Modelo de Simulação Urbana Baseada em Multiagente

Renan Procopio Duarte[1], **Juliana M. N. Zamith**[1], **Marcel Silva**[1], **Marcelo Zamith**[1]

[1]Instituto Multidisciplinar – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
Nova Iguaçu – RJ – Brazil

renan_procopio@live.com

{juliananascente, mzamith, marcelsilva}@ufrrj.br

Abstract. *The urban growing makes arise several social problems. Among of them, we highlight the social-economic and spatial segregation. With this in mind, computational simulation rises as an excellent tool to help us, in order to understand social dynamics, in specific case of social-economic segregation. Therefore, this work proposes a simulation model based on multi-agent approach so that the model can resemble the social-economic and spatial segregation of theses groups. Additionally, this work also proposes metrics capable of measuring the degree of segregation in the simulations, allowing the qualitative and quantitative evaluation of the results.*

Resumo. *O crescimento rápido das cidades fez surgir alguns problemas sociais. Dentre esses problemas, destaca-se a segregação socioeconômica e espacial. Nesse sentido, a simulação computacional é uma excelente ferramenta para observar e entender dinâmicas sociais, como a segregação socioeconômica. Assim, este trabalho propõe um modelo de simulação baseado em multiagentes para simular a segregação socioeconômica e espacial desses grupos. Além disso, é também proposto no trabalho métricas capazes de medir o grau de segregação nas simulações, permitindo avaliar qualitativamente e quantitativamente os resultados.*

1. Introdução

Os centros urbanos estão em constante evolução, sendo compostos por diversas pessoas e seus diversos grupos sociais, os quais interagem entre eles e a própria cidade, modificando e evoluindo o ambiente onde vivem.

O processo de migração da população das regiões rurais para a cidade aconteceu em todo o mundo, mas não de forma igual. Os países desenvolvidos vivenciaram uma urbanização longa e gradual, bem diferente dos países em desenvolvimento, onde o processo de urbanização ocorreu em poucas décadas [Matos 2012].

Segundo um estudo publicado no Ipea [Vasconcelos 2006], houve um grande movimento de pessoas do campo para cidades. Nos anos 1970, pouco mais de 50% dos brasileiros já moravam em regiões urbanizadas. Após três décadas esse percentual chegou 80% e a previsão é que em 2050 esse percentual chegue a 90% [Matos 2012]. Contudo, as previsões para os anos 2000 não se concretizaram, tendo a taxa de crescimento urbano decaído ou se mantido estável desde a década de 1980 [Barros 2004]. Apesar disso, a América Latina juntamente com o Caribe foram as regiões que apresentaram os maiores crescimentos urbanos dos países em desenvolvimento [Cavenaghi 2009].

Independente do processo de urbanização, diversas demandas da população urbana surgem, como por exemplo: saneamento básico, saúde, educação, economia e transporte. A urbanização prolongada vivida pelos países desenvolvidos permitiu que os seus gestores pudessem testar e implementar diversas políticas públicas. Cenário bem diferente vivido nos países em desenvolvimento e em especial o Brasil, onde em pleno Século XXI 40% das cidades brasileiras não têm saneamento básico [Cabral 2020]. Neste sentido, as políticas publicas devem sanar as demandas existentes e olhar para o futuro para evitar que novos problemas sociais surgem, em especial aqueles que evidenciam as desigualdades sociais. Portanto, entender os fenômenos inerentes as dinâmicas de urbanização é fundamental para adotar novas políticas públicas efetivas. Neste sentido, é proposto nesse trabalho um modelo de simulação de segregação socioeconômico baseado na técnica de multiagentes. Além disso, o modelo implementa métricas para medir o grau de segregação socioeconômico da simulação, o que permite obter resultados quantitativos e qualitativos das simulações.

Dentre as técnicas capazes de simular ambientes urbanos, modelos baseados em multiagentes destacam-se, pois os elementos das simulações são descritos através de regras, como a interação entre classes sociais no espaço da cidade [Clarke 2014].

O trabalho está organizado em Seções de forma que a Seção 2 apresenta os conceitos envolvidos no trabalho. A Seção 3 descreve o modelo proposto. A seguir, os resultados, experimentos e suas análises são expostas e discutidas na Seção 4. Por fim, a Seção 5 retrata as conclusões e trabalhos futuros.

