

# Características da Densidade Espacial dos Nós em Ambientes de Mobilidade Real

Bruno Astuto A. Nunes<sup>1 2</sup>, Danielle L. Ferreira, Otto Carlos M. B. Duarte<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa de Engenharia Elétrica - COPPE  
Universidade Federal do Rio De Janeiro  
Rio de Janeiro - RJ, Brasil

{bruno,otto}@gta.ufrj.br, llopes.danielle@gmail.com

**Abstract.** *The main goal of this paper is to study the density of nodes in a real network and how this density affects the way these networks behave. Given the importance of this mobility metric, we analyzed real scenarios of users moving around a delimited area and extracted the density information. Our findings show that users do not roam around uniformly in the area. Instead, they form clusters in very few specific places. These rare events give the density distribution a long tailed aspect, where events of smaller value occur with high frequency, while events of higher values occur with low frequency. This result is also true for the number of locales visited by each user. We also present an analysis of these quantities, showing that they can be modeled as a power law, and analyze network metrics from simulations driven by an extense real mobility trace.*

**Resumo.** *O objetivo deste trabalho é estudar a densidade de nós em redes reais e como essa densidade afeta o funcionamento destas redes. Dado a importância desta métrica de mobilidade, foram analisados cenários reais de usuários movendo-se em uma área delimitada e extraiu-se a informação de densidade. Resultados encontrados mostram que os usuários não espalham-se uniformemente ao longo da área e sim, possuem concentrações grandes em alguns poucos pontos. Estes eventos raros dão a distribuição de densidade, um aspecto de uma distribuição de cauda longa, onde muitos eventos de menor valor ocorrem com frequência grande, enquanto poucos eventos de valor maior ocorrem com pouca frequência. Tal comportamento foi também encontrado para o número de localidades visitadas por cada usuário. Uma análise da modelagem destas quantidades seguindo uma lei de potência é apresentada e por fim, resultados extensos de simulação são apresentados onde é possível observar o impacto da variação da densidade em cenário real de mobilidade.*

## 1. Introdução

A comunidade de pesquisa em redes de computadores e engenharia elétrica e de computação vem dando nos últimos anos, considerável atenção a mobilidade humana. Mobilidade por si só exerce grande impacto em uma variedade de sistemas e aplicações,

---

<sup>2</sup>Este trabalho foi financiado pela CAPES através do Programa Nacional de Pós-doutorado (PNPD).

assim como, impacto em diversos tipos diferentes de redes, tais como: redes infra-estruturadas (e.g. WLANs), redes ad-hoc ou sem infra-estrutura, redes tolerantes a atraso (*delay tolerant networks* - DTNs), redes veiculares, etc.

O estudo e pesquisa em protocolos e algoritmos para redes de computadores, e especialmente redes móveis, depende ainda, em muito, de simulações, onde um software apropriado simula as características da rede estudada, de forma a possibilitar análise de desempenho destes algoritmos e protocolos propostos no cenário desejado.

Quando o foco dos estudos e das simulações são redes móveis, faz-se necessário o uso de modelos de mobilidade, que determinam a posição cartesiana dos nós móveis ao longo do tempo. Essa posição, ou a mobilidade em si é determinante no desempenho das redes estudadas. Uma indicação forte de como tais modelos são importantes no estudo de redes móveis é o fato de que todos os simuladores de redes mais conhecidos e utilizados pela comunidade científica, incorporam de forma nativa alguns geradores de mobilidade que, seguindo um regime ou modelo de mobilidade pré-determinado, estabelece a posição dos nós móveis ao longo do tempo. Modelos de mobilidade sintéticos foram estudados na literatura de forma extensa nos últimos anos [Camp et al. 2002].

