2,5m	Teresina (2008)
Distância a vias vicinais	Distância euclidiana a vias não pavimentadas e sem qualquer elemento de infraestrutura urbana	2,5m	Google Inc. (2022)
Distância a vazios urbanos ³	Distância euclidiana a terrenos sem qualquer função atribuída	2,5m	Google Inc. (2022)

Obs. ¹Distância expressa em metros. ²Variável não utilizada no período 2015 a 2020. ³Variável utilizada apenas no período 2015 a 2020.

As variáveis “distância a lagoas” e “distância a rios” foram derivadas de dados obtidos no Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDUr/THE). As variáveis “distância a vias arteriais” e “distância a vias coletoras” foram criadas com base na hierarquização viária estabelecida no Plano Diretor de Transporte e Mobilidade Urbana de Teresina (PMTU), ao passo que a variável “distância a vias vicinais” foi criada a partir de fotointerpretação de imagens do ano inicial do período considerado, disponibilizadas no *software Google Earth Pro*. As variáveis “declividade”, “unidades geológicas”, “tipo de solo” e “modelo digital de elevação” foram importadas do banco de dados empregado na elaboração da Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização frente a desastres naturais: município de Teresina, PI, desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil. Por fim, a última variável entendida como imutável, denominada de “áreas de especulação imobiliária”, foi criada também por fotointerpretação de imagens de altíssima resolução espacial, seguindo o mesmo procedimento descrito para a variável “distância a vias vicinais”. Entendeu-se como áreas de especulação imobiliárias porções territoriais ainda não parceladas, que embora não existissem

restrições explícitas à ocupação, como proibições legais, declividade inadequada à construção, proximidade a áreas inundáveis, dentre outras, mantiveram-se na condição de glebas sem a prática de qualquer atividade urbana.

O conjunto de variáveis transmutáveis foi atualizado a cada período modelado, pois a informação representada sofria alterações importantes no intervalo de tempo adotado. É o caso das variáveis de “distância a áreas queimadas”, “áreas terraplanadas”, “equipamentos comunitários”, “vias coletoras”, “vias vicinais”, “vazios urbanos” e “distância à zona rural”. Entre 2005 e 2015, notou-se que dadas áreas urbanizadas surgiam em porções territoriais marcadas por cicatrizes de queimadas anteriormente à urbanização. Por ser uma prática local costumeira na etapa de limpeza de terrenos, avaliou-se que a ocorrência dessas cicatrizes pudesse contribuir com a parametrização do modelo. O mesmo raciocínio foi transposto para a criação da variável “distância a áreas terraplanadas”, haja visto que foram observados casos frequentes de terrenos que, no ano inicial, estavam em obra de terraplanagem e, no ano final, convertidos para área urbanizada – desfecho nem sempre verificado, porém, optou-se por deixar o *software* atribuir um peso para essa variável.

A variável “distância à zona rural” sofreu poucas modificações entre cada intervalo, uma vez que nessa zona de Teresina, a forma do perímetro urbano apenas era sutilmente alterada. Quanto à variável “vias vicinais”, constatou-se que anteriormente a uma nova mancha de área urbanizada, linhas de desejos eram formadas, entre as quais, no ano final, tinha-se a conversão em área urbanizada. Finalmente, a variável “vazios urbanos”, empregada apenas no último período simulado, correspondeu a terrenos aparentemente integrantes de parcelamentos de solos executados, mas que ainda não possuíam alguma função urbana atribuída.

4.3 Modelagem da expansão urbana

Nesta pesquisa, a modelagem foi realizada para três períodos distintos: 2005 a 2010, 2010 a 2015 e 2015 a 2020. Em termos procedimentais, o primeiro passo da modelagem consiste no cálculo das matrizes de transição global e anual. Essas matrizes indicam a taxa de mudança de um estado para outro, neste caso, da classe “áreas livres” para a classe “áreas urbanizadas”. A matriz global é calculada para todo o período (por exemplo, de 2005 a 2010), enquanto que a matriz anual é derivada ano a ano a partir da matriz global por meio de uma cadeia de Markov. A matriz global precisa ser ergódica, ou seja, deve possuir autovalores e autovetores reais, caso contrário, não é possível derivá-la para obter as taxas anuais de transição. Bell e Hinojosa (1977) apresentam o processo de derivação por cadeia markoviana, que em síntese, trata-se de uma multiplicação de matrizes.

O segundo passo é destinado à discretização das variáveis contínuas em intervalos, visto que o cálculo dos mapas de probabilidade de transição é realizado no Dinamica EGO por meio do método de pesos de evidência, adaptado de Agterberg e Bonham-Carter (1990), que somente opera com variáveis categóricas. Na categorização, o cálculo dos intervalos considera a estrutura do dado para que esta seja preservada. Os pontos de quebra são determinados por um algoritmo de generalização de linha, que na interface do *software* pode ser calibrado a partir de ajustes nos parâmetros: intervalo de distância mínima ao longo de x ; intervalo de distância máxima ao longo de x e ângulo de tolerância. Ou seja, nessa etapa são definidos os pontos de inflexão para, em seguida, serem criados os intervalos categóricos de uma dada variável contínua. Após criados, um peso é atribuído a cada intervalo, que assume valor nulo quando não exerce qualquer influência na ocorrência do fenômeno, valor positivo quando influi e negativo quando inibi. Os pesos de evidência são utilizados para geração dos mapas de probabilidade de transição.

Para que não haja enviesamento no modelo, os mapas preditivos devem ser espacialmente independentes, esta suposição pode ser avaliada pela análise par a par entre as variáveis explicativas por meio de testes de associação entre variáveis categóricas – o quarto passo executado. O Dinamica EGO tem implementado o cálculo dos coeficientes de *Cramers* e de

Contingência, baseados na distribuição qui-quadrado, e o do índice de Incerteza da Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty – JIU*), derivado da medida da Entropia Conjunta. Essa avaliação possibilita remover uma das variáveis correlacionadas ou combiná-la com outra para gerar uma nova variável a ser utilizada na calibração do modelo. Neste estudo, utilizou-se o JIU para testar a associação espacial entre os mapas. Este índice varia entre 0 e 1, onde 0 indica mapas completamente independentes e 1 sinaliza mapas completamente dependentes. Adotou-se o limiar de 0,5 para eliminar variáveis correlacionadas, valor definido em Bonham-Carter (1994), que também apresenta as equações de cálculo dos coeficientes e índice mencionados.