2. Fundamento teórico

O tema do trabalho é multidisciplinar, requer conceitos de diversas áreas do conhecimento, como Ciência da Computação, Geografia, Arquitetura entre outros. Assim, para fins didáticos, será apresentados apenas alguns conceitos relacionados as dinâmicas simuladas pelo modelo proposto.

Uma das dinâmicas relacionadas ao modelo proposto é conhecida pela literatura como periferização. É um processo de ocupação urbana de regiões periféricas as áreas centrais, que são mais valorizadas e urbanizadas. Esse processo acontece tanto entre grupos de baixa renda quanto em classes mais abastadas. As periferias de grupos mais abastados é composta por grupos de alta renda os quais, em geral, encontram-se em condomínios fechados e, geralmente, próximos da periferia de grupos de baixa renda.

O contato entre a elite urbana, presente nos condomínios, e o grupo de baixa renda que reside na área ao redor é escasso ou nulo. Isso acaba por fragmentar este espaço e aumentar a segregação, uma vez que a elite se auto-segrega dentro do limite destes condomínios fechados [Corrêa 1986, De Souza 2001].

A segregação tem impactos negativos nas cidades e na vida de seus habitantes. Impõe várias restrições a determinados grupos populacionais, como: a negação de infraestrutura básica e serviços públicos, menos oportunidades de trabalho, preconceito e maior exposição à violência. Estudos apontam que a população menos favorecida se beneficiaria de uma distribuição de pessoas de diferentes grupos socioeconômicos menos segregada [Caldeira 1992, Rodríguez Vignoli 2001, Sabatini et al. 2001]. Mas uma questão que surge é como medir a segregação?

Neste sentido e em especial para a simulação, o trabalho adota duas métricas a fim de medir o grau de segregação socioeconômico: o índice de dissimilaridade e o índice da teoria da informação H ou apenas índice H.

O índice de dissimilaridade ($D \in [0 : 1]$) representa uma medida da diferença média entre a proporção local dos grupos populacionais em cada unidade de área e a proporção destes grupos populacionais na cidade como um todo. Valores próximos de 0 indicam menor segregação entre estes grupos, ao passo que a maior segregação socioeconômica é dada por valores mais próximos de 1. O índice H ($H \in [0 : 1]$) baseia-se no índice de entropia de Theil e representa a uniformidade espacial da distribuição de grupos econômicos dentro da simulação, considerando uma composição populacional ideal, que representa a diversidade máxima (proporção igual para todos os grupos populacionais). Logo, para $H \approx 0$ indica integração máxima, ao passo que $H \approx 1$ significa que várias localidades possuem apenas um grupo populacional, representando um alto índice de segregação entre localidades.

Para obter D é preciso coletar algumas informações espaciais e em relação aos diferentes grupos socioeconômicos. Neste sentido, a intensidade populacional global e local é necessário para o cálculos dos dois índices e é dada pelas Equações:

$$\breve{L}_j = \sum_{j=1}^{J} k(N_j) \quad (1) \qquad \breve{L}_{j,m} = \sum_{j=1}^{J} k(N_{j,m}) \quad (2)$$

onde N_j é o total da população que reside na área j de um total de J áreas; k é o estimador de densidade via kernel com largura de banda de 10 metros, conforme Equação 3 estima a influência de cada unidade de área na localidade em estudo j. $\breve{L}_{j,m}$ é a intensidade populacional do grupo j na localidade m, considerando M localidades.

$$k(x) = \frac{1}{10N} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_i}{10}\right)^2}}{\sqrt{2\pi}} \right) \quad (3)$$