Recentemente, no entanto, pesquisadores tem se voltado à utilização de cenários de mobilidade mais realistas para “alimentar” simulações de redes, uma vez que modelos sintéticos tradicionais, como o modelo aleatório Random way-point (RWP), não refletem o real impacto dos protocolos estudados em cenários reais [Musolesi and Mascolo 2009]. Como exemplos notáveis de propostas de modelos mais realistas podemos citar [Balachandran et al. 2002, Balazinska and Castro 2003, Tang and Baker 2000, Henderson et al. 2004]. Tais modelos utilizam atributos extraídos de *traces* de mobilidade reais para alimentar os parâmetros dos modelos propostos.

Além disso, diversos esforços focaram nas características livres de escala (*scale-free*) observadas em redes reais. Em particular, o trabalho seminal de Barabási e Albert [Albert and Barabási 2002] propõe um modelo para gerar redes livre de escala. Diversos trabalhos recentes (e.g., [Jardosh et al. 2005, Kim and Kotz 2006, Borrel et al. 2005, Mei and Stefa 2009, Musolesi and Mascolo 2007, Lim et al. 2006]) propõem modelos de mobilidade que tentam imitar a mobilidade humana seguindo o modelo apresentado em [Albert and Barabási 2002], onde a probabilidade de algum usuário escolher um determinado destino é proporcional a quantidade de usuários que já escolheram aquele destino.

Em [Nunes and Obraczka 2011], mostrou-se que utilizar o modelo apresentado em [Albert and Barabási 2002] para modelar mobilidade humana, pode levar a comportamento em regime permanente indesejável. Mas especificamente, tais modelos propostos não preservam a densidade espacial dos nós e apresentam regime permanente desta distribuição espacial semelhante a modelos aleatórios, como o RWP, por exemplo. Ao contrário, densidade espacial de nós móveis, nos cenários estudados, apresenta densidade persistente ao longo do tempo.

Densidade espacial é uma métrica importante para caracterizar e descrever a mobilidade real dos nós. Em outras palavras, ao invés de focar nos nós individualmente, iremos aqui caracterizar como a mobilidade dos nós afeta o comportamento da rede como um todo. Neste caso, a densidade espacial dos nós afeta diretamente aspectos fundamentais das redes estudadas, como capacidade e conectividade e assim, impacta funções

centrais das redes, tais como, acesso ao meio e roteamento.

No presente trabalho, apresenta-se um estudo em termos da densidade espacial dos nós. O objetivo é caracterizar a distribuição espacial de forma que o modelo possa ser utilizado no desenvolvimento de regimes ou modelos de mobilidade mais realistas que, de fato, reflitam as características livre de escala da densidade espacial dos nós encontradas quando observa-se *traces* de mobilidade reais. Para tal, utilizou-se o método estatístico apresentado em [Clauset et al. 2009], para determinar se os *traces* analisados apresentam de fato características de densidade livres de escala, e determinar os parâmetros de tais distribuições. Por fim, o impacto da densidade real dos nós nos *traces* estudados foi avaliado através de simulações.

Este trabalho está dividido da seguinte forma. Na Seção 2, discutem-se trabalhos relacionados. A Seção 3 trás uma descrição da metodologia empregada neste trabalho juntamente com uma descrição dos dados reais utilizados. Na Seção 4 será apresentado o resultado extraído dos dados reais analisados, para as curvas de densidade. Em seguida, na mesma seção, os resultados da análise da modelagem da distribuição da densidade serão discutidos e os resultados obtidos apresentados. Por fim, a Seção 5 conclui o trabalho.

## 2. Trabalhos Relacionados

Modelos de mobilidade são vitais no desenvolvimento, teste e avaliação de redes sem fio e seus protocolos. Recentemente, pesquisadores tem se voltado à utilização de cenários de mobilidade mais realistas para realizar suas pesquisas e simulações. Tal comportamento motivou iniciativas como o repositório de *traces* de mobilidade CRAW-DAD [CRAW-DAD], disponível para a comunidade científica. Estes *traces* de mobilidade podem ser utilizados para alimentar simulações e produzir resultados simulados mais próximos a um ambiente real, diferente do que acontece quando o protocolo ou algoritmo avaliado é implementado usando um modelo de mobilidade sintético.