Segundo Soares-Filho (2002), a Dinâmica EGO considera que o fenômeno modelado possa surgir tanto pela expansão de manchas existentes quanto pela formação de novas. Sendo assim, esses parâmetros, que recebem no *software* as denominações de *expander* e *patcher*, respectivamente, devem ser informados na forma de área média (expressa em hectare), juntamente com a variância. Para alocar corretamente as células que sofreram mudança de estado, é necessário calcular quanto que dessa transição deu-se por *expander* e *patcher*. Nesse estudo, a expansão urbana ocorreu apenas por aumento tangencial das áreas urbanas existentes, ou seja, por *expander*.

No quinto passo, procedeu-se com a identificação, no QGIS 3.22.11, das porções territoriais que sofreram mudança de estado (área livre para urbanizada) e, em seguida, efetuou-se o cálculo da área e da variância. Primeiro, por meio da calculadora *raster*, procedeu-se com uma subtração matricial entre o mapa final e o mapa inicial. Como resultado, obteve-se um mapa diferença binário, reclassificado para exibir em uma classe as áreas de permanência e em outra as áreas urbanizadas acrescidas em relação ao ano inicial. Logo após, utilizou-se a ferramenta do GRASS “*r. report*”, que gera relatórios de estatísticas de área para dados matriciais. Por fim, a tabela foi importada em um *software* editor de planilhas, no qual as métricas média e variância foram calculadas. Outro parâmetro de calibração é o índice de isometria (*patch isometry*) que define o nível de agregação de uma mancha. Conforme Argemiro *et al.*, (2020), o intervalo $0 < \text{índice de isometria} < 1$ força a desagregação, valores maiores que 1 forçam a agregação, e valor igual a 1 ignora a atuação do parâmetro. A depender do período da modelagem desenvolvida nesta pesquisa, diferentes índices de isometria foram adotados, uma vez que a forma da expansão urbana variou entre os intervalos de tempo.

O último passo da modelagem é dedicado à elaboração de testes estatísticos para validação dos resultados obtidos, de forma a se avaliar a imprecisão de localidade. Isto porque no campo da modelagem dinâmica espacial, diferentemente do campo do processamento digital de imagens, a validação do modelo não ocorre *pixel a pixel*, mas por janelas contextuais que comparam os resultados modelados considerando a vizinhança. No Dinâmica EGO, a validação dá-se pelo Índice de Similaridade *Fuzzy* (ISF), desenvolvido por Hagen (2003), que avalia a similaridade entre dois mapas a partir de janelas contextuais multirresolução em um intervalo de 0 (não similar) a 1 (completamente similar). A penalização da semelhança entre o real e o simulado ocorre por decaimento constante ou exponencial. No primeiro, o valor 1 é atribuído quando a célula esperada na posição central ocorre em qualquer célula da vizinhança limitada pela janela; ao passo que no segundo, há uma diminuição ou aumento do índice de similaridade em razão da distância em que a célula esperada no centro da janela esteja dessa posição central. Independentemente do decaimento, caso a célula não se encontre na vizinhança, tampouco no centro da janela, é atribuído o valor 0. Leite Filho *et al.*, (2020) apresentam como o ISF encontra-se implementado no Dinâmica EGO.

5. Resultados e discussão

Ao longo dos 15 anos considerados na pesquisa, a área de estudo apresentou uma taxa de crescimento de área urbanizada equivalente a 77,75%, isto é, aumentou de cerca de 673 ha para 1.197 ha. A maior taxa de crescimento relativo foi verificada entre os anos de 2005 e 2010, período no qual houve a construção do Conjunto Habitacional Jacinta Andrade (iniciado em 2009), que, como pontua Bruna *et al.* (2013), é uma das maiores obras do Programa de Aceleração do

Crescimento – PAC do Governo Federal Brasileiro. Entre 2010 e 2015, a área urbanizada continuou a aumentar, porém com uma taxa de crescimento relativo menor, de 16,33%. Ao passo que entre 2015 e 2020, houve maior crescimento absoluto de área urbanizada, de aproximadas 209 ha, o que resultou em um crescimento relativo de 21,19%. A Figura 6 apresenta um gráfico de métricas do avanço da urbanização na área estudada.

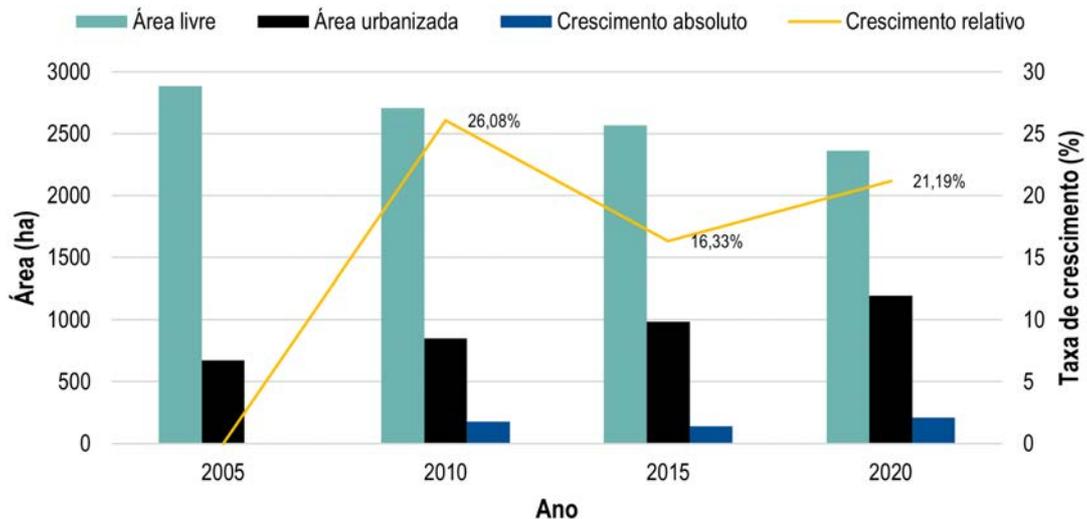


Figura 6. Expansão urbana, em números, na área de estudo (fonte: elaborada pelos autores).