Em seguida, a dissimilaridade do local m é calcula pelas Equações:

$$D(m) = \sum_{j=1}^{J} \sum_{m=1}^{M} \frac{N_j}{2NI} |\breve{\tau}_{j,m} - \tau_m| \quad (4) \qquad I(m) = \sum_{m=1}^{M} (\tau_m)(1 - \tau_m) \quad (5) \qquad \breve{\tau}_{j,m} = \frac{\breve{L}_{j,m}}{\breve{L}_j} \quad (6)$$

onde N é total a população urbana considerada. I representa o índice de interação e τ_m é a proporção do grupo m na área total de estudo, $\breve{\tau}_{j,m}$ é a proporção do grupo m na localidade j. O índice H utiliza as seguintes Equações:

$$\breve{H} = \sum_{j=1}^{J} \left[\frac{N_j(E - \breve{E}_j)}{EN} \right] \quad (7) \qquad E = \sum_{m=1}^{M} (\tau_m) ln \left(\frac{1}{\tau_m} \right) \quad (8) \qquad \breve{E}_j = \sum_{m=1}^{M} (\breve{\tau}_m) ln \left(\frac{1}{\breve{\tau}_m} \right) \quad (9)$$

Uma vez obtendo as métricas, é possível avaliar o grau de segregação socioeconômico das simulações e propor abordagens para minimizar ou mesmo eliminar essa dinâmica dos centros urbanos.

Em relação aos modelos de simulação de dinâmicas urbanas, duas famílias vêm recebendo destaque, os modelos baseados em Autômatos Celulares e os Modelos baseados em agentes e multiagentes. Ambas as técnicas são capazes de descrever sistemas complexos e dinâmicos através de regras.

Os modelos multiagentes são capazes de perceber o mundo através de sensores e agir através dos seus atuadores. Além disso, conta com a memória e a comunicação dos seus agentes [Norvig and Russell 2013]. Essas duas características torna o modelo baseado em multiagentes mais adequado a simulação de grupos socioeconômicos.

Na próxima Seção são apresentados os resultados a fim de validar o modelo proposto.

3. Modelo proposto

O modelo proposto é baseado na versão desenvolvida por Barros, J. X. [Barros 2004]. Estende o modelo base incluindo regras para que os multiagentes possam imitar o comportamento dos diferentes grupos socioeconômicos, e ainda reproduzir o comportamento imprevisível dos seres humanos. Além disso, permite que diferentes grupos sociais busquem espaços urbanos "vazios", aprendendo e conhecendo o ambiente, ou seja, os multiagentes adquirem uma melhor percepção do mundo simulado.

O modelo parte do princípio que o espaço urbano é representado por uma malha regular, onde cada elemento da malha pode ser visto como uma célula e assumir um dos quatro possíveis estados: espaço vazio ou ocupado, podendo ser ocupada por multiagentes representando grupos de alta, média e baixa renda social. Os estados das células é dado pela interação dos multiagentes. Dessa forma, há um multiagente para cada tipo de classe social.

O modelo proposto considera que os multiagentes construam o conhecimento do ambiente a medida que se locomovem pela malha e, assim, passe a conhecer outros multiagentes dispostos em sua vizinhança.

A dinâmica da segregação envolve, em um primeiro momento, o assentamento ou consolidação dos multiagentes de baixa renda em locais de grupos de alta renda ou próximos deste. Em seguida, outros indivíduos dos grupos de baixa renda tentam achar moradia nessas regiões. Por outro lado, grupos de alta renda buscam por outros locais mais nobres para residirem, enquanto os grupos de renda média tentem a domiciliarem nas antigas moradias dos grupos de alta renda. Essa dinâmica ocorre devido ao fato de todas pessoas ou grupos quererem usufruir dos serviços públicos, que, geralmente, são oferecidas com qualidade próximas as regiões ocupadas por grupos de alta renda.

Essa dinâmica se traduz com a seguinte regra: ao ser inserido na simulação, um multiagente A_i^g conhece os locais onde estão situados os multiagentes de alta renda, onde A representa o i-ésimo multiagente do grupo socioeconômico g. Logo, A_i^g projeta um caminho até a região onde estão os multiagentes das classes sociais mais abastadas, busca por uma célula vazia para ocupar próximo de onde estão esses multiagentes e, em seguida, ocupa a célula vazia encontrada, representando o assentamento do grupo social g.

O modelo não considera outras dinâmicas como a gentrificação, violência urbana e políticas publicas. Além disso, não considera questões como educação, mobilidade, violência, entre outras que influenciam as ocupações regulares e irregulares e que impactam diretamente na segregação socioeconômica [Duarte 2021].

