

Em Direção ao Realismo Espacial: Um Modelo de Mobilidade Humana Baseado em Small World In Motion e OpenStreetMap

Edgar S. Oliveira³, Rodolfo Meneguette³, Gustavo Figueireido¹,
Maycon Peixoto¹, Cássio Prazeres¹, Paulo H. L. Rettore^{2,4}, Bruno Santos¹

¹Instituto de Computação
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Salvador – BA – Brasil

²Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Belo Horizonte – MG – Brasil

³Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
Universidade de São Paulo, Brasil

⁴Departamento de Computação Aplicada
Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras - Brasil.

rettore@dcc.ufmg.br

{gustavobf, maycon.leone, prazeres, bruno.ps}@ufba.br
edgar.oliveira.icmc@usp.br, meneguette@icmc.usp.br

Abstract. *Human mobility models play a central role in the evaluation of mobile and opportunistic networks, directly impacting connectivity patterns and protocol performance. While synthetic mobility models offer simplicity and scalability, they often neglect real-world spatial constraints, whereas map-based or trace-driven approaches increase realism at the cost of complexity and reduced reproducibility. This paper proposes SWIM-OSM, an extension of the Small World In Motion (SWIM) mobility model that integrates spatial constraints derived from OpenStreetMap data. The proposed model preserves the core principles of SWIM, combining proximity and location popularity, while restricting node movement to real urban graphs. Experimental results using the The ONE simulator show that SWIM-OSM produces more conservative and realistic mobility and network performance metrics compared to purely synthetic models, positioning it as a balanced alternative for opportunistic network simulations in urban environments.*

Resumo. *Modelos de mobilidade humana desempenham um papel fundamental na avaliação de redes móveis e oportunísticas, influenciando diretamente padrões de conectividade e desempenho de protocolos. Embora modelos sintéticos ofereçam simplicidade e escalabilidade, eles frequentemente desconsideram restrições espaciais reais, enquanto abordagens baseadas em mapas ou traços reais aumentam o realismo à custa de maior complexidade e menor reprodutibilidade. Este artigo propõe o modelo SWIM-OSM, uma extensão do modelo Small World In Motion (SWIM) que incorpora restrições espaciais a*

partir de dados do OpenStreetMap. O modelo preserva os princípios centrais do SWIM, combinando proximidade e popularidade dos destinos, ao mesmo tempo em que restringe o movimento dos nós a grafos urbanos reais. Resultados experimentais obtidos com o simulador The ONE indicam que o SWIM-OSM produz métricas de mobilidade e desempenho de rede mais realistas e conservadoras quando comparado a modelos puramente sintéticos, configurando-se como uma alternativa equilibrada para simulações de redes oportunísticas em ambientes urbanos.

1. Introdução

A mobilidade humana é um elemento central na avaliação e no projeto de sistemas distribuídos e redes móveis, influenciando diretamente requisitos como conectividade, latência, alcance e desempenho de protocolos [Solmaz and Turgut 2019, Rettore et al. 2020, Santos et al. 2018]. Em particular, simuladores de redes amplamente utilizados pela comunidade, como o The ONE Simulator [Keränen et al. 2009], ContiKiOS [Oikonomou et al. 2022], NS3 [Kumar et al. 2013], SnapAI [Coelho et al. 2025] e outros, dependem fortemente de modelos de mobilidade para gerar cenários realistas e reprodutíveis que consideram mobilidade. Nesse contexto, diversos modelos de mobilidade humana têm sido propostos ao longo dos anos, variando desde abordagens puramente sintéticas até modelos baseados em traços reais ou em descrições detalhadas de atividades humanas.

Apesar da diversidade de modelos existentes, observa-se uma lacuna relevante entre simplicidade e realismo espacial. Modelos sintéticos clássicos, como o Random Waypoint e o Manhattan Mobility Model, apresentam baixo custo computacional e fácil integração com simuladores de redes, porém assumem espaços contínuos e livres de obstáculos, ou ainda são pouco realistas, desconsiderando restrições geográficas reais. Por outro lado, modelos baseados em mapas ou traços reais oferecem maior fidelidade espacial e comportamental, mas frequentemente exigem dados difíceis de obter, apresentam alta complexidade de implementação ou reduzem a reprodutibilidade dos experimentos. Essa dicotomia limita a capacidade de avaliar protocolos e sistemas distribuídos em cenários urbanos realistas sem comprometer a escalabilidade e a simplicidade experimental.

Com o objetivo de mitigar essa lacuna, este trabalho propõe o modelo de mobilidade *SWIM-OSM*, uma extensão do modelo *Small World In Motion (SWIM)* que incorpora restrições espaciais realistas a partir de mapas do OpenStreetMaps (OSM). A proposta mantém os princípios fundamentais do SWIM, isto é, baseada-se na combinação de proximidade e popularidade dos locais ao mesmo tempo em que restringe o movimento dos nós a grafos caminháveis extraídos de mapas reais. Dessa forma, o SWIM-OSM permite simulações espacialmente consistentes em ambientes urbanos reais, sem depender de traços de mobilidade ou modelagens complexas de atividades humanas.

As principais contribuições deste trabalho são:

- A proposição do modelo *SWIM-OSM*¹, que integra mapas reais do OpenStreetMap ao mecanismo de decisão de destinos do SWIM, preservando simplicidade e reprodutibilidade;

¹Disponível em: <https://github.com/bps90/swim-osm-sbrc>

Tabela 1. Tabela comparativa (em alto nível) entre modelos discutidos no survey e o SWIM com OSM.