Ao comparar tais métricas com as da cidade, constata-se que essa porção territorial da Zona Norte de Teresina manteve uma dinâmica de urbanização acima da média. De acordo com dados do MapBiomas (2021), entre 2005 e 2020, a área urbanizada de Teresina aumentou 31,12%, percentual bem abaixo do registrado para a área de estudo no mesmo período. Ainda em comparação com os dados do MapBiomas (2021), houve discrepância entre os intervalos de 2005-2010, 2010-2015 e 2015-2020, para os quais os crescimentos relativos da área urbanizada de Teresina foram, respectivamente, 8,29%; 14,53% e 5,70%. Nota-se que as tendências de crescimento são diferentes da média da cidade, sobretudo, nos anos mais recentes, haja visto que em 2020, enquanto Teresina apresentou o menor crescimento relativo de toda a série histórica, a área de estudo demonstrou seguir com efervescência o processo de urbanização.

5.1 Simulação 2005 a 2010

Neste período, os principais avanços da urbanização ocorreram à orientação leste, referentes ao Conjunto Habitacional Jacinta Andrade e ao Residencial Leonel Brizola, ambas obras realizadas pelo Poder Público (BRUNA, *et al.*, 2013; TERESINA, 2019). Segundo o modelo, as variáveis estáticas que apresentaram maior contribuição à ocorrência da urbanização nesses locais foram: declividade (peso de 0,77 atribuído ao intervalo de 2,5° a 5°), distância a equipamentos comunitários (peso de até 1,44 para as distâncias entre 62,5 m e 357,5 m), distância a vias coletoras (pesos de 1,80; 1,36; 1,10; 1,34 e 1,09, respectivamente para os intervalos de 0 a 2,5m; 2,5 a 12,5m; 12,5 a 15m; 15 a 137,5m e 137,5 a 237,5m), distância a vias vicinais (peso 1,54 para o intervalo de 0 a 2,5m) e distância a áreas queimadas (peso 3,07 para o intervalo de 0 a 2,5m).

Observa-se que a simulação mostrada na Figura 7 conseguiu prever o surgimento da área urbanizada correspondente ao Conjunto Habitacional Jacinta Andrade, principal transformação espacial do período, no local onde de fato aconteceu, em uma expansão do tecido urbano à orientação nordeste. Cabe destacar a similaridade entre a forma simulada e a real, o que indica uma calibração satisfatória do parâmetro *expand* e do índice de isometria. Outra transição de área livre para urbanizada captada na simulação, refere-se a um conjunto habitacional no limite sudoeste do bairro Santa Maria, que o modelo acertou o local, mas errou a forma da mancha.

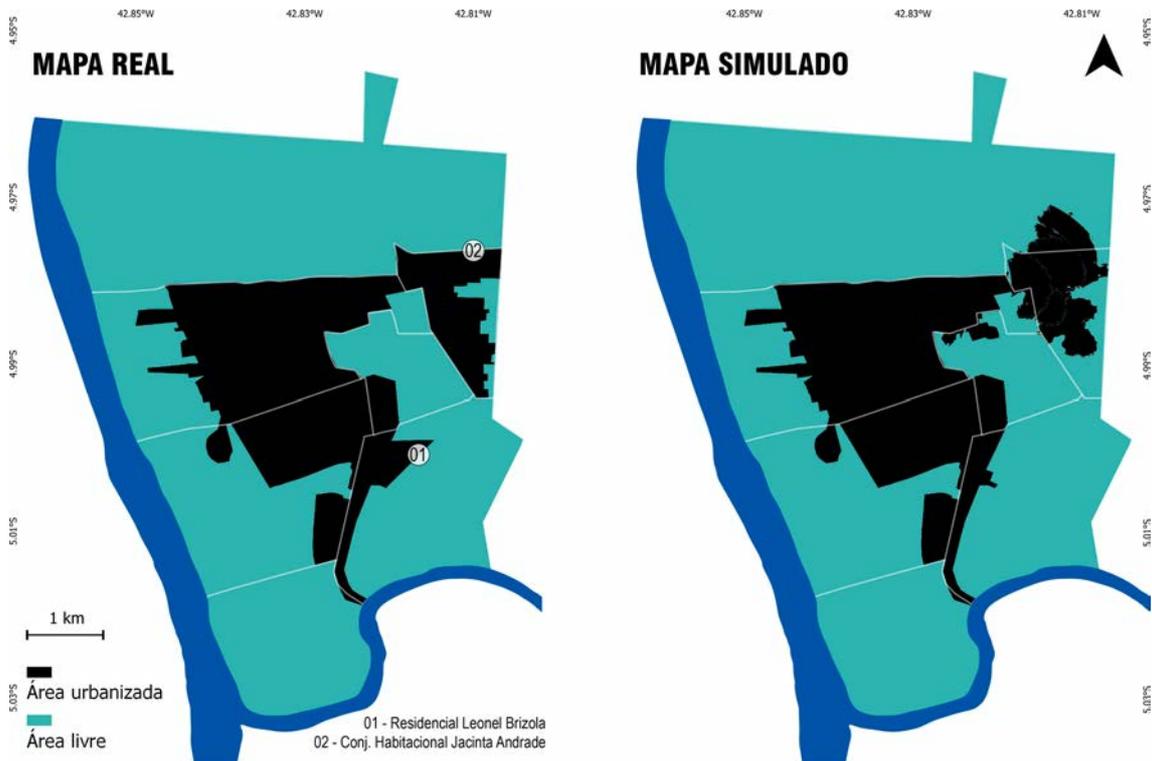


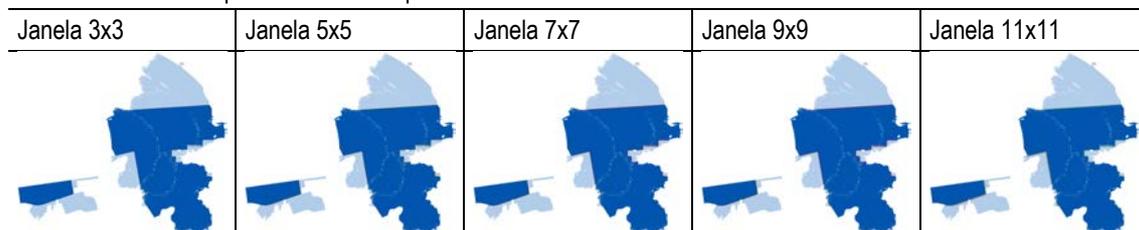
Figura 7. Mapas real e simulado do período 2005 a 2010 (fonte: elaborada pelos autores).