Para tratar a necessidade de simulações mais realistas, no contexto de simulação em redes móveis, e dada a escassez de cenários e *traces* de mobilidade que possam ser utilizados para alimentar simulações, um grande número de trabalhos têm proposto modelos de mobilidade baseados em padrões de mobilidade mais realistas [Musolesi and Mascolo 2009]. Alguns exemplos incluem [Balachandran et al. 2002, Balazinska and Castro 2003, Tang and Baker 2000, Henderson et al. 2004]. Trabalhos mais recentes focam nas propriedades livre de escala de algumas características de diversas redes reais, tais como a Internet, a Web, e algumas redes sociais, por exemplo. Como já mencionado acima, os autores em [Albert and Barabási 2002] propõem um modelo para geração de redes que possuem características livres de escala, i.e., redes representadas por grafos nas quais o grau dos nós segue uma lei de potência. Os autores demonstram que muitas redes reais seguem este tipo de distribuição e discutem os mecanismos responsáveis pela emergência de redes livres de escala.

Diversos modelos de mobilidade (e.g., [Jardosh et al. 2005, Kim and Kotz 2006, Borrel et al. 2005, Mei and Stefa 2009, Musolesi and Mascolo 2007, Lim et al. 2006]) propostos recentemente aplicam de alguma forma tal modelo, com o intuito de manter as características livres de escala encontradas em ambientes reais. Autores em [Nunes and Obraczka 2011], no entanto, demonstram para alguns destes modelos de mobilidade propostos que, mesmo aplicando variantes do modelo apresentado

em [Albert and Barabási 2002], aspectos importantes da mobilidade humana, como a densidade espacial dos nós, não se refletem durante a evolução da rede da mesma forma observada na realidade. Em [Nunes and Obraczka 2011] também se discute o comportamento da densidade ao longo do tempo, e mostra-se que a distribuição de densidade real não varia significativamente no tempo. Já em [Nunes et al. 2012], os autores propõem um modelo de mobilidade baseado em relações sociais entre os nós moveis, onde tais relações são extraídas de *traces* de mobilidade reais. Os autores, neste caso, mostram que desta forma, é possível gerar *traces* de mobilidade sintéticos com características de densidade semelhantes as encontradas na realidade.

A maioria dos trabalhos anteriores sobre densidade espacial focam no regime de mobilidade aleatório Random Waypoint - RWP, e não em aplicações reais. Em [Bettstetter et al. 2003], por exemplo, expressões analíticas são derivadas para distribuição espacial resultante de simulações realizadas com o RWP. O caso unidimensional é analisado e uma aproximação para o caso bidimensional é também apresentada. Além disso, é analisado o conceito de áreas de atração através da proposta de uma modificação do modelo RWP. Outro exemplo de modelagem analítica do comportamento em regime permanente do RWP pode ser encontrado em [Navidi and Camp 2003]. Neste trabalho, autores chegam a equações estacionárias para densidade dos nós e velocidade.

Bettstetter et al. mostram que mobilidade aleatória leva a distribuições de nós homogêneas [Bettstetter et al. 2007]. Os autores então propõem um método para criar distribuições espaciais de nós não homogêneas, e em [Gyarmati et al. 2008], o impacto da mobilidade aleatória na homogeneidade da distribuição espacial é analisado através de simulações. Uma métrica também é proposta para medir a não-homogeneidade da distribuição espacial, e uma variante do RWP é proposta com o objetivo de manter a não-homogeneidade espacial desejada durante a simulação.

Em [Nunes and Obraczka 2012], os autores propõem um modelo de equações diferenciais ordinárias para estudar a distribuição espacial dos nós em regime permanente. Os autores utilizam seu modelo no estudo de regimes de mobilidade baseados em “waypoint”, onde a escolha do próximo destino depende de uma função de probabilidade definida a priori.