4. Experimentos e resultados

Os experimentos foram conduzidos para validarem tanto a aleatoriedade do comportamento dos multiagentes quanto o modelo de segregação social. Assim sendo, o primeiro conjunto de experimentos trata-se da análise do comportamento dos multiagentes, seguido pelo segundo conjunto de testes relativos ao módulo de segregação social. [1]

Primeiro conjunto de testes: busca analisar a relação dos parâmetros de entrada com comportamento aleatório dos Agentes de renda baixa na demanda por locais para se estabelecerem. Para isso, foram realizadas um conjunto de 100 simulações e execuções representativas foram selecionadas com base no comportamento típico do conjunto, resultados espaciais típicos e o tempo médio das simulações.

Os experimentos foram conduzidos com os seguintes parâmetros: malha regular de 51×51 células e condição de contorno circular; cada célula ocupa um espaço de 50×50 metros; os parâmetros $stp_1 = 2$, $stp_2 = 2$ e $stp_3 = 2$ estão relacionados aos passos que os Agentes executam na buscas por espaços vazios, $D = 4$, $dsp = 1.000$ e $C = 800$. A distribuição dos Agentes de cada uma das classes é dado por um percentual em função do tamanho da malha da seguinte forma: 10% renda alta, 40% renda média e 50% renda baixa. Além disso, foi definido também a quantidade de multiagentes ativos ($N_a = 100$). Logo, é garantido que a cada passo de tempo existam 100 multiagentes ativos, observando a distribuição da classe econômica de cada um. A condição de parada simulação é dada pela quantidade de multiagentes inativos/estabelecidos, independentemente classe econômica. O sistema não é conservador em relação a quantidade de multiagentes.

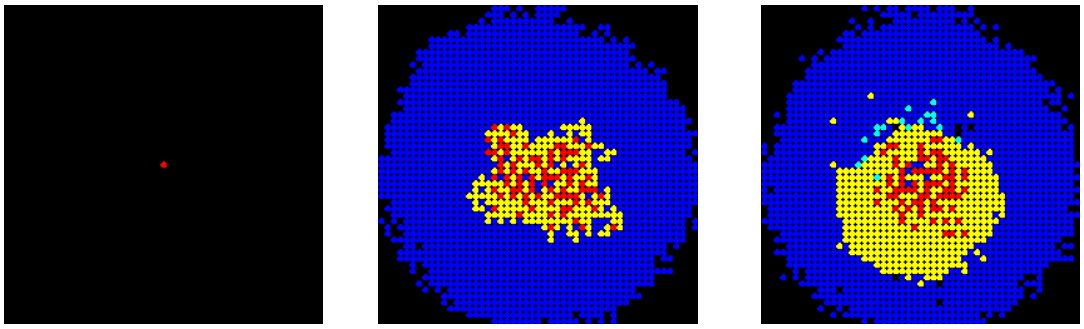
A Figura 1 mostra a evolução da simulação a partir da condição inicial (a), que começa com um multiagente de renda alta no meio da malha, em seguida e obedecendo a distribuição das classes, os multiagentes são inseridos no sistema e buscam estabelecerem-se próximos do multiagentes de alta renda.

A escolha dos Agentes das diferentes classes sociais obedece o padrão de buscar por locais mais bem estruturados, ou seja, onde a classe mais rica busca residir. Nesse sentido, há um padrão radial de assentamento, onde na parte central há os vermelhos ou ricos, amarelos ou classe de média renda e os menos favorecidos representados pelos azuis e azuis ciano, estes representam a parte do grupo estabelecida no local, inativos ou assentados. Este padrão radial também é visto com diferentes condições iniciais, i.e., mesmo deslocando o multiagente de alta renda, ou adicionando mais multiagentes de alta renda, emerge um padrão radial em volta do grupo de alta renda.