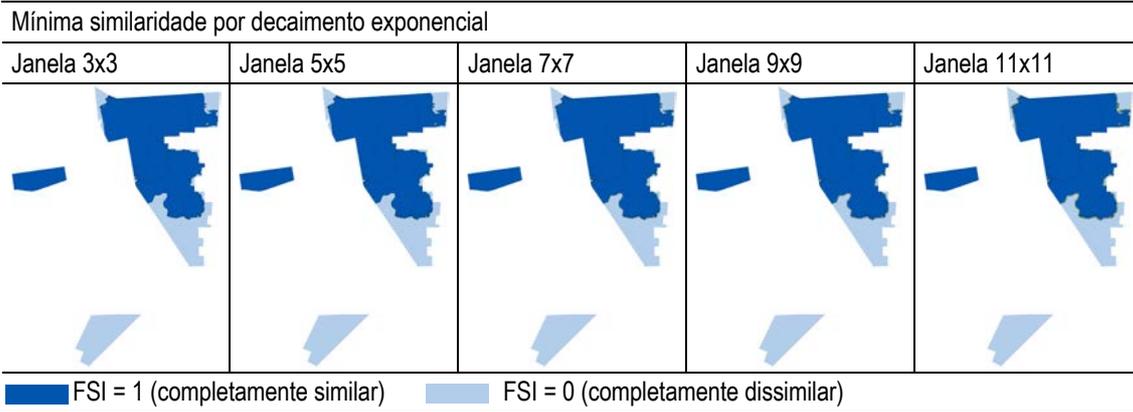
Apesar de que tenham sido realizados 22 testes para esse período, nenhum foi capaz de prever o surgimento do Residencial Leonel Brizola, embora ao seu local tenha sido atribuída uma alta probabilidade de transição. Esse fato não invalida a calibração do modelo, pois as alterações espaciais substanciais foram identificadas, conforme pode ser constado na validação apresentada no Quadro 2. Na máxima similaridade, evidencia-se as manchas modeladas contrapostas com as manchas reais, enquanto que na mínima similaridade, o Dinamica EGO gera mapas contrapondo as manchas que representam as transições ocorridas com as manchas geradas pelo modelo para essas transições. Nesta simulação, por exemplo, ao analisarmos os mapas de máxima similaridade, vê-se que o modelo extrapolou ao norte o limite do Conjunto Habitacional Jacinta Andrade, ao passo que nos mapas de mínima similaridade, constata-se que a porção sul do referido conjunto habitacional não aparece na simulação, assim como o Residencial Leonel Brizola, completamente não simulado.

Quadro 2. Validação da simulação de 2005 a 2010 (fonte: elaborado pelos autores).

Janela	FSI – Decaimento constante		FSI – Decaimento exponencial	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
3x3	0,692	0,683	0,687	0,681
5x5	0,699	0,688	0,691	0,684
7x7	0,705	0,693	0,692	0,685
9x9	0,710	0,698	0,693	0,686
11x11	0,715	0,703	0,694	0,687

Máxima similaridade por decaimento exponencial





Obs. Em função da baixa ocorrência, a visualização dos valores intermediários do FSI não fica evidente nessa escala, mas estes encontram-se em pixels limítrofes entre as manchas de cores azul escuro e azul claro.

5.2 Simulação 2010 a 2015

Entre os anos de 2010 e 2015, a expansão urbana ocorreu em diversas frentes e foi marcada tanto por novos parcelamentos do solo regulares, quanto por ocupações espontâneas. Destaca-se o Residencial Edgar Gayoso, no bairro Chapadinha, que em concordância com Façanha, Silva e Dias (2020), foi entregue em 2015, constituído por 459 unidades habitacionais. Outro conjunto habitacional de iniciativa pública inaugurado em 2015 foi o Residencial Paulo de Tarso (ou Mirante Santa Maria da Codipi), localizado no bairro Santa Maria. Ainda nesse período, no bairro Monte verde, houve outro parcelamento do solo, de iniciativa privada, o loteamento Jardim Monte Verde. Além desses empreendimentos, construções de iniciativas individuais contribuíram com a expansão urbana, como é o caso de um conjunto de casas nas proximidades da margem leste do rio Parnaíba e da inauguração de um supermercado. Por fim, todas as demais expansões deram-se por ocupações espontâneas, sendo estas: a Vila Leonel Brizola e o Residencial Dilma Rousseff.

Segundo o modelo, as variáveis estáticas que apresentaram maior contribuição à ocorrência da urbanização nesses locais foram: distância a áreas terraplanadas (peso de 4,60 no intervalo de 0 a 2,5m), distância a vias vicinais (peso de 2,59 para o intervalo de 0 a 2,5m) e distância a áreas queimadas (peso 1,45 para o intervalo de 0 a 2,5m). A Figura 8 mostra o resultado da simulação ao lado do mapa real, obtido após 23 testes.

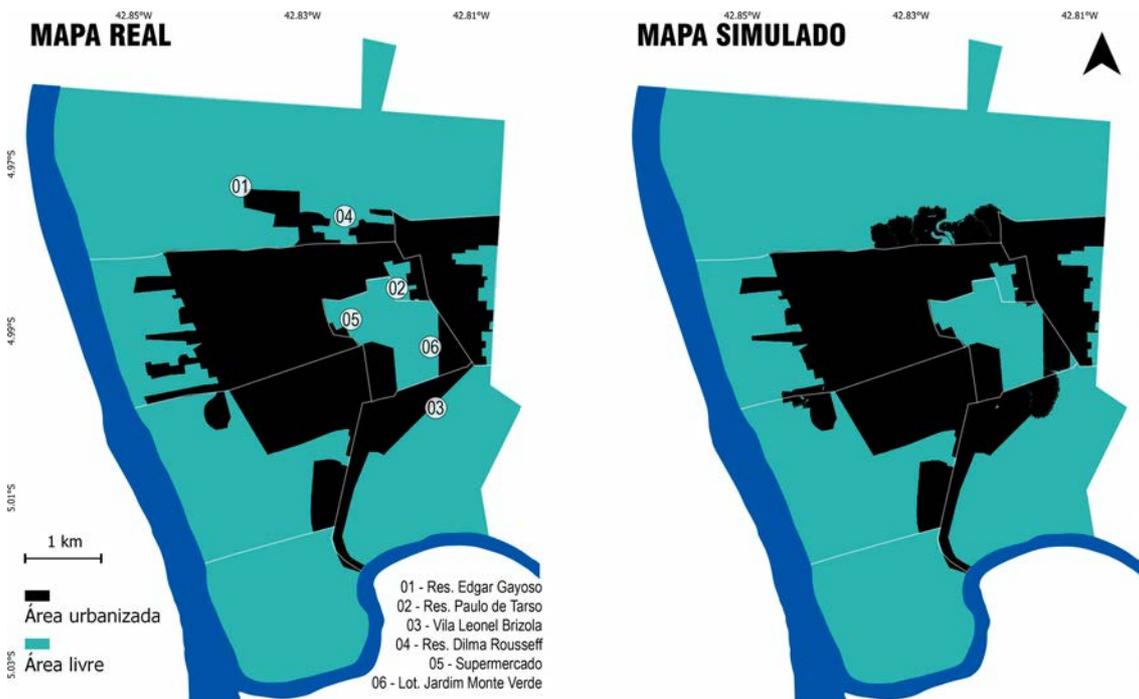


Figura 8. Mapas real e simulado do período 2010 a 2015 (fonte: elaborada pelos autores).