### **3. Análise Empírica dos Dados**

Nosso objetivo neste trabalho é estudar a densidade de nós em redes reais e como essa densidade afeta o funcionamento destas redes. A área definida pelos *traces* de mobilidade foi dividida em sub-áreas de igual tamanho, chamadas neste trabalho de células. Assim, define-se aqui a distribuição espacial dos nós como a percentagem de células que contêm  $n$  ou mais nós em um determinado instante de tempo.

#### **3.1. Traces de Mobilidade Reais**

De forma a estudar a densidade e seu impacto, analisamos 2 estudos de caso onde extraímos a característica de densidade de 2 *traces* de mobilidade (chamamos de *traces* de mobilidade os registros da mobilidade dos usuários, ou seja, a posição cartesiana dos mesmos no plano ao longo do tempo) em 2 cenários bem diversos: um cenário veicular e um parque localizado em um grande centro urbano.

A Tabela 1 apresenta e resume as características principais dos *traces* de mobilidade utilizados.

<i>trace</i>	# usuários	Duração	Amostras
Quinta [Campos et al. 2009]	97	900s	1s
Taxis SF [Piorkowski et al. 2009]	500	24 dias	30s

**Tabela 1. Resumo das características dos *traces* reais estudados.**

Quinta, refere-se ao *trace* de mobilidade capturado dentro do parque da “Quinta da Boa Vista”, primeiramente apresentado em [Campos et al. 2009]. Trata-se de um *trace* de mobilidade de GPS coletado em um parque localizado na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. O parque possui árvores, lagos, cavernas e trilhas. Ele engloba o Museu de Historia Natural da Cidade e o Zoológico. Taxis SF refere-se ao *trace* de mobilidade coletado na cidade de São Francisco nos EUA, onde uma frota de aproximadamente 500 taxis foi equipada com aparelho de GPS e suas posições registradas durante 24 dias. Tal *trace* de mobilidade pode ser adquirido em [Piorkowski et al. 2009].

### 3.2. Metodologia

Foram analisados cenários reais de usuários movendo-se em uma área delimitada de onde extraiu-se a informação de densidade espacial empírica. Um dos resultados interessantes encontrados é o fato de que os usuários não espalham-se uniformemente ao longo da área e sim, possuem concentrações grandes em alguns poucos pontos. Estes eventos raros dão a distribuição de densidade espacial, um aspecto de uma distribuição de cauda longa, onde muitos eventos de menor valor ocorrem com frequência grande, enquanto poucos eventos de maior valor ocorrem com pouca frequência. Em outras palavras, poucos lugares na área delimitada pelos *traces* de mobilidade possuem muitos nós (concentração ou densidade grande) e muitos lugares possuem poucos nós (concentração ou densidade pequena). Afim de apresentar tais resultados, os *traces* de mobilidade apresentados acima foram tratados de forma a extrair a densidade espacial empírica. Tais curvas serão apresentadas a seguir na seção de resultados.

É interessante no entanto, modelar tal distribuição com o objetivo de futuramente poder fazer uso da mesma no desenvolvimento de modelos de mobilidade capazes de manter e formar *clusters* de nós móveis com distribuições semelhantes as encontradas em ambientes reais. Desta forma, dando continuidade ao estudo da densidade em cenários reais de movimentação foi empregado um método estatístico para caracterizar a distribuição de interesse. Em [Clauset et al. 2009], os autores apresentam um método formal para rejeição da hipótese de uma distribuição possuir características de calda longa como em uma lei de potência (*power law*). O método definido em [Clauset et al. 2009] foi utilizado, através de uma implementação do mesmo fazendo uso da ferramenta MATLAB, para validar a hipótese de que a distribuição, foco do estudo, segue de fato uma lei de potência e realizar o *fitting* desta curva, além de computar os parâmetros da mesma. A seção seguinte descreve o método utilizado e ilustra resultados obtidos.

