

# SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS DE USO DO SOLO PARA O ANO DE 2025 NO MUNICÍPIO DE SÃO CAETANO DO SUL, SÃO PAULO

Rayanna Barroso de Oliveira Alves<sup>1</sup>, Cláudia Maria de Almeida<sup>2</sup>, Elton Vicente Escobar Silva<sup>3</sup>,  
Rômulo Marques Carvalho<sup>4</sup>, David Luciano Rosalen<sup>5</sup>, Hernande Pereira da Silva<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - PGSER, Divisão de Observação da Terra e Geoinformática - DIOTG, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Avenida dos Astronautas, 1758 – 12227-010, São José dos Campos, Brasil, rayannabarroso@hotmail.com; <sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Avenida dos Astronautas, 1758 – 12227-010, São José dos Campos, Brasil, claudia.almeida@inpe.br; <sup>3</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Avenida dos Astronautas, 1758 – 12227-010, São José dos Campos, Brasil, eltescobar@gmail.com; <sup>4</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Avenida dos Astronautas, 1758 – 12227-010, São José dos Campos, Brasil, mr.romulomarques@gmail.com; <sup>5</sup> Universidade Estadual Paulista, Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, s/n – 14884-900, Jaboticabal, Brasil, david.rosalen@unesp.br; <sup>6</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n – 52171-900, Recife, Brasil, hernande.silva@ufrpe.br

## RESUMO

O presente artigo propõe-se a realizar simulações de três cenários de mudanças de uso do solo para o ano de 2025 no município de São Caetano do Sul (SP), baseado em mapas reais de uso disponíveis nos anos de 2018 e 2021. Para realizar as transições de uso do solo, houve a integração de variáveis explicativas em um modelo baseado em autômato celular. Para a geração dos cenários, foi levada em consideração a plausibilidade de ocorrência de determinadas transições de uso. Assim, verificou-se que as variáveis utilizadas corresponderam de fato aos fatores indutores do processo de conversões de uso do solo no município, gerando simulações que identificaram mudanças factíveis de uso do solo urbano.

**Palavras-chave** — modelagem dinâmica espacial, autômato celular, urbanização, infraestrutura, uso do solo urbano.

## ABSTRACT

*This article is committed to run simulations of distinct urban land use change scenarios in the municipality of São Caetano do Sul (SP) for the time horizon of 2025, based on available maps of land use for the years 2018 and 2021. In order to accomplish land use transitions, several explanatory variables were integrated in a cellular automaton-based model. For the scenarios elaboration, we took into account the plausibility of occurrence of certain land use transitions. It was observed that the employed variables represented in fact the most effective drivers of land use change in the analyzed municipality and they were responsible for producing feasible conversions of urban land use.*

**Key words** – spatial dynamic modeling, cellular automaton, urbanization, infrastructure, urban land use.

## 1. INTRODUÇÃO

A forma com que centros urbanos são organizados e distribuídos no espaço geográfico desempenha um papel fundamental para a sua gestão territorial sustentável [1]. Desde os primórdios, as características de organização espacial de assentamentos urbanos eram marcadas por áreas compactas com alta densidade populacional e lenta taxa de expansão [2], entretanto, esse cenário se alterou drasticamente com a Revolução Industrial nos países desenvolvidos, e no Brasil, sobretudo a partir da metade do século XX. Atualmente, a taxa de expansão urbana é em média duas vezes maior do que o seu crescimento populacional [3].

A Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, com o passar dos anos, veio apresentando intenso processo de urbanização, o qual transformou pequenas cidades em imensas áreas urbanizadas, que ultrapassavam os limites dos municípios, levando, em alguns casos, à conurbação dos mesmos. Ao longo do processo, a mancha urbana se expandiu de forma fragmentada em direção às periferias mais remotas [4].