Nessa simulação, nota-se que quase todas as mudanças de estado foram captadas pelo modelo. A mancha que representa o Residencial Dilma Rousseff apresentou forma diferente, mas o local e a dimensão são semelhantes aos vistos no mapa real. O encontro do tecido urbano dos bairros Jacinta Andrade e Alegre foi devidamente previsto, correspondendo ao loteamento Jardim Monte Verde e à Vila Leonel Brizola. O Residencial Edgar Gayoso não apareceu satisfatoriamente representado, assim como as expansões no sentido da margem direita do rio Parnaíba. Duas porções territoriais simuladas devem ser destacadas em razão da alta similaridade, conforme validação apresentada no Quadro 3, sendo estas: a área de construção do supermercado e o Residencial Paulo de Tarso, que apenas tiveram sutis variações formais entre o real e o simulado.

Quadro 3. Validação da simulação de 2010 a 2015 (fonte: elaborado pelos autores).

Janela	FSI – Decaimento constante		FSI – Decaimento exponencial	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
3x3	0,686	0,685	0,682	0,681
5x5	0,700	0,691	0,698	0,684
7x7	0,713	0,697	0,692	0,685
9x9	0,724	0,701	0,695	0,686
11x11	0,734	0,705	0,696	0,687

Máxima similaridade por decaimento exponencial				
Janela 3x3	Janela 5x5	Janela 7x7	Janela 9x9	Janela 11x11

Mínima similaridade por decaimento exponencial				
Janela 3x3	Janela 5x5	Janela 7x7	Janela 9x9	Janela 11x11

■ FSI = 1 (completamente similar) ■ FSI = 0 (completamente dissimilar)

Obs. Em função da baixa ocorrência, a visualização dos valores intermediários do FSI não fica evidente nessa escala, mas estes encontram-se em pixels limítrofes entre as manchas de cores azul escuro e azul claro.

5.3 Simulação 2015 a 2020

A segunda metade da década passada registrou o maior crescimento absoluto de área urbanizada de toda a série histórica, e esse incremento veio, predominantemente, de ocupações espontâneas. Nesse período, destacam-se as ocupações Residencial Dandara dos Cocais, iniciada em 2016 como consta em Piauí (2017); a expansão do Residencial Dilma Rousseff e a ocupação Lindalma Soares, iniciada em 2020, conforme Martins *et al.*, (2020). Quanto aos parcelamentos do solo regulares, houve a construção do Residencial Parque Brasil, que de acordo com Teresina (2020), seria destinado a parte das famílias atingidas pelo reassentamento involuntário decorrente da execução do Programa de Requalificação Urbana e Ambiental Lagoas do Norte; o Residencial Bella Codipi, um condomínio de lotes aprovado em 2019, como previsto em Teresina (2019); e a execução da primeira etapa do loteamento Conviver Teresina.

Segundo o modelo, as variáveis estáticas que apresentaram maior contribuição à ocorrência da urbanização nesses locais foram: distância a vias arteriais (peso de 0,65 atribuído ao intervalo de 0 a 2,5m), distância a vias vicinais (peso de 2,17 para o intervalo de 0 a 2,5m) e distância a vazios urbanos (pesos de 1,62; 2,24 e 1,35, respectivamente, para os intervalos de 5 a 7,5m; 7,5 a 17,5 m e 17,5 a 262,5m). Esta última variável contribuiu para a calibração porque, transcorridas quase

quatro décadas de ocupação, a área de estudo apresenta-se em avançado estágio de consolidação urbana, no qual a disponibilidade de área para edificar limita-se a cada ano. Dessa forma, os terrenos mais aptos a receberem construções estão contidos na área urbanizada, formando *clusters* de vazios urbanos. Por essa razão, o modelo identificou que quanto mais próxima a estes *clusters*, maior a probabilidade de áreas ainda não contidas na grande mancha urbanizada transicionarem para área urbanizada. A Figura 9 mostra o resultado da simulação ao lado do mapa real, sendo este, o melhor entre os 25 testes realizados.