A fim de ressaltar a aleatoriedade do comportamento dos multiagentes, foram escolhidas dois resultados que partiram de uma mesma condição inicial (Figura 1a). As Figuras 1b e 1c mostram que ambas as simulações terminaram em instantes de tempos diferentes. A Figura 1c apresenta poucos multiagentes de baixa renda consolidados (azul

[1] Para os testes foi utilizando o ambiente RePast (*REcursive Porous Agent Simulation Toolkit*) na versão Java. *Download* no link: `https://repast.github.io/`

ciano), ao passo que a simulação representada pela Figura 1b não apresenta multiagentes de renda baixa consolidados. Outro ponto importante, é a questão do padrão que se forma, observa-se que as classes menos abastadas são colocadas mais para as bordas da malha, o que representa a periferia, padrão radial de ocupação. Por outro lado, as classes alta e média renda tendem a ficar mais na parte central.



(a) $t = 0$ **- condição inicial** **(b)** $t = 1.146$ **(c)** $t = 3.191$

Figura 1. Mesma condição inicial para duas simulações.

Segundo conjunto de testes: busca validar as métricas propostas para medir o grau de segregação socioeconômico. Para isso, foram realizadas três simulações utilizando a mesma condição inicial do primeiro teste. Diferenciando apenas com relação a distribuição dos multiagentes por classe social, conforme apresentado pela Tabela 1.

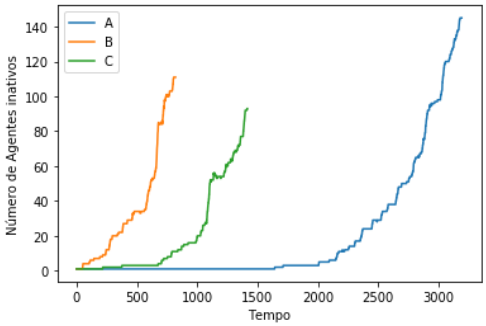
Tabela 1. Distribuição dos Agentes nos experimentos

Renda/Experimento	A	B	C
Alta	10%	50%	30%
Média	40%	40%	50%
Baixa	50%	10%	20%

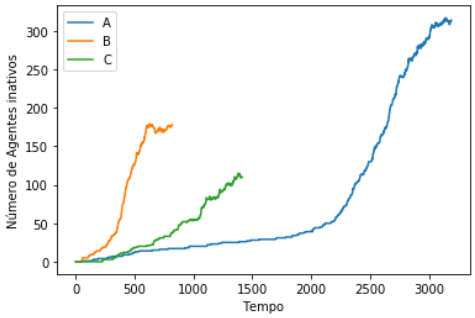
Os resultados mostram que a proporção de multiagentes inativos (consolidados) não é a mesma que a definida na condição inicial, como ilustrado pela Figura 2a. Mesmo o experimento B tendo 50% dos multiagentes ativos sendo de renda alta, ao término de sua execução apresenta menos multiagentes inativos de renda alta em relação ao experimento A, que conta com apenas 10% dos multiagentes ativos de renda alta.

A segregação entre os grupos econômicos mostra-se consistente mesmo com as mudanças na proporção dos grupos socioeconômicos. Os resultados apresentados pela Figura 3 demonstram essa estabilidade. O índice H afirma o resultado alcançado pelo dissimilaridade.

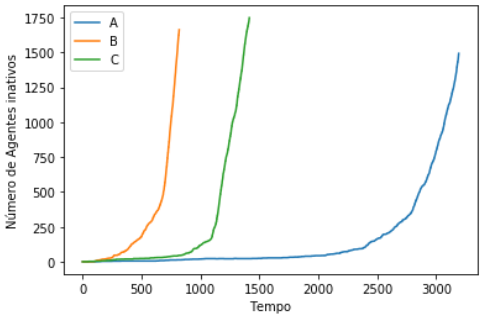
Como esperado, as duas métricas fornecem a mesma resposta. Enquanto o índice H mantém-se em torno de $0,28$, independentemente da distribuição das classes socioeconômicas definidas no início da simulação ou da proporção dos diferentes grupos ao final das simulações, a dissimilaridade fica em $0,1$. É um resultado que nos leva a concluir que a proporção de multiagentes no início da simulação não é um fator que altere a segregação, pois essa esta atrelada mais a distribuição final da malha, como as classes se auto-organizam em uma cidade.



(a) Alta renda.

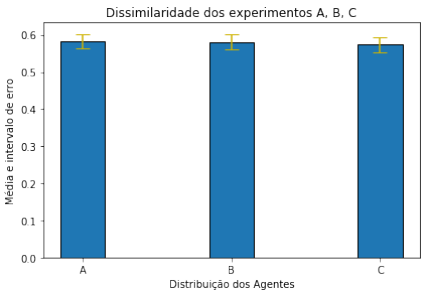


(b) Média renda.