Nesse sentido, a modelagem dinâmica espacial de mudanças do uso urbano permite identificar os dados mais críticos para entender a situação atual e prever a evolução de uso do solo em uma dada cidade [5]. Modelos de mudanças do uso do solo urbano (e regional) enfocam aspectos conceituais e operacionais destinados a lidar com representações de eventos espaço-temporais, observando uma sequência cronológica em relação ao seu aparecimento [6].

Para produzir e gerenciar conhecimentos espaciais que estejam relacionados à proteção do ecossistema urbano, condições do ambiente construído, recursos, instalações e necessidade de melhorias da qualidade de vida e o estímulo ao desenvolvimento econômico, as ferramentas geotecnológicas são importantes por fornecerem os subsídios

relevantes para tomadas de decisão e para o planejamento urbano.

Dessa forma, esse artigo objetivou simular a expansão da mancha urbana do município de São Caetano do Sul (SP) nos anos de 2018 a 2021 e realizar simulação futura com três cenários para o ano de 2025, utilizando um modelo dinâmico baseado no paradigma de autômatos celulares para a compreensão dos fatores condicionantes da expansão urbana.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo foi o município de São Caetano do Sul, estando o marco zero da cidade situado na latitude sul 23° 37'30" e longitude oeste 46° 31'45". Foram elaborados mapas de uso do solo do município de São Caetano do Sul para o ano 2018 e 2021, a partir do "Mapa de Uso do Solo e Zoneamento Estratégico" desenvolvido pela Secretaria Municipal de Obras e Habitação – SEOHAB, por meio do *software* QGIS, com sistema de referência de coordenadas WSG 84, UTM zona 23S. Para a simulação da transição de uso do solo em 2021, foi utilizado tanto o mapa de zoneamento de 2018 como base, quanto imagens de satélite do Google Earth, Google Street View e Google Satellite para verificação visual dos locais da cidade com modificação de uso.

### 2.1 Cálculo dos parâmetros internos do modelo de simulação

Realizaram-se, na sequência, operações de tabulação cruzada entre os mapas de uso do solo de 2018 e de 2021, visando identificar as transições de uso existentes e eliminar eventuais transições espúrias. A plataforma de modelagem utilizada, Dinamica EGO, requer como parâmetros de entrada as taxas globais de transição de uso, os pesos para as variáveis estáticas e dinâmicas, além de parâmetros morfológicos relativos às manchas de expansão ou difusão de classes de uso do solo.

A partir dos arquivos gerados, elaboraram-se mapas de variáveis dinâmicas e estáticas no QGIS. As variáveis dinâmicas são aquelas que se atualizam a cada passo de tempo do modelo, a exemplo das distâncias a classes de uso do solo do mapa inicial do período de simulação. Como as células sofrem transições de uso a cada passo de tempo, as distâncias a essas classes devem ser igualmente recalculadas a cada passo de tempo. Por outro lado, as variáveis estáticas permanecem inalteradas ao longo da execução do modelo.

No Dinamica EGO, extraem-se automaticamente as taxas globais de transição de uso do solo e os pesos para intervalos (*ranges*) das variáveis estáticas e dinâmicas. Para o cálculo dos parâmetros de morfologia das manchas, foi utilizado o *software* TerraView, no qual foram executadas consultas espaciais através do banco de dados PostGIS, com base no arquivo das classes de destino e transição e suas tabelas associadas.

Os pixels de uma mesma classe que estavam isolados nas extremidades de grandes polígonos (polígonos independentes) foram corrigidos através da função *merge* para transformação em uma mesma classe. Em seguida, foram realizadas consultas espaciais, visando à extração de

tamanho médio de manchas por expansão (realizadas através do algoritmo *expander*) e por difusão (realizadas através do algoritmo *patcher*), bem como a variância de tamanho dessas manchas e o percentual de ocorrência das transições em relação aos algoritmos *expander* e *patcher* [7].

### 2.2 Modelo de simulação de transição do uso do solo

Inicialmente, foi gerado um cubo *raster* das variáveis estáticas, e, na sequência, foi calculada a matriz de transição segundo as cadeias de Markov [8], buscando-se saber qual área sofreu transição para todo o período analisado, bem como anualmente, isto é, a cada passo de tempo de um ano.