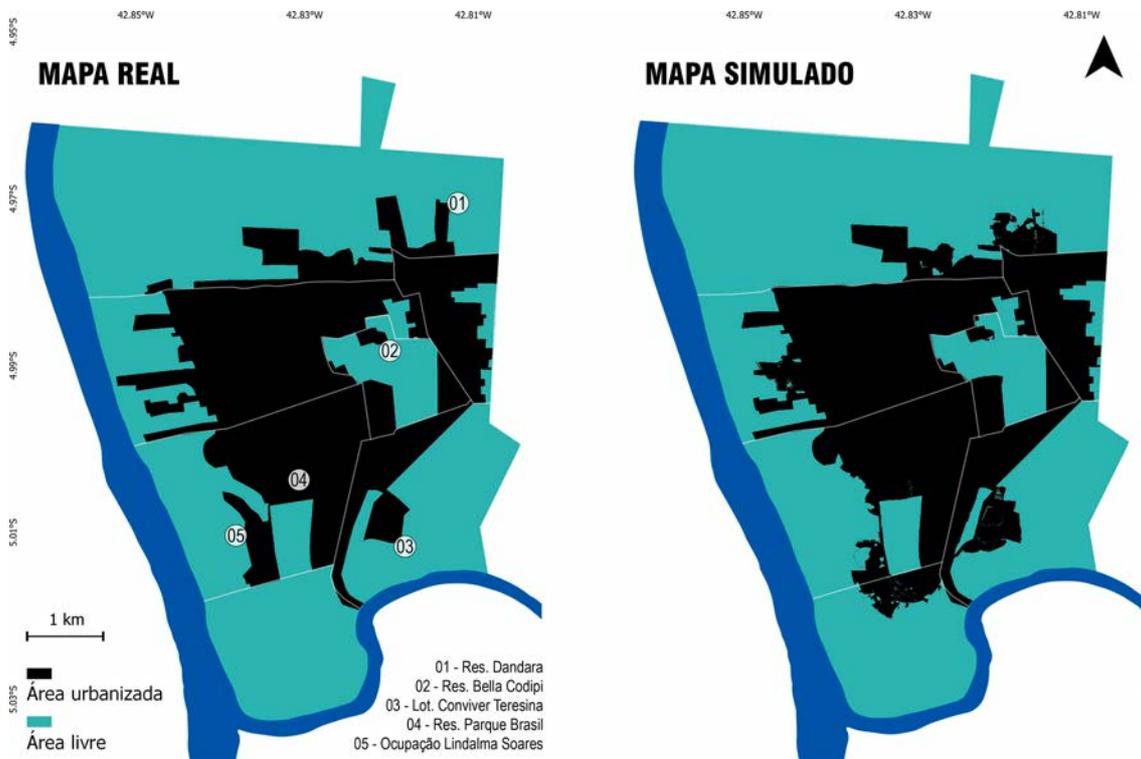
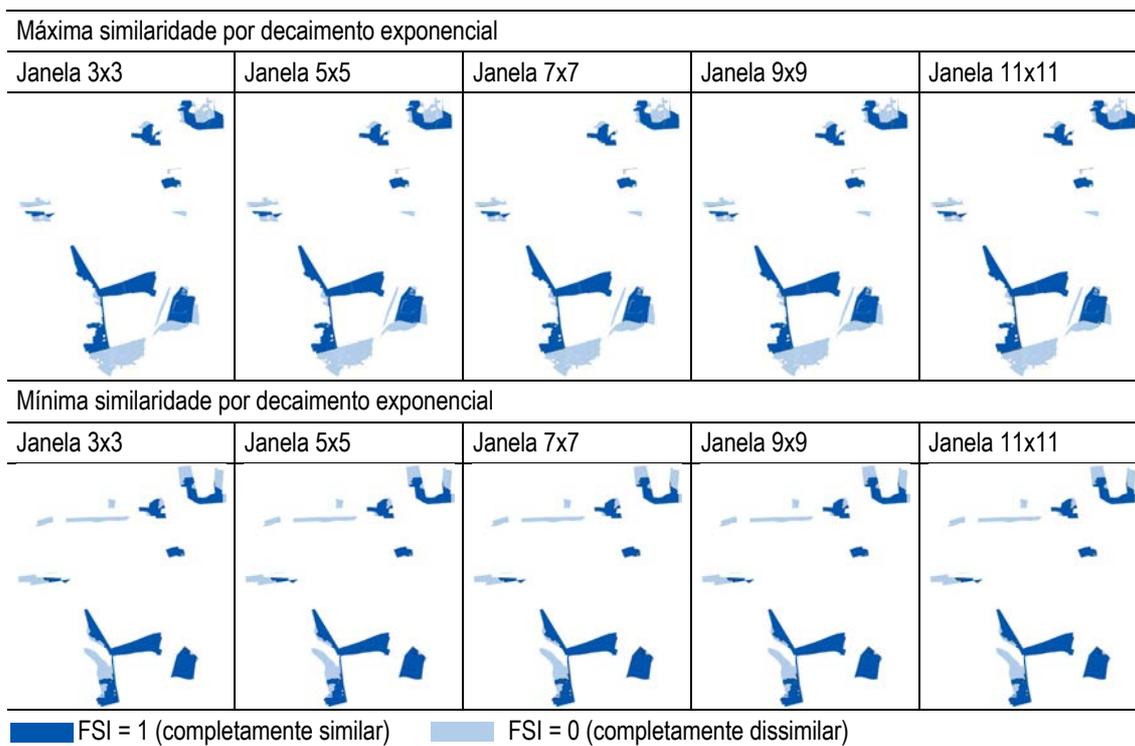


Figura 9. Mapas real e simulado do período 2015 a 2020 (fonte: elaborada pelos autores).

Nessa simulação, como evidencia a Figura 9, todas as principais transformações espaciais ocorridas na área de estudo foram detectadas. O Residencial Parque Brasil foi completamente previsto, assim como o Residencial Bella Codipi, ou seja, a simulação foi assertiva tanto no local quanto na forma das manchas. O loteamento Conviver Teresina (Etapa 1) foi detectado, assim como o Residencial Dandara dos Cocais, porém, com formas visualmente não semelhantes. O resultado menos satisfatório ocorreu na modelagem da ocupação Lindalma Soares. O modelo foi capaz de prever que haveria uma expansão da área urbanizada ao longo da via arterial, mas errou na concentração da mancha. Isto pode ser explicado devido ao fato de que a ocupação Lindalma Soares está a poucos metros de lagoas e de rios, cujos pesos empregados no cálculo da probabilidade de transição foram negativos, atribuição coerente, pois as forças de urbanização atuantes na área de estudo, historicamente, evitaram direcionar as ocupações a áreas naturalmente sujeitas a inundações. A validação da simulação desse período é apresentada no Quadro 4.

Quadro 4. Validação da simulação de 2015 a 2020 (fonte: elaborado pelos autores).

Janela	FSI – Decaimento constante		FSI – Decaimento exponencial	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
3x3	0,630	0,598	0,624	0,596
5x5	0,643	0,605	0,630	0,600
7x7	0,654	0,613	0,633	0,602
9x9	0,663	0,620	0,635	0,603
11x11	0,671	0,626	0,636	0,604



Obs. Em função da baixa ocorrência, a visualização dos valores intermediários do FSI não fica evidente nessa escala, mas estes encontram-se em pixels limítrofes entre as manchas de cores azul escuro e azul claro.

6. Conclusões

A área estudada, com base nos dados levantados e produzidos acerca do processo de urbanização, apresenta métricas de produção do espaço construído superiores às médias observadas para a cidade. Esta condição, associada ao fato de que se trata de uma porção do território de Teresina sujeita a eventos climáticos naturais, como as enchentes, e extremos, como as inundações, evidencia a necessidade de adoção, por parte do Poder Público municipal, de tecnologias que auxiliem no planejamento e na gestão territorial, tais como a modelagem dinâmica espacial aplicada neste estudo, que se mostrou satisfatória nas simulações da expansão urbana realizadas em cenários pretéritos.