Além da análise da densidade em si, estudou-se também seu impacto em métricas básicas de funcionamento da rede, tais como vazão, retardo e taxa de entrega de pacotes. Neste caso variou-se o número total de nós na simulação de forma a variar também a densidade total da rede real estudada. Para esta etapa da análise, escolheu-se o *trace* de

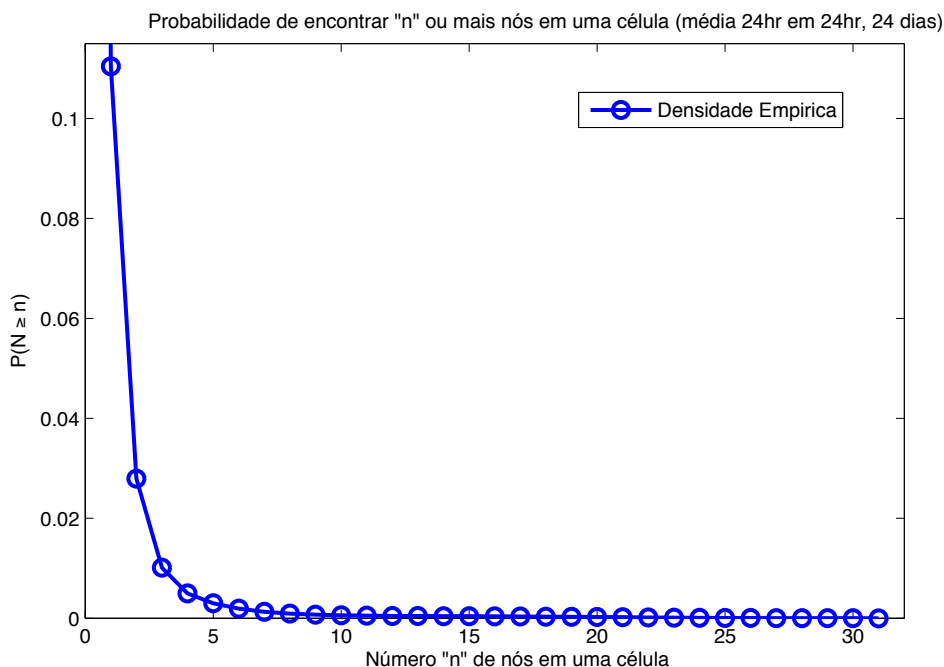
mobilidade veicular como estudo de caso, por tratar-se de um cenário mais extenso com número grande de nós, de forma que a variação da densidade e o seu impacto pudesse ser percebido de forma mais representativa em uma simulação mais extensa.

## 4. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados extraído dos *traces* de mobilidade para as curvas de densidade. Para a geração dos gráficos foi utilizado o software MATLAB. Em seguida, os resultados da análise da modelagem da distribuição da densidade serão discutidos e os resultados obtidos apresentados.