Modelo	Mapa real (OSM)	Livre de traços	Restrição espacial	Pedestre	Amigável p/ Redes	Complexidade
SWIM (original)	X	✓	X	✓	✓	Baixa
SLAW	X	✓	X	✓	✓	Média
ManhattanGrid	X	✓	✓	X	✓	Média
SMOOTH	X	✓	X	✓	✓	Baixa–Média
MSLAW	✓	X	✓	✓	✓	Média
ParkSim	✓	X	✓	✓	X	Alta
Pursue	X	✓	X	✓	✓	Baixa
WDMM	✓	X	✓	X	✓	Alta
ADMM	✓	X	✓	X	✓	Muito alta
SWIM-OSM (proposto)	✓	✓	✓	✓	✓	Baixa–Média

Notas: “Livre de traços” indica que o modelo não requer dados de mobilidade reais (GPS/CDR/Wi-Fi) para operar, embora possa ser calibrado. “Restrição espacial” indica que o movimento é restrito por vias/obstáculos (e.g., grafo viário/caminhos). “Amigável p/ Redes” indica facilidade de uso em simuladores de redes (e.g., The ONE, ContikiOS) sem modelagem detalhada de atividades, filas e papéis.

- Uma análise comparativa detalhada entre o SWIM-OSM e modelos clássicos e baseados em mapas da literatura, evidenciando seu posicionamento intermediário entre modelos puramente sintéticos e abordagens altamente específicas de cenário;
- A descrição formal do funcionamento e da complexidade aproximada do modelo, demonstrando sua viabilidade computacional e adequação para simulações de redes oportunísticas.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta uma comparação crítica com modelos de mobilidade relacionados. A Seção 3 descreve em detalhe o funcionamento do modelo SWIM-OSM e sua complexidade computacional. A Seção 4 apresenta a avaliação experimental do modelo, e a Seção 5 conclui o trabalho, discutindo limitações e direções para pesquisas futuras.

2. Trabalhos Relacionados

Diversos modelos de mobilidade humana foram propostos na literatura com diferentes níveis de realismo, complexidade e aplicabilidade, especialmente no contexto de simulações de redes e sistemas distribuídos [Santos et al. 2018, Rettore et al. 2025]. Nesta Seção, colocaremos em perspectiva modelos inspirados na mobilidade humana, veja Tabela 1, destacando suas características, limitações e posicionamento em relação à proposta deste trabalho.

O modelo *SWIM* [Kosta et al. 2010] original é um modelo sintético de mobilidade pedestre amplamente utilizado em simulações de redes devido à sua simplicidade, baixo custo computacional e fácil parametrização. O modelo baseia-se na combinação de proximidade espacial e popularidade dos locais, permitindo capturar padrões de comunidades e recorrência de visitas observados empiricamente em mobilidade humana. Entretanto, o SWIM assume um espaço contínuo bidimensional sem restrições geográficas reais, desconsiderando obstáculos físicos, vias urbanas e limitações topológicas. Como consequência, embora seja amplamente empregado como baseline em estudos de redes oportunísticas, seu realismo espacial é limitado em cenários urbanos ou estruturados.

O *Self-similar Least-Action Walk (SLAM)* [Lee et al. 2011] é um modelo pedestre sintético que introduz propriedades estatísticas relevantes da mobilidade humana, como distribuições em cauda pesada (*heavy-tail*) para comprimentos de percurso e tempos de pausa, além do princípio da mínima ação. Essas características permitem reproduzir padrões observados em traços reais, como autocorrelação espacial e heterogeneidade de deslocamentos. Apesar dessa sofisticação estatística, o SLAM também assume um espaço livre de obstáculos e não incorpora mapas reais, o que limita sua adequação para cenários geograficamente restritos, ainda que seja amplamente utilizado em estudos de redes móveis e oportunísticas.

O *Manhattan Grid Model* [Aschenbruck et al. 2010] é um modelo de mobilidade sintético que representa o ambiente urbano como uma malha ortogonal de ruas e interseções, restringindo o movimento dos nós a vias horizontais e verticais. Esse modelo permite capturar restrições espaciais básicas típicas de cenários urbanos, constituindo um avanço em relação a abordagens totalmente contínuas, como o Random Waypoint. Contudo, ao assumir uma topologia regular e idealizada, o Manhattan Grid desconsidera a heterogeneidade presente em cidades reais, o que limita seu realismo quando comparado a modelos baseados em mapas urbanos reais.

O *SMOOTH* [Munjal et al. 2011] foi proposto como uma alternativa simplificada ao SLAM, mantendo propriedades estatísticas semelhantes, porém com menor complexidade paramétrica e maior facilidade de implementação. O modelo busca reduzir o custo computacional e a dificuldade de calibração do SLAM, tornando-o mais acessível para estudos experimentais de larga escala. Assim como seus predecessores, o SMOOTH é um modelo sintético, independente de mapas reais e de traços de mobilidade, sendo adequado para simulações genéricas. No entanto, sua abstração espacial permanece limitada a ambientes sem restrições geográficas explícitas.

O *Map-Based Self-similar Least-Action Walk (MSLAM)* [Schwamborn and Aschenbruck 2013] estende o SLAM ao incorporar restrições geográficas derivadas de mapas reais, evitando áreas inacessíveis e considerando rotas viáveis entre pontos. Essa extensão aumenta significativamente o realismo espacial do modelo, permitindo que os deslocamentos respeitem a topologia urbana. Em contrapartida, o MSLAM passa a depender de dados cartográficos e apresenta maior complexidade de implementação, além de exigir maior esforço computacional, especialmente devido ao cálculo frequente de caminhos mínimos no grafo espacial.

O *ParkSim* [Vukadinovic et al. 2011] representa uma abordagem altamente específica de cenário, voltada para ambientes controlados, como parques temáticos e áreas de grande concentração de pedestres. O modelo utiliza mapas reais e incorpora explicitamente atividades, filas, estados dos agentes e dinâmicas detalhadas de movimento. Embora ofereça elevado grau de realismo comportamental e espacial, essa riqueza de detalhes implica alta complexidade e reduzida flexibilidade, dificultando sua adoção como modelo de mobilidade genérico ou como substituto direto em simuladores de redes oportunísticas de uso geral.