O modelo parametrizado e calibrado nesta pesquisa foi capaz de simular as principais mudanças no espaço construído que, gradativamente, promoveram a expansão urbana. Como contribuições deste artigo, destacam-se: I) a utilização de um número elevado de variáveis explicativas espacialmente independentes, que podem ser testadas na parametrização de outros estudos de modelagem da expansão urbana; II) a divulgação de fontes de dados de acesso gratuito passíveis de utilização no âmbito do planejamento urbano local; III) a aplicação inédita do Dinamica EGO para um estudo de expansão urbana realizado em Teresina, Piauí e IV) a obtenção de métricas que facilitam à compressão do fenômeno da expansão urbana na área adotada como objeto de pesquisa.

O artigo limitou-se à modelagem em períodos passados, o que restringe os resultados apresentados apenas à compreensão dos condicionantes do fenômeno ocorrido, portanto, sem a criação de cenários futuros. Por essa razão, conclui-se que a pesquisa detém potencial de continuidade, uma vez que foram produzidas informações suficientes para a geração de simulações preditivas, nas quais diferentes cenários podem ser prospectados. Nesse horizonte de pesquisa, será possível explorar a principal aplicabilidade da modelagem, que é a antecipação dos caminhos diversos a serem trilhados pelo fenômeno modelado. Essa característica a projeta como uma ferramenta essencial, porém pouco empregada, na elaboração das políticas de ordenamento territorial, que são políticas preventivas e, portanto, essenciais em um mundo cada vez mais urbano e exposto a eventos climáticos extremos decorrentes, sobretudo, da urbanização.

7. Referências

- AGTERBERG, Frits; BONHAM-CARTER, Graeme. Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the prediction of discrete events. **Proceedings of the 22nd APCOM symposium**. Berlin, Vol. 2, pp. 381-395.
- ALMEIDA, Cláudia. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento**: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.
- ALMEIDA, Cláudia; GLERIANI, José; CASTEJON, Emiliano; SOARES-FILHO, Britaldo. "Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics". **International Journal of Geographical Information Science**, Vol. 22, N. 9, pp. 943-963.
- ALMEIDA, Claudia; BATTY, Michael; MONTEIRO, Antonio; CÂMARA, Gilberto; SOARES-FILHO, Britaldo; CERQUEIRA, Gustavo; PENNACHIN, Cássio. "Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation". **Computers, environment and urban systems**. Elsevier Ltd, Vol. 27, N. 5, pp. 481-509.
- BAIG, Mohammed; MUSTAFA, Muhammad; BAIG, Imran; TAKAIJUDIN, Husna; ZESHAN, Muhammad. "Assessment of Land Use Land Cover Changes and Future Predictions Using CA-ANN Simulation for Selangor, Malaysia". **Water**, Vol. 14, N. 3, pp.402.
- BEDEWY, Baydaa; ALWAN, Kareem; FLEEHE, Moheeb. "Dynamic urban modelling for urban growth varieties and transport: building a complex dynamic model". **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Vol. 754, N. 1, pp. 012007.
- BELL, E. J.; HINOJOSA, R. C. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. **Socio-Economic Planning Sciences**, Vol. 11, N. 1, pp. 13-17.
- BONHAM-CARTER, Graeme. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Canada: Elsevier, 1994.
- BRANCO, Teule; ALMEIDA, Cláudia; FRANCISCO, Cristiane. "Modelagem Dinâmica Espacial das Mudanças de Uso e Cobertura da Terra na Região Hidrográfica da Baía da Ilha Grande-RJ: um Enfoque Sobre Comunidades Tradicionais e Unidades de Conservação". **Revista Brasileira de Cartografia**, Vol. 74, N. 1, pp. 137–158.
- BRIASSOULIS, Helen. **Analysis of land use change**: theoretical and modeling approaches. Morgantown: WVU Research Repository, 2020.
- BRIASSOULIS, Helen. **Analysis of land use change**: theoretical and modeling approaches. Tese (Doutorado em Geografia) – University of the Aegean, Lesvos, 2000.
- BRUNA, Gilda; PISANI, Maria; MELO, Constance; FIGUEIREDO, Erika; GIL, Erica. Conjunto habitacional Jacinta Andrade na cidade de Teresina, Estado do Piauí, Brasil. In: I Congresso Internacional de Vivienda Colectiva Sostenible, Barcelona, 25, 26 y 27 de febrero de 2014. **Máster Laboratorio de la Vivienda Sostenible del Siglo XXI**, 2014. p. 464-469.
- CAMPOS, Pedro; ALMEIDA, Cláudia; QUEIROZ, Alfredo. "Spatial Dynamic Models for Assessing the Impact of Public Policies: The Case of Unified Educational Centers in the Periphery of São Paulo City". **Land**, Vol. 11, N. 6, pp. 922.
- COMBER, Alexis. "The separation of land cover from land use using data primitives". **Journal of Land Use Science**, Vol. 3, N. 4, pp. 215-229.
- CSR/UFMG. Dinamica EGO 6. Versão 6.1. [Belo Horizonte]: CSR/UFMG, 2022.

FAÇANHA, Antonio; SILVA, Cleonice; DIAS, Orleando. Agentes, processos e as formas espaciais recentes na expansão urbana da zona norte de Teresina. In: [OLIVEIRA, P. S. F. de]. *Teresina e as cidades na região*. Goiânia: C&A Alfa Comunicação, 2020. pp. 147-168.

FAÇANHA, Antonio; SILVA, Cleonice; DIAS, Orleando. **Teresina e as cidades na região**. Goiânia: C&A Alfa Comunicação, 2020.

FREITAS, Eliana; ARAKI, Hideo. "Simulation of urban growth: a case study for Curitiba city, Brazil". **Bulletin of Geodetic Sciences**, Vol. 27, pp. 1-15.

GIRMA, Rediet; FÜRST, Christine; MOGES, Awdenegest. "Land use land cover change modeling by integrating artificial neural network with cellular Automata-Markov chain model in Gidabo river basin, main Ethiopian rift". **Environmental Challenges**, Vol. 6, pp. 100419.

HAGEN, Alex. "Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps". **International Journal of Geographical Information Science**, Vol. 17, N. 3, pp. 235-249.

HUTCHINSON, Bruce, BATTY, Michael (eds.). The time scale of urban change. In: [WEGENER, Michael; GNAD, Friedrich; VANNAHME, Michael]. *Advances in Urban Systems Modelling*. Amsterdam: North Holland, 145-197.

IBGE. **Pesquisa nacional por amostra de domicílios**: PNAD. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

LEITE FILHO, Argemiro; SOARES FILHO, Britaldo; DAVIS, Juliana. **Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO**. Belo Horizonte: Centro de Sensoriamento Remoto, 2020.