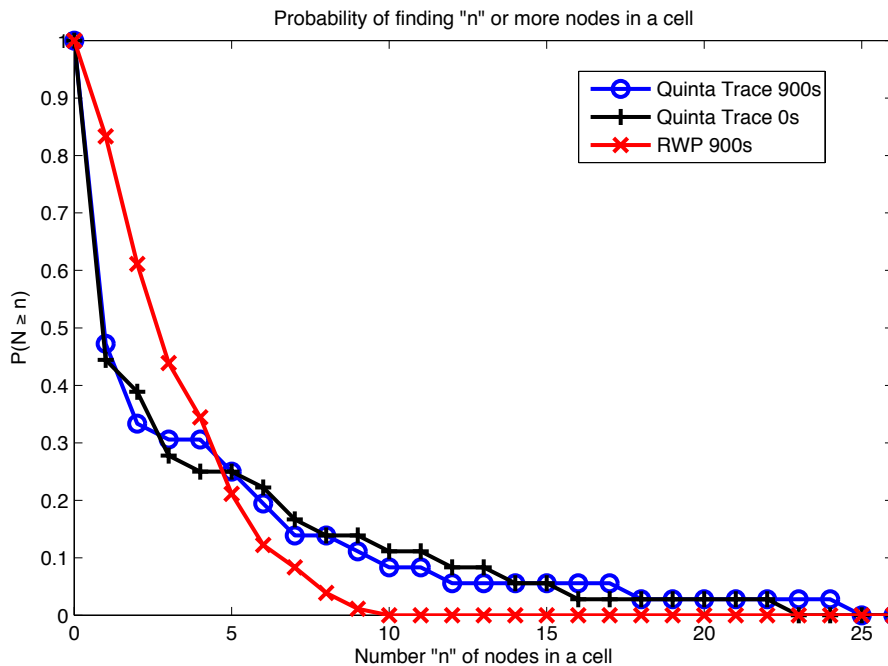
### 4.1. Densidade Empírica

O primeiro resultado extraído para a densidade foi do *trace* de mobilidade dos Taxis SF na cidade de São Francisco, extraído de [Piorkowski et al. 2009]. A Figura 1 mostra a curva da densidade espacial dos nós na área definida pelo *trace* de mobilidade para células quadradas de tamanho 140 x 140 metros. Esta figura mostra a percentagem de células contendo  $n$  ou mais nós. Uma curva como esta foi traçada para cada hora do dia, durante 24 dias. A curva da Figura 1 reflete a média destas curvas por hora. O primeiro ponto no gráfico onde  $x$  é igual a 1 indica que por volta de 11% das células possuem 1 ou mais nós. O ponto omitido no gráfico é o ponto onde existem 0 ou mais nós na célula. Este ponto é obviamente igual a 1 (100% das células possuem 0 ou mais nós). Apenas uma das células neste cenário possui contagem média de nós igual a 30 nós em uma determinada hora. O gráfico assume valor 0 apenas para valores do eixo  $x$  iguais ou maiores que 31 nós.



**Figura 1. Densidade empírica de taxis em São Francisco. Média a cada hora durante 24 dias.**

A Figura 2 mostra a mesma curva de densidade para o *trace* de mobilidade da Quinta da Boa Vista em dois instantes distintos. Outras curvas foram traçadas para diversos outros instantes de tempo, no entanto, as curvas permanecem sem grandes variações e



**Figura 2. Densidade empírica de pessoas na Quinta da Boa Vista. Densidade inicial (0 segundos), final (900 segundos), e densidade final simulado RWP.**

o tamanho das concentrações de usuários e suas frequências permanecem as mesmas. Em outras palavras, mantiveram-se as formas das curvas traçadas, que foram omitidas para melhor leitura do gráfico.

A terceira curva (intitulada RWP 900s) na Figura 2, refere-se a distribuição espacial média de 10 rodadas de simulações executadas no simulador *Scenario Generator - ScenGen* [The Scenario Generator]. Esta curva foi integrada ao gráfico para fins de comparação, de forma a tornar-se uma referência de como uma movimentação totalmente aleatória de nós, impactaria na distribuição espacial final. Tal curva refere-se a um cenário simulado com as mesmas características do cenário real, mantendo-se as mesmas condições iniciais (posições iniciais dos nós), velocidade média e tempo de pausa médio, medidos e retirados do *trace* de mobilidade da Quinta. Este resultado para o RWP não é novo e, mais uma vez, foi incorporado para fins de comparação. É possível observar no entanto, que após 900 segundos de simulação, a densidade espacial média converge para uma curva muito diferente da densidade inicial. Isso mostra que modelos aleatórios como o RWP não são capazes de formar e manter as concentrações de nós observadas em ambientes reais como o da Quinta, visto que, apesar das simulações iniciarem com essas concentrações, após a movimentação dos nós, o maior *cluster* ou aglomerado identificado nas simulações, foi em média, de tamanho igual a 9 nós, perdendo assim a característica de cauda longa observada em ambientes reais - vide as distribuições empíricas apresentadas nas Figuras 1 e 2.