Pursue [Camp et al. 2002] tenta representar nós rastreando um único nó-alvo. Este modelo poderia representar forças policiais perseguindo um criminoso em fuga por exemplo. O modelo usa Pontos de Passagem Aleatórios sem pausas para mover o alvo

perseguido.

O *Working Day Movement Model (WDMM)* [Ekman et al. 2008] foca na rotina diária de indivíduos, incorporando atividades como trabalho, deslocamento e lazer, além da alternância entre diferentes meios de transporte. O modelo utiliza mapas reais e descreve explicitamente transições entre estados de mobilidade ao longo do dia, o que resulta em boa aderência a cenários urbanos realistas. No entanto, sua complexidade estrutural, dependência de múltiplos estados e abstrações específicas de atividades tornam-no menos adequado para estudos que demandam simplicidade, escalabilidade e reprodutibilidade fácil.

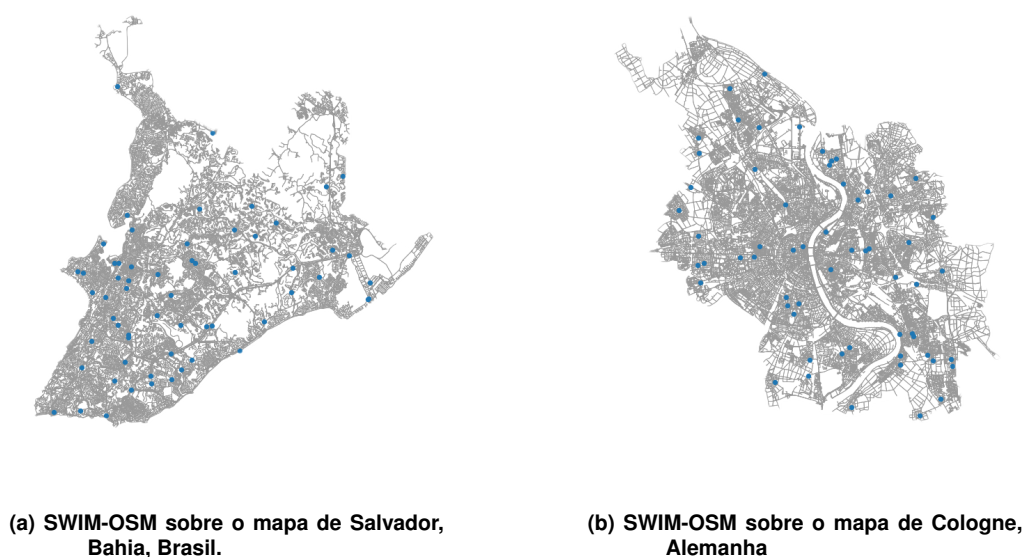


Figura 1. SWIM-OSM permite execução sobre qualquer cidade.

O *Agenda-Driven Mobility Model (ADMM)* [Zheng et al. 2010] é uma abordagem ainda mais detalhada, baseada em agendas pessoais, papéis sociais e atividades extraídas de grandes bases de dados. O modelo combina mapas reais, rotas viárias e estatísticas de atividades humanas, buscando um elevado realismo tanto espacial quanto temporal. Em contrapartida, apresenta alta complexidade conceitual e computacional, além de forte dependência de dados externos, o que limita sua aplicabilidade em cenários em que tais dados não estão disponíveis ou não podem ser facilmente compartilhados.

Por fim, o modelo **SWIM-OSM**, proposto neste trabalho, posiciona-se como uma extensão natural do SWIM original, incorporando restrições espaciais realistas a partir de mapas do OpenStreetMap, sem perder as principais vantagens dos modelos sintéticos. Diferentemente de abordagens baseadas em traços ou agendas, o SWIM-OSM não depende de dados reais de mobilidade, utilizando apenas informações cartográficas publicamente disponíveis. Dessa forma, o modelo mantém baixa a média complexidade, é facilmente integrável a simuladores de redes oportunistas e oferece maior realismo espacial quando comparado aos modelos sintéticos clássicos. Como evidenciado na Tabela 1, o SWIM-OSM ocupa uma posição intermediária entre modelos puramente sintéticos e simuladores altamente específicos de cenário, representando um compromisso equilibrado entre sim-

plicidade, realismo e aplicabilidade.

3. Modelo SWIM-OSM

Esta seção descreve o funcionamento do modelo de mobilidade *SWIM-OSM*, proposto neste trabalho como uma extensão do modelo SWIM. O objetivo principal do SWIM-OSM é combinar a simplicidade e a natureza sintética do SWIM original com restrições espaciais realistas extraídas de mapas do OSM, alcançando um melhor compromisso entre realismo e facilidade de uso em simulações de redes oportunísticas.

Algorithm 1: Pseudo-código simplificado do modelo SWIM-OSM

Input: Mapa OSM M , número de nós N , tempo T , δ , POIs \mathcal{P}

Output: Traços de mobilidade

1 Pré-processamento

2 $G \leftarrow \text{PARSEOSM}(M)$ /* grafo caminhável */

3 $\mathcal{P} \leftarrow \text{SELECTPOIS}(G)$ /* nós/amenidades */

4 **for** $i \leftarrow 1$ **to** N **do**

5 $home_i \leftarrow \text{SAMPLE}(\mathcal{P})$ /* ponto inicial */

6 $pos_i \leftarrow home_i$

7 Simulação

8 **while** $t < T$ **do**

9 /* T é o limite de tempo de simulação */

10 **for** $i \leftarrow 1$ **to** N **do**

11 **foreach** $p \in \mathcal{P}$ **do**

12 $w[p] \leftarrow \delta \cdot f(d_G(pos_i, p)) + (1 - \delta) \cdot g(pop_i(p))$ /* proximidade +
populatividade */