LIN, Jinyao; HE, Peiting; YANG, Liu; HE, Xiaoyu; LU, Siyan; LIU, Danyuan. "Predicting future urban waterlogging-prone areas by coupling the maximum entropy and FLUS model". **Sustainable Cities and Society**, Vol. 80, pp. 103812.

LIN, Jinyao; LI, Xia; WEN, Youyue; HE, Peiting. "Modeling urban land-use changes using a landscape-driven patch-based cellular automaton (LP-CA)". **Cities**, Vol. 132, pp. 103906.

LIU, Xiaoping; LIANG, Xun; LI, Xia; XU, Xiacong; OU, Jinpei; CHEN, Yimin; LI, Shaoying; WANG, Shaojian; PEI, Fengsong. "A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects". **Landscape and Urban Planning**, Vol. 168, pp. 94–116.

LOPES, Wilza.; LIMA, Amanda; MATOS, Karenina; LEITE, Nícia. "A influência de políticas públicas habitacionais na expansão urbana: estudo do Residencial Jacinta Andrade, Teresina, Piauí". **Revista Jatobá**. Goiânia, Vol. 2, 2020, pp. 1-34.

LÚCIA, R. ADH entregou contratos do Residencial Paulo de Tarso. **ADH PI**, Teresina, p. 1, 02 jun. 2015. Disponível em: <http://www.adh.pi.gov.br/noticia.php?id=70>. Acesso em: 08 dez. 2022.

MapBiomias. 2022. Collection of Brazilian Land Cover & Use Map Series (Collection of Brazilian Land Cover & Use Map Series (<http://mapbiomas.org/>)).

MARTINS, Leonardo; LIMA JÚNIOR, João; SOUSA, Keicyane; SOARES JÚNIOR, George; MOURA JÚNIOR, Francisco; ROCHA, Paulo; BATISTA, Valeska. Ocupações urbanas em áreas de risco: o caso da Vila Lindalma Soares em Teresina - PI. In: II ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 2, 2020. **Anais [...]**. Tema: Análises de riscos hidrológicos sociais, econômicos e/ou ambientais, p. 1-4. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=7334>. Acesso em: 8 dez. 2022

OKWUASHI, Onuwa; NDEHEDEHE, Christopher. "Integrating machine learning with Markov chain and cellular automata models for modelling urban land use change". **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 21, pp. 100461

PIAUI. Ministério Público do Estado do Piauí. Termo de compromisso de ajustamento de conduta, nº 001/2007. [Celebrar o presente TERMO DE AJUSTAMENTO DE CONDUTA, com fundamento no art. 50, § 6º, da Lei nº 7.347/85; art. 37, inciso I, da Lei Complementar nº 12/93-Lei Orgânica

do Ministério Público do Piauí; art. 6º, alíneas "a" e "d", e art. 70, inciso I, da Lei Complementar nº 75/93-Lei Orgânica do Minis Público da União]. Procuradoria Geral de Justiça: Teresina, 31 ago. 2017.

REIS, Edna; REIS, Ilka. Análise descritiva de dados. Relatório Técnico do Departamento de Estatística da UFMG, Vol. 1, 2002.

SANTOS, Milton. **A urbanização brasileira**. São Paulo: Hucitec, 1993.

SOARES-FILHO, Britaldo Silveira; CERQUEIRA, Gustavo Coutinho; PENNACHIN, Cássio Lopes. DINAMICA—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological modelling**. Vol. 154, N. 3, pp. 217-235.

SOARES-FILHO, Britaldo; RODRIGUES, Hermann; COSTA, William. **Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO**. Belo Horizonte: Britaldo Silveira Soares_Filho, 2009.

TERESINA. **Decreto nº 18.297, de 28 de janeiro de 2019**. Aprova o condomínio de lotes urbanos denominado RESIDENCIAL BELLA CODIPI, e dá outras providências. Teresina: Diário Oficial do Município, [2019]. Disponível em: <https://dom.pmt.pi.gov.br/admin/upload/DOM2458-06022019-ASSINADO.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2022.

TERESINA. **Decreto nº 20.178, de 29 de outubro de 2020**. Declara de utilidade pública, para fins de desapropriação do imóvel que especifica e dá outras providências. Teresina: Diário Oficial do Município, [2020]. Disponível em: <https://dom.pmt.pi.gov.br/admin/upload/DOM2896-13112020-ASSINADO.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2022.

TERESINA. **Lei nº 4.423, de 16 de julho de 2013**. Fixa as denominações e delimita os perímetros dos bairros de Teresina e dá outras providências. Teresina: Câmara Municipal, [2013]. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/pi/t/teresina/lei-ordinaria/2013/443/4423/lei-ordinaria-n-4423-2013-fixa-as-denominacoes-e-delimita-os-perimetros-dos-bairros-de-teresina-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 10 dez. 2022.

TERESINA. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina – Manual de Drenagem**. Teresina: Prefeitura Municipal de Teresina, 2011.

TERESINA. **Plano Diretor de Transporte e Mobilidade Urbana de Teresina (PMTU)**. Teresina: Prefeitura Municipal de Teresina, 2008.

VERBURG, Peter; VAN DE STEEG, Jeannette; VELDKAMP, Tom; WILLEMEN, Louise. "From land cover change to land function dynamics: A major challenge to improve land characterization". **Journal of environmental management**, Vol. 90, N. 3, pp. 1327-1335.

WANG, Jia; ZHANG, Junping; XIONG, Nina; LIANG, Boyi; WANG, Zong; CRESSEY, Elizabeth. "Spatial and Temporal Variation, Simulation and Prediction of Land Use in Ecological Conservation Area of Western Beijing". **Remote Sensing**, Vol. 14, N. 6, pp. 1452.

WEGENER, Michael; GNAD, Friedrich; VANNAHME, Michael. The time scale of urban change. In: [HUTCHINSON, Bruce; BATTY, Michael (eds.)]. *Advances in Urban Systems Modelling*. Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 1986, pp. 175–197.

WOLFRAM, Stephen. "Statistical mechanics of cellular automata". **Reviews of modern physics**, Vol. 55, N. 3, pp. 601, 601–643.

XU, Xiacong; ZHANG, Dachuan; LIU, Xiaoping; OU, Jinpei; WU, Xinxin. "Simulating multiple urban land use changes by integrating transportation accessibility and a vector-based cellular automata: a case study on city of Toronto". **Geo-spatial Information Science**, Vol. 25, N. 3, pp. 439-456