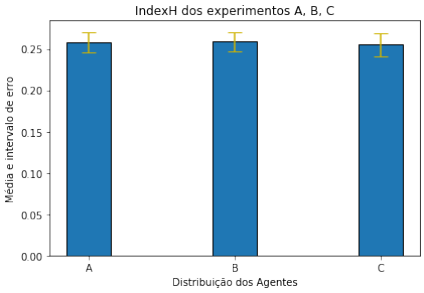


(c) Baixa renda

Figura 2. Simulações com diferentes distribuições socioeconômico.



(a) Dissimilaridade.



(b) Índice H.

Figura 3. Simulações A, B e C e suas métricas.

5. Conclusões e trabalhos futuros

O modelo proposto é robusto e apresenta resultados qualitativos e quantitativos das simulações. É um modelo baseado em sistemas multiagentes, que são capazes de reproduzir sistemas complexos e dinâmicos, como as dinâmicas inerentes ao crescimento urbano.

Além disso, o trabalho apresenta um comportamento mais realistas dos Agentes devido a melhor percepção do ambiente simulado. O módulo de segregação socioeconômico permite analisar os detalhes das interações dos diferentes grupos, o fazendo através de adaptações de métricas de dissimilaridade e índice H para o ambiente simulado.

Como trabalhos futuros, os autores querem expandir o trabalho para considerar também a mobilidade urbana, o que vai permitir avaliar diversas abordagens como por

exemplo pontos de bicicletas para serem alugadas ou veículos que possam considerar cenários globais e buscar minimizar ou evitar a formação de congestionamento em grandes vias.

Referências

Barros, J. X. (2004). *Urban growth in Latin American cities: exploring urban dynamics through agent-based simulation*. PhD thesis, University of London, University College London (United Kingdom).

Cabral, U. (2020). Saneamento básico Quatro em cada dez municípios não têm serviço de esgoto no país . https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/28326-quatro-em-cada-dez-municipios-nao-tem/-servico-de-esgoto-no-pais. [Online; acessado em 6 de outubro de 2021].

Caldeira, T. P. d. R. (1992). *City of walls: crime, segregation, and citizenship in São Paulo*. PhD thesis, University of California, Berkeley.

Cavenaghi, S. (2009). *Demographic transformations and inequalities in Latin America: historical trends and recent patterns*. Alap.

Clarke, K. C. (2014). Cellular automata and agent-based models. *Handbook of regional science*, pages 1217–1233.

Corrêa, R. L. (1986). A periferia urbana. *Geosul*, 1(2):70–78.

De Souza, M. L. (2001). Metropolitan deconcentration, socio-political fragmentation and extended suburbanisation: Brazilian urbanisation in the 1980s and 1990s. *Geoforum*, 32(4):437–447.

Duarte, R. P. (2021). Modelo de simulação baseado em multi-agentes para o impacto da segregação socioeconômica no crescimento urbano. Master's thesis, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Matos, R. (2012). Migração e urbanização no brasil. *Revista Geografias*, pages 7–23.

Norvig, P. and Russell, S. (2013). Inteligência artificial. *Tradução: Regina Célia Simille de Macedo. Consultoria Editorial e Revisão técnica: Dr. Flávio Soares Corrêa da Silva, Dra. Leliane Nunes de Barros and Dra. Renata Wassermann*, 3:13–31.

Rodríguez Vignoli, J. (2001). *Segregación residencial socioeconómica:¿ qué es?,¿ cómo se mide?,¿ qué está pasando?,¿ importa?* Cepal.

Sabatini, F., Cáceres, G., and Cerda, J. (2001). Residential segregation pattern changes in main chilean cities: scale shifts and increasing malignancy. In *International Seminar on segregation in the city*, pages 25–28. Lincoln Institute of Land Policy Cambridge, MA.

Vasconcelos, L. (2006). Urbanização - Metrópoles em movimento . https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=994:reportagens-materias&Itemid=39. [Online; acessado em 5 de setembro de 2021].