13 $dest \leftarrow \text{SAMPLEWEIGHTED}(w)$

14 $route \leftarrow \text{SHORTESTPATH}(G, pos_i, dest)$ /* mapa real */

15 $\text{MOVEONGRAPH}(i, route)$ /* movimento restrito */

16 $\text{PAUSE}(i)$ /* tempo de espera */

3.1. Características do modelo

No Algoritmo 1, descrevemos em alto nível a sequência de funcionamento do modelo proposto, mais detalhes podem ser encontrados no repositório¹. O SWIM-OSM mantém o princípio fundamental do SWIM original, no qual as decisões de mobilidade de cada nó são guiadas por dois fatores principais: *proximidade* e *populatividade* dos destinos. A proximidade reflete a tendência dos indivíduos a se deslocarem para locais próximos ao seu ponto atual ou ao seu ponto base, enquanto a populatividade captura a preferência por locais frequentemente visitados ou densamente povoados, conforme observado em estudos empíricos de mobilidade humana [Kosta et al. 2010, Solmaz and Turgut 2019].

Diferentemente do SWIM clássico, que assume um espaço bidimensional contínuo e sem obstáculos, o SWIM-OSM introduz um pré-processamento do mapa OSM para extrair um grafo caminhável ou viário, composto por vértices e arestas que representam ruas, caminhos e interseções válidas para deslocamento. A Figura 1 mostra os

SWIM-OSM executando sobre os mapas², respectivamente, de Salvador no Brasil e Cologne na Alemanha. Um conjunto de pontos de interesse (do Inglês *Points of Interests* (*POIs*)) é então selecionado a partir desse grafo, podendo corresponder a interseções, nós do grafo ou entidades (locais reais) mapeados.

Cada nó da simulação é inicialmente associado a um ponto base (*home*) selecionado dentre os POIs. Durante a simulação, o nó avalia iterativamente os possíveis destinos, atribuindo a cada POI um peso que combina a distância no grafo (e.g., comprimento do caminho mínimo) e a popularidade percebida daquele local. Um destino é então amostrado de forma probabilística a partir dessa distribuição de pesos.

Uma vez escolhido o destino, o deslocamento é realizado exclusivamente ao longo do grafo extraído do OSM, utilizando algoritmos clássicos de caminho mínimo, como Dijkstra ou A*. O nó percorre a rota até o destino, respeitando as restrições espaciais impostas pelo mapa real. Ao chegar, permanece em pausa por um intervalo de tempo antes de iniciar uma nova decisão de mobilidade. Esse processo se repete até o término da simulação, gerando traços de mobilidade espacialmente consistentes e diretamente utilizáveis em simuladores de redes, como por exemplo, o The One Simulator [Keränen et al. 2009] ou Cooja/ContikiOS [Oikonomou et al. 2022] e outros.

3.2. Complexidade aproximada do algoritmo

A complexidade do SWIM-OSM pode ser analisada considerando uma decisão típica de mobilidade (i.e., a escolha de um novo destino e o deslocamento correspondente). Seja N o número de nós, P o número de POIs, e $G = (V, E)$ o grafo extraído do OSM.

Para cada decisão de destino, o nó avalia os pesos associados aos POIs, o que implica um custo linear $\mathcal{O}(P)$. Em seguida, o cálculo do caminho mínimo no grafo domina o custo computacional, sendo tipicamente $\mathcal{O}(E \log V)$ quando se utiliza Dijkstra com fila de prioridade (ou custo equivalente no pior caso para A*). O movimento ao longo da rota tem custo proporcional ao comprimento do caminho, geralmente linear no número de arestas percorridas.

Considerando que cada nó realiza, em média, K decisões de mobilidade ao longo da simulação, a complexidade total aproximada do algoritmo é dada por:

$$\mathcal{O}(N \cdot K \cdot (P + E \log V)).$$

Em termos de memória, o modelo requer armazenamento do grafo do mapa, com custo $\mathcal{O}(V + E)$, além do estado local de cada nó (por exemplo, contadores de popularidade), cujo custo depende da implementação e escolha do mapa, pode variar de $\mathcal{O}(P)$ por nó no pior caso a estruturas esparsas significativamente menores na prática.

Essa análise reforça que o SWIM-OSM apresenta complexidade superior à de modelos puramente sintéticos, como o SWIM original, porém substancialmente inferior à de simuladores altamente detalhados e orientados a atividades, como ParkSim ou ADMM. Assim, o modelo preserva escalabilidade e viabilidade computacional, ao mesmo tempo em que introduz realismo espacial alinhado às tendências apontadas no survey de mobilidade humana [Solmaz and Turgut 2019].

²Observe que qualquer cidade mapeada no OSM pode ser escolhida como parâmetro deste modelo.

4. Avaliação Experimental

Esta Seção apresenta a avaliação experimental do modelo SWIM-OSM, comparando-o com modelos de mobilidade amplamente utilizados na literatura, incluindo o Random WayPoint (RWP) e o SWIM original. O objetivo da avaliação é analisar como o aumento progressivo do realismo espacial, partindo de um modelo puramente aleatório até um modelo que considera mapas urbanos reais, impacta métricas clássicas de mobilidade humana e de desempenho de redes. Para o SWIM-OSM, os experimentos foram conduzidos considerando diferentes cidades com perfis urbanos distintos, permitindo avaliar como variações na topologia espacial influenciam os padrões de mobilidade e os resultados de rede.

Tabela 2. Configuração dos modelos de mobilidade avaliados nos experimentos.