Para o cálculo dos pesos das variáveis estáticas e dinâmicas, utilizou-se o método bayesiano de pesos de evidência, o qual opera exclusivamente com variáveis categóricas. Assim sendo, foi necessário discretizar as variáveis contínuas, que são as dinâmicas por excelência, além da maioria das variáveis estáticas, por meio do algoritmo de generalização de linhas [9].

Como o método de pesos de evidência pressupõe a independência entre pares de variáveis selecionadas para explicar uma mesma transição, o cálculo da associação ou dependência espacial entre variáveis torna-se imprescindível. Isto é feito utilizando-se o índice de Cramer (que opera com valores absolutos de áreas de sobreposição) e o Índice de Incerteza de Informação Conjunta – JIU, em inglês, *Joint Information Uncertainty* (que lida com valores relativos de áreas de sobreposição entre as variáveis) [10].

Realizou-se a análise explanatória dos resultados e eliminação das variáveis que representavam ruído, as que apresentavam dependência espacial e possuíam menor poder explicativo, bem como aquelas sem relação alguma com o fenômeno analisado (transição de uso considerada) [10].

Com isso, foi realizada a simulação das transições de uso do solo e, na sequência, a validação estatística espacial utilizando o método de similaridade por múltiplas resoluções [11]. Este método avalia o ajuste espacial entre mapas de mudanças usando um teste de comparação de similaridade *fuzzy*, o qual emprega uma função de decaimento calculada com vários tamanhos de janela. Os valores de tamanhos de janelas adotados para a validação espacial foram: 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11 pixels.

Para o ano de 2025, foram gerados três cenários distintos, e utilizada a mesma metodologia de simulação acima descrita.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Análise de variáveis e mapas de distância

Foram analisadas e verificadas as variáveis de entrada, contínuas e categóricas. As variáveis contínuas foram: distâncias a centros comerciais, a equipamentos de infraestrutura - compreende cemitérios, cultura, educação, esporte, lazer, mobilidade, saúde, segurança e social; instituições de ensino superior, a áreas inundáveis, a hidrografia, a shoppings, a vias arteriais, coletoras e de trânsito rápido. A variável categórica (e estática) está

relacionada a áreas alagáveis e não alagáveis (mapa *raster* binário).

### 3.2 Simulação de uso do solo (2018–2021)

A Figura 1 apresenta os mapas reais de uso do solo dos anos 2018 e 2021.

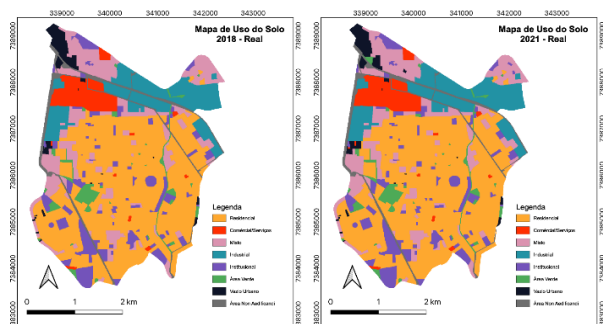


Figura 1: Mapas de uso e ocupação real 2018 e 2021.

Foram atribuídas numerações para cada uma das classes de uso do solo: residencial (1), comercial/serviços (2), misto (3), industrial (4), institucional (5), áreas verdes (6), vazios urbanos/imóveis subutilizados (7) e áreas *non aerificandi* de linhas férreas e de alta tensão (8).

A tabela a seguir apresenta as transições existentes no período de simulação pretérita (2018–2021).

2018	2021
	2
1	3
	5
2	3
	7
3	1
	2
4	7
	5
6	1
	2
	3
	5
	6
	8
8	3
8	7

Tabela 1: Transições de uso do solo (2018–2021).