É interessante no entanto, modelar tal distribuição com o objetivo de futuramente poder fazer uso da mesma no projeto de modelos de mobilidade capazes de manter e formar *clusters* de nós móveis com distribuições semelhantes a encontradas em ambientes

reais. A próxima seção mostra resultados neste sentido, de tentar identificar um modelo estatisticamente próximo as observações empíricas ilustradas aqui. Nossa hipótese inicial é a de que tal modelo, segue uma lei de potência.

## 4.2. Modelando Densidade

Leis de potência (LP) são expressões da forma  $P(x) \propto x^{-a}$ , onde  $a$  é um parâmetro constante de uma distribuição conhecida e  $P(x)$  e  $x$  são as medidas de interesse. Poucos fenômenos físicos seguem uma LP para todos os valores de  $x$ , normalmente apenas a calda da distribuição segue uma LP e se aplica apenas para valores maiores que algum mínimo,  $x_{min}$ .

Dado um conjunto de valores que correspondem a dados observados e a hipótese de que os dados foram extraídos de uma distribuição que segue uma lei de potência, deseja-se verificar se essa hipótese é plausível.

Em [Clauset et al. 2009] (Seção 4) os autores definem um teste de *goodness-of-fit* que gera um parâmetro  $p$  para testar a hipótese de uma distribuição seguir uma lei de potência, ou seja, se uma curva que segue uma lei de potência é um *fitting* plausível para os dados estudados. Este teste baseia-se na medida da distância entre a distribuição dos dados empíricos e a hipótese do modelo. Essa distância é comparada com a distância de medidas retiradas de um conjunto de dados sintético oriundo do mesmo modelo. O valor de  $p$  é definido como a fração das distâncias dos dados sintéticos que são maiores que a distância empírica. Ou seja, se  $p$  é grande (próximo de 1), então a diferença entre os dados empíricos e o modelo pode ser atribuído a flutuações estatísticas somente.

Caso  $p$  seja pequeno, o modelo não é plausível. As distâncias mencionadas são calculadas através do teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov (KS). Os autores indicam um valor de referência de  $p < 0.1$  para rejeitar a hipótese de os dados empíricos seguirem uma lei de potência.

A Figura 3 mostra a *cumulative distribution function* - CDF da distribuição espacial para o *trace* de mobilidade da Quinta, juntamente com o *fitting* destes dados de acordo com a LP e o método descrito em [Clauset et al. 2009]. A Figura 4 apresenta os mesmos resultados para o *trace* de mobilidade dos Taxis SF, para o número de visitas de nós as células na área definida pelo *trace* de mobilidade. A Tabela 2 mostra os parâmetros das curvas modeladas e os respectivos valores de  $p$  para os dois *traces* de mobilidade estudados. É possível perceber que para ambos os *traces* de mobilidade, o valor de  $p$  está acima do valor de referência de 0.1 estimado em [Clauset et al. 2009], mostrando que é possível assumir a hipótese de modelagem da distribuição espacial dos nós através de uma lei de potência de parâmetro semelhante a  $\alpha = 2.5$  e  $x_{min}$  adequado, proporcional ao número de observações.

<i>trace</i> de mobilidade	# alpha	Xmin	p
Quinta [Campos et al. 2009]	2.43	4	0.78
Taxis SF [Piorkowski et al. 2009]	2.67	247	0.64

**Tabela 2. Parâmetros das curvas modeladas e os respectivos valores de  $p$  para os dois *traces* de mobilidade estudados.**