Parâmetro	RWP 2D	SWIM 2D	SWIM-OSM
Número de nós	2^6 a 2^{10}	2^6 a 2^{10}	2^6 a 2^{10}
Duração da simulação (passos)	20 000 s (\approx 5.6 h)	20 000 s	20 000 s
Passo discreto (Δt)	1.0 s	1.0 s	1.0 s
Registro de traço	a cada 2 passos	a cada 2 passos	a cada 2 passos
Mapa real (OSM)	Não	Não	Sim (Salvador, Bonn, Cologne, Paris)
Restrição espacial	Não	Não	Sim
Área de simulação	$10^3 \times 10^3$ m ²	$10^3 \times 10^3$ m ²	Dependente do mapa
Tipo de rede	–	–	Caminháveis (walk)
Velocidade	[0.5, 1.8] m s ⁻¹	1.3 m s ⁻¹	1.3 m s ⁻¹
Tempo de pausa	25 s	25 s	25 s
Parâmetro α (popularidade)	–	0.85	0.85
Fator distância k	–	0.001	0.001
Expoente da distância	–	2.0	2.0
Número de destinos amostrados	–	1500	1500

Tabela 3. Configuração do simulador The ONE.

Parâmetro	Valor
Número de nós	2^6 a 2^{10}
Área / Mapa	Definido pelo Rastro (Tab. 2)
Modelo de comunicação	Padrão The One IEEE 802.11
Alcance de transmissão	Configuração padrão do The ONE (\approx 100 m)
Protocolo de roteamento	Epidemic Routing
Tempo de simulação	Fixo para todos os cenários (\approx 5.6 h)

4.1. Configuração Experimental

Os experimentos foram conduzidos utilizando o simulador The ONE, amplamente adotado para a avaliação de protocolos que consideram a mobilidade em redes oportunísticas. A Tabela 2 resume os modelos de mobilidade considerados e suas principais configurações, enquanto a Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados no simulador.

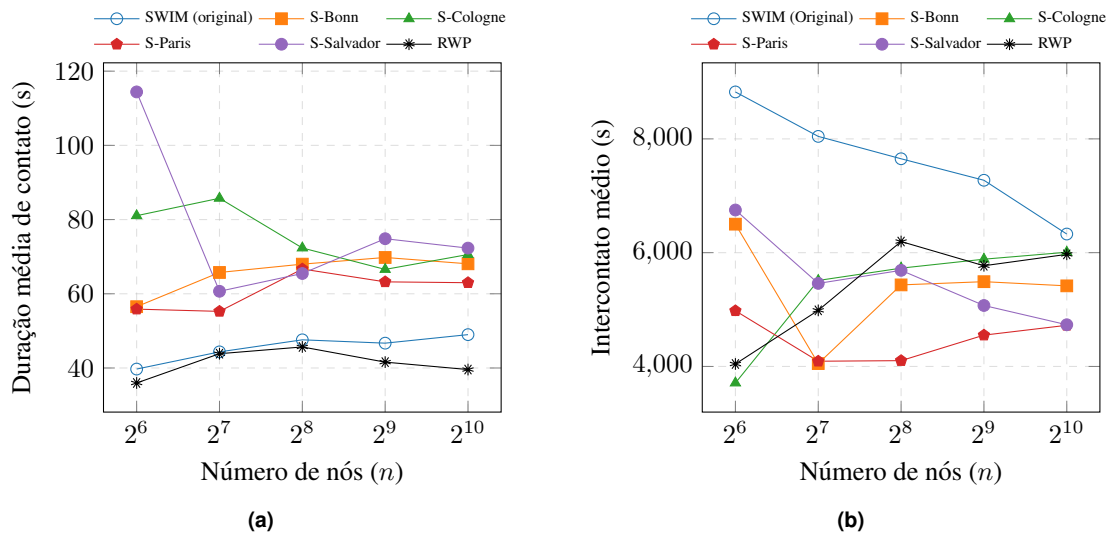


Figura 2. Comparação entre SWIM-2D e SWIM-OSM (S-cidade) quanto à duração e ao intercontato médio.

A escolha do protocolo Epidemic permite isolar o impacto da mobilidade sobre métricas de conectividade e disseminação, evitando vieses introduzidos por estratégias específicas de encaminhamento.

4.2. Métricas de Avaliação

As métricas utilizadas na avaliação seguem aquelas amplamente adotadas na literatura de mobilidade humana e redes oportunísticas, conforme sistematizado [Solmaz and Turgut 2019]. Em particular, foram consideradas métricas de mobilidade e métricas de desempenho de rede, a saber:

- **Duração média de contato:** tempo médio durante o qual dois nós permanecem conectados, refletindo a estabilidade dos encontros;
- **Tempo médio de intercontato:** intervalo médio entre encontros sucessivos de um mesmo par de nós;
- **Distância média percorrida:** distância total média percorrida por nó ao longo da simulação;
- **Probabilidade de entrega:** fração de mensagens entregues com sucesso;
- **Número médio de saltos:** custo de encaminhamento em termos de repasses;
- **Overhead ratio:** razão entre mensagens transmitidas e mensagens entregues;
- **Tempo médio em buffer:** tempo médio que mensagens permanecem armazenadas nos nós.

Essas métricas permitem analisar, de forma conjunta, os efeitos do modelo de mobilidade tanto sobre padrões espaciais de movimento quanto sobre o desempenho da rede.