### 3.3 Simulação de Cenários Futuros (2025)

#### 3.3.1 Cenário 1 – Exclusão da Transição 5 para 7

Para este cenário, todas as transições de 2021 foram mantidas, e foi excluída a transição da classe institucional para vazios urbanos/imóveis subutilizados. A exclusão da transição ocorreu, pois esse tipo de transição é considerado excepcional, ou seja, é raro uma cidade demolir uma área institucional, convertendo-a em vazio urbano. A área com

essa transição consistia em um Ginásio Poliesportivo. A simulação deste cenário está apresentada na Figura 2.

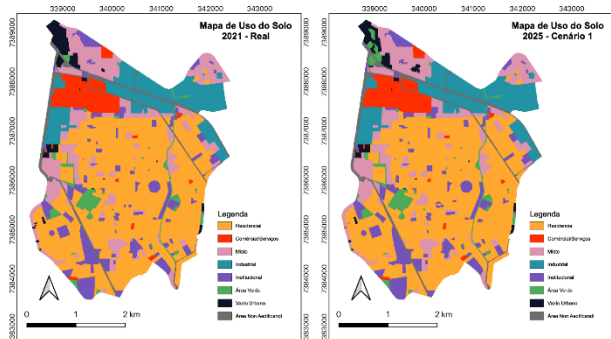


Figura 2: Mapa de uso final real 2021 e final simulado 2025 – Cenário 1.

#### 3.3.2 Cenário 2 – Inclusão da Transição 1 para 3

Para este cenário, todas as transições de 2021 foram mantidas, e foi incluída a transição da classe residencial para uso misto. Como não há tantos vazios urbanos na cidade para comportar transições, é esperado que essa mudança ocorra em áreas ocupadas pelo uso residencial. A simulação deste cenário está apresentada na Figura 3.

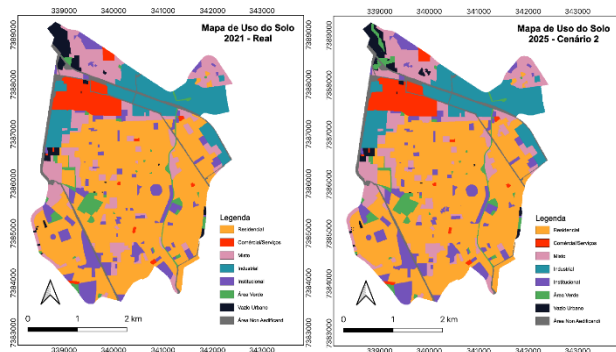


Figura 3: Mapa de uso final real 2021 e final simulado 2025 – Cenário 2.

#### 3.3.3 Cenário 3 – Exclusão da Transição 7 para 6 e Inclusão da Transição do Cenário 2

Para este cenário, todas as transições de 2021 foram mantidas, tendo sido incluída a transição da classe residencial para uso misto do Cenário 2, e removida a transição de vazios urbanos/imóveis subutilizados para áreas verdes. Essa transição foi escolhida para exclusão, pois, como não há tantos vazios urbanos na cidade, é esperado que as áreas de vazio comportem usos de maior demanda e com impacto direto na economia urbana da cidade. A simulação deste cenário é apresentada na Figura 4.

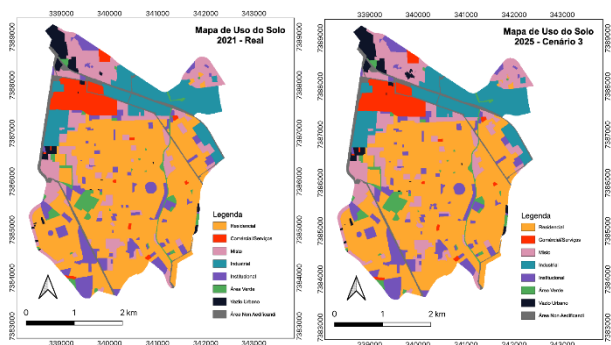


Figura 4: Mapa de uso final real 2021 e final simulado 2025 – Cenário 3.