4.3. Análise dos Resultados

Os resultados obtidos evidenciam um comportamento consistente à medida que se avança de modelos menos realistas para modelos com maior fidelidade espacial. A Figura 2 apresenta a duração média de contato e o tempo médio de intercontato. Observa-se que o RWP

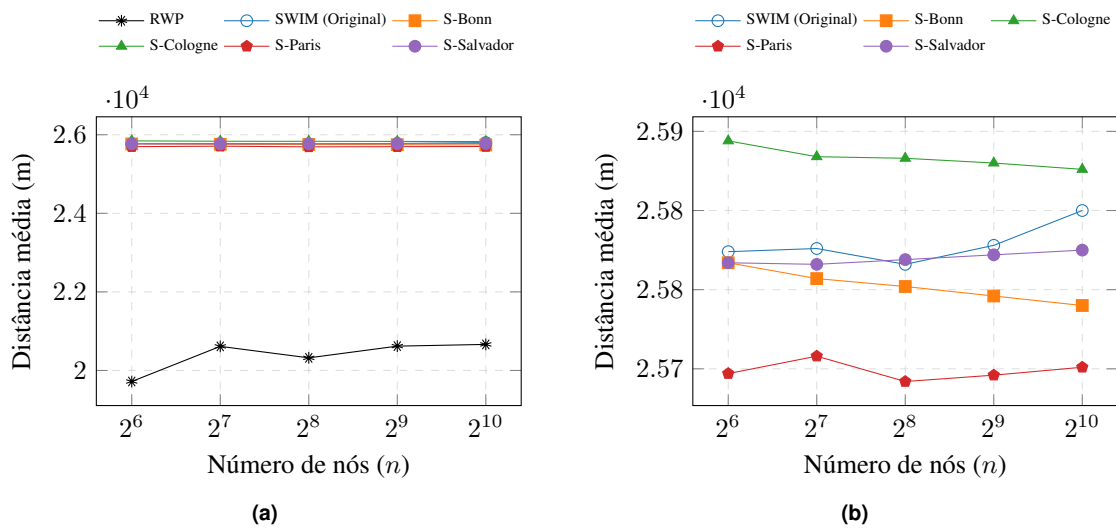


Figura 3. Distância média percorrida por nó: (a) comparação global entre todos os modelos e (b) comparação detalhada entre SWIM-2D e SWIM-OSM.

e o SWIM em 2D produzem contatos mais curtos e intercontatos menos estruturados, reflexo da ausência de restrições espaciais. Em contraste, o SWIM-OSM, ao restringir o movimento a mapas urbanos reais, apresenta padrões de contato mais estáveis, variando de acordo com a cidade considerada.

A Figura 3 apresenta a distância média percorrida por nó, evidenciando o impacto do modelo de mobilidade sobre o padrão global de deslocamento. Observa-se que o RWP apresenta distâncias médias menores e maior irregularidade ao longo do aumento do número de nós, reflexo de trajetórias desconectadas da estrutura espacial do ambiente e da ausência de restrições topológicas. Esse comportamento é característico de modelos puramente aleatórios, nos quais o movimento tende a se concentrar em deslocamentos curtos e pouco estruturados.

Os modelos baseados em SWIM exibem distâncias médias maiores e mais consistentes, indicando trajetórias mais longas e recorrentes, resultantes do mecanismo de seleção de destinos baseado em proximidade e popularidade. Essa característica já representa um avanço em relação ao RWP, ao induzir padrões de mobilidade mais coerentes do ponto de vista comportamental, ainda que em um espaço bidimensional contínuo e sem restrições geográficas reais.

No caso do *SWIM-OSM*, os valores de distância média permanecem próximos aos do SWIM original, porém com menor variância, conforme detalhado na Figura 3(b). Essa redução de variabilidade indica trajetórias mais estruturadas e estáveis, resultado direto da restrição do movimento a grafos urbanos reais. Além disso, as diferenças observadas entre cidades refletem variações naturais na topologia urbana, reforçando que o modelo é sensível às características do ambiente simulado e capaz de produzir traços de mobilidade mais fidedignos.

As Figuras 4(a) e 4(b) apresentam, respectivamente, a probabilidade de entrega e o número médio de saltos, permitindo analisar o impacto do modelo de mobilidade sobre a eficiência e o custo de encaminhamento. Observa-se que o RWP tende a apresentar pro-

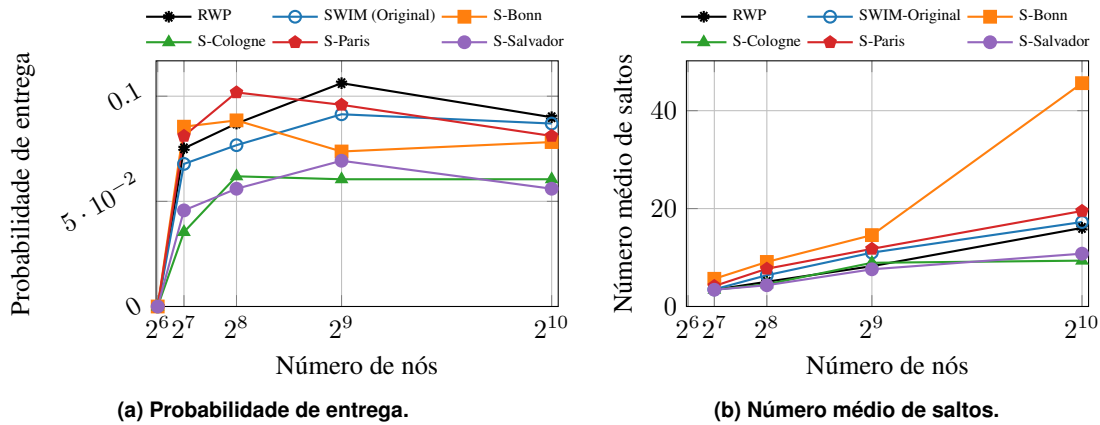


Figura 4. Comparação entre modelos de mobilidade considerando métricas de entrega e custo de encaminhamento. No SWIM-OSM, os resultados são apresentados por cidade.

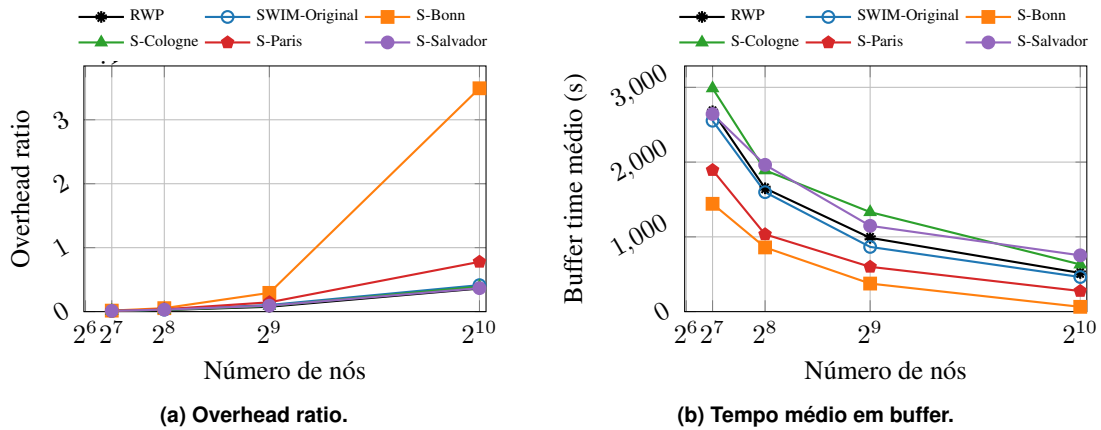


Figura 5. Comparação entre modelos considerando (a) overhead ratio e (b) tempo médio em buffer. No SWIM-OSM, os resultados são apresentados por cidade.

babilidade de entrega mais elevada, especialmente para menores densidades de nós, ao mesmo tempo em que mantém um número reduzido de saltos. Esse comportamento decorre da mobilidade excessivamente aleatória e pouco restrita, que favorece encontros frequentes e artificialmente otimistas. O SWIM original apresenta resultados intermediários, enquanto o *SWIM-OSM* produz uma redução gradual da probabilidade de entrega, acompanhada por um aumento controlado no número médio de saltos. Essa tendência reflete um cenário mais realista, no qual a conectividade é condicionada pela estrutura urbana, pela densidade viária e pela concentração espacial dos pontos de interesse, variando de acordo com a cidade considerada.

As Figuras 5(a) e 5(b) complementam essa análise ao apresentar o *overhead ratio* e o tempo médio em *buffer*. Novamente, o RWP tende a subestimar os custos da rede, apresentando valores reduzidos de *overhead* e menores tempos de armazenamento, resultado direto de padrões de mobilidade pouco representativos de cenários urbanos reais. Em contraste, o *SWIM-OSM* apresenta aumento consistente, porém controlado, tanto no *overhead* quanto no tempo médio em *buffer*, indicando maior competição por recursos

e maior permanência das mensagens nos nós. Esses resultados reforçam que o aumento do realismo espacial leva a avaliações mais conservadoras e coerentes do desempenho da rede, evitando conclusões excessivamente otimistas e aproximando os resultados de condições urbanas plausíveis.

De forma geral, os resultados indicam que o aumento do realismo espacial, do RWP ao SWIM-OSM, leva a avaliações mais conservadoras e realistas do desempenho da rede. O SWIM-OSM, em particular, evita tanto o otimismo excessivo de modelos aleatórios quanto a complexidade elevada de modelos orientados a atividades, posicionando-se como uma alternativa equilibrada para simulações de redes oportunísticas em ambientes urbanos reais.

4.4. Discussão: Realismo e Simplicidade em Modelos de Mobilidade

A escolha do modelo de mobilidade exerce papel central na validade de estudos envolvendo redes móveis, redes oportunísticas e sistemas distribuídos sensíveis ao movimento dos nós. Conforme discutido na Seção 2, a literatura apresenta um amplo espectro de modelos, que varia desde abordagens puramente sintéticas e aleatórias até modelos altamente detalhados baseados em mapas, agendas e traços reais. Essa diversidade reflete um compromisso inevitável entre simplicidade, escalabilidade e realismo, no qual ganhos em um desses aspectos frequentemente implicam perdas em outros.

Modelos sintéticos clássicos, como o RWP e o SWIM original, são amplamente adotados devido à sua facilidade de implementação, baixo custo computacional e elevada reprodutibilidade. No entanto, ao abstraírem restrições espaciais e estruturais do ambiente, esses modelos tendem a produzir padrões de mobilidade excessivamente otimistas, com conectividade artificialmente elevada e encontros pouco representativos de cenários urbanos reais. Como evidenciado na avaliação experimental, tais simplificações impactam diretamente métricas fundamentais de rede, podendo levar a conclusões que não se sustentam quando aplicadas a ambientes reais.

Por outro lado, modelos com elevado grau de realismo, como WDMM, ADMM e ParkSim, incorporam mapas reais, atividades humanas e rotinas temporais detalhadas, produzindo traços de mobilidade mais fidedignos. Entretanto, essas abordagens frequentemente exigem dados difíceis de obter, apresentam alta complexidade conceitual e computacional e reduzem a reprodutibilidade dos experimentos. Além disso, sua integração em simuladores de redes oportunísticas nem sempre é direta, o que limita seu uso como ferramentas genéricas de avaliação comparativa.

Nesse contexto, o *SWIM-OSM* posiciona-se como uma alternativa intermediária, preservando a simplicidade e a natureza sintética de modelos amplamente utilizados, ao mesmo tempo em que incorpora restrições espaciais reais por meio de mapas urbanos do OpenStreetMap. Conforme observado nos resultados experimentais, essa incorporação é suficiente para alterar significativamente padrões de contato e métricas de desempenho de rede, conduzindo a avaliações mais conservadoras e coerentes. Assim, o aumento controlado do realismo espacial, mesmo sem modelar explicitamente atividades humanas ou agendas pessoais, mostra-se essencial para a geração de traços de mobilidade mais fidedignos e para a avaliação robusta de soluções em redes oportunísticas e sistemas distribuídos.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o modelo de mobilidade *SWIM-OSM*, uma extensão do modelo *Small World In Motion* que incorpora restrições espaciais realistas a partir de mapas do OpenStreetMap, preservando a simplicidade e a natureza sintética do SWIM original. A proposta foi motivada pela lacuna existente entre modelos puramente sintéticos, amplamente utilizados em simulações de redes, e abordagens altamente detalhadas baseadas em traços reais ou agendas de atividades, que frequentemente apresentam elevada complexidade e baixa reprodutibilidade. O SWIM-OSM busca mitigar essa lacuna ao integrar mapas urbanos reais sem depender de dados reais de mobilidade.