#### 4. DISCUSSÃO

No Cenário 1, observou-se que a simulação apresentou mudanças de uso da transição de vazios urbanos para uso residencial na porção sudoeste e em uma área a extremo leste do município. Nessa mesma área, houve uma transição de vazios urbanos/imóveis subutilizados para uso misto. Também houve transição na região central, que correspondeu à mudança de uso residencial para institucional. Ocorreu também um aumento na mancha de vazios urbanos/imóveis subutilizados a noroeste, correspondendo à transição que ocorreu para uso misto. No setor noroeste superior, ocorreu um aumento da mancha de áreas verdes, ou seja, houve transição de vazios urbanos/imóveis subutilizados para áreas verdes.

No Cenário 2, ocorreram mudanças na parte nordeste superior e também na porção nordeste abaixo da grande área industrial. Mudanças também foram percebidas na porção sudoeste e na região extremo leste do município (transição de vazios urbanos/imóveis subutilizados para residencial) e na região noroeste, que presenciou a mudança de vazios urbanos/imóveis subutilizados para áreas verdes.

No que diz respeito ao Cenário 3, não houve transição de vazios urbanos/imóveis subutilizados para áreas verdes na região noroeste como havia ocorrido em períodos anteriores. Ocorreu transição na área superior direita (nordeste) de residencial para uso misto, bem como na porção nordeste, logo abaixo na região industrial. Na região central, observou-se a transição de residencial para institucional, onde já existiam equipamentos institucionais. Houve transição de vazios urbanos/imóveis subutilizados para uso residencial na região sudoeste e na região extremo leste do município.

#### 5. CONCLUSÕES

A modelagem dinâmica espacial baseada em autômatos celulares foi eficaz para a realização das simulações de mudanças do uso do solo urbano no município de São Caetano do Sul no período de 2018 a 2021, bem como para simulações de cenários no horizonte de curto prazo de 2025.

As evidências (ou variáveis) utilizadas corresponderam aos fatores indutores do processo de urbanização do município. Para isso, sugere-se a inserção de outras variáveis estáticas para melhor calibração do modelo. A modelagem e

a interpretação das tendências espaciais da expansão urbana é um grande desafio, visto que tais eventos normalmente geram dados complexos, que são multivariados e potencialmente não lineares.

#### 6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Projeto FAPESP 2020/09215-3 e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

#### 7. REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, E.A.; FURTADO, V.; ANDRADE, J.S.; MAKSE, H.A. A worldwide model for boundaries of urban settlements. *Royal Society Open Science*, 2018, n. 5, v. 5, p. 167-194.
- [2] SETO, C.; SANCHEZ-RODRIGUEZ, R.; FRAGKIAS, M. The new geography of contemporary urbanization and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 2010, n. 35, p.167-194.
- [3] ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D. L.; BLEI, A.; POTERE, D. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000-2050. *Evaluation and Program Planning*, 2011, n 75, p. 53-107.
- [4] SILVA, L.S. A cidade e a floresta: o impacto da expansão urbana sobre áreas vegetadas na região metropolitana de São Paulo (RMSP). 2013. 270 f. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2013.
- [5] AKIVA, M.B; BOWMAN, J.L; GOPINATH, D. Travel demand model system for the information era transportation. Chicago, USA, 1995, v. 23.3, p. 241-266.
- [6] ALMEIDA, C.M. 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. 2004. 321 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.
- [7] SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H.; COSTA, W. Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. 2009. Available at [www.csr.ufmg.br/dinamica](http://www.csr.ufmg.br/dinamica). ISBN: 978-85-910119-0-2.
- [8] BELL, E. J.; HINOJOSA, R. C. “Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes”. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1977, v. 11, n. 1, p. 13-17.
- [9] GOODACRE, A. K. A statistical analysis of the spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. *Tectonophysics*, 1993. v. 217, n. 3-4, p. 285-305.
- [10] BONHAM-CARTER, G. F. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Ontario: Pergamon, 1994. 305 p.
- [11] HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 2003, v. 17, n. 3, p. 235-249.