A análise comparativa com modelos clássicos da literatura e os resultados experimentais evidenciaram que o aumento controlado do realismo espacial impacta diretamente métricas de mobilidade humana e de desempenho de redes oportunísticas. Em particular, o SWIM-OSM produziu avaliações mais conservadoras e coerentes quando comparado a modelos menos realistas, como o RWP e o SWIM em espaço bidimensional contínuo, apresentando padrões de contato mais estáveis e custos de encaminhamento mais condizentes com cenários urbanos reais. Além disso, a avaliação em diferentes cidades com perfis urbanos distintos reforça a flexibilidade do modelo e sua capacidade de adaptação a variados ambientes.

Como trabalhos futuros, pretende-se explorar extensões do modelo em diferentes direções, incluindo a incorporação de perfis de mobilidade heterogêneos, a avaliação conjunta com protocolos de roteamento mais sofisticados e a extensão do SWIM-OSM para cenários híbridos que combinem mobilidade pedestre e veicular. Investigações adicionais podem considerar mecanismos de calibração automática dos parâmetros do modelo a partir de estatísticas agregadas de mobilidade urbana, ampliando o realismo sem comprometer a simplicidade, a escalabilidade e a reprodutibilidade experimental.

Disponibilidade de Artefatos

Em aderência aos princípios da Ciência Aberta, o código-fonte e o dataset utilizados neste trabalho podem ser acessados em: <https://github.com/bps90/swim-osm-sbrc>.

Agradecimentos

agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Comitê Gestor da Internet no Brasil (CGI.br), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e aos auxílios 444077/2024-3, 407568/2025-5, 2018/23097-3, 2020/05182-3, TIC 002/2015, e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Referências

- Aschenbruck, N., Ernst, R., Gerhards-Padilla, E., and Schwamborn, M. (2010). Bonnmotion: a mobility scenario generation and analysis tool. In *Proceedings of the 3rd international ICST conference on simulation tools and techniques*, pages 1–10.
- Camp, T., Boleng, J., and Davies, V. (2002). A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless communications and mobile computing*, 2(5):483–502.
- Coelho, J. V. S., Lausberg, L. L., Zißner, P., Sevenich, P., Mota, V. F. S., Prazeres, C. V. S., Rettore, P. H. L., and Santos, B. P. (2025). SnapAI: A Simulator for Network Algorithms and Protocols

- with Artificial Intelligence Integration. In *Proceedings of the 12th International Conference on Software Defined Systems (SDS 2025)*, Lyon, France. IEEE.
- Ekman, F., Keränen, A., Karvo, J., and Ott, J. (2008). Working day movement model. In *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models*, pages 33–40.
- Keränen, A., Ott, J., and Kärkkäinen, T. (2009). The ONE simulator for DTN protocol evaluation. In *Proceedings of the 2nd international conference on simulation tools and techniques*, pages 1–10.
- Kosta, S., Mei, A., and Stefa, J. (2010). Small world in motion (SWIM): Modeling communities in ad-hoc mobile networking. In *2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pages 1–9. IEEE.
- Kumar, A. A., Rao, S., and Goswami, D. (2013). Ns3 simulator for a study of data center networks. In *2013 IEEE 12th International Symposium on Parallel and Distributed Computing*, pages 224–231. IEEE.
- Lee, K., Hong, S., Kim, S. J., Rhee, I., and Chong, S. (2011). SLAW: Self-similar least-action human walk. *IEEE/ACM Transactions On Networking*, 20(2):515–529.
- Munjal, A., Camp, T., and Navidi, W. C. (2011). Smooth: a simple way to model human mobility. In *Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 351–360.
- Oikonomou, G., Duquennoy, S., Elsts, A., Eriksson, J., Tanaka, Y., and Tsiftes, N. (2022). The Contiki-NG open source operating system for next generation IoT devices. *SoftwareX*, 18:101089.
- Rettore, P. H., Mast, J., Aurisch, T., Viana, A. C., Sevenich, P., and Santos, B. P. (2025). Military IoT from Management to Perception: Challenges and Opportunities Across Layers. *IEEE Internet of Things Magazine*, 8(2):25–31.
- Rettore, P. H., Santos, B. P., Lopes, R. R. F., Maia, G., Villas, L. A., and Loureiro, A. A. (2020). Road data enrichment framework based on heterogeneous data fusion for ITS. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 21(4):1751–1766.
- Santos, B. P., Goussevskaia, O., Vieira, L. F., Vieira, M. A., and Loureiro, A. A. (2018). Mobile matrix: routing under mobility in IoT, IoMT, and social IoT. *Ad Hoc Networks*, 78:84–98.
- Schwamborn, M. and Aschenbruck, N. (2013). Introducing geographic restrictions to the slaw human mobility model. In *2013 IEEE 21st international symposium on modelling, analysis and simulation of computer and telecommunication systems*, pages 264–272. IEEE.
- Solmaz, G. and Turgut, D. (2019). A survey of human mobility models. *IEEE Access*, 7:125711–125731.
- Vukadinovic, V., Dreier, F., and Mangold, S. (2011). A simple framework to simulate the mobility and activity of theme park visitors. In *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, pages 3248–3260. IEEE.
- Zheng, Q., Hong, X., Liu, J., Cordes, D., and Huang, W. (2010). Agenda driven mobility modeling. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 5(1):22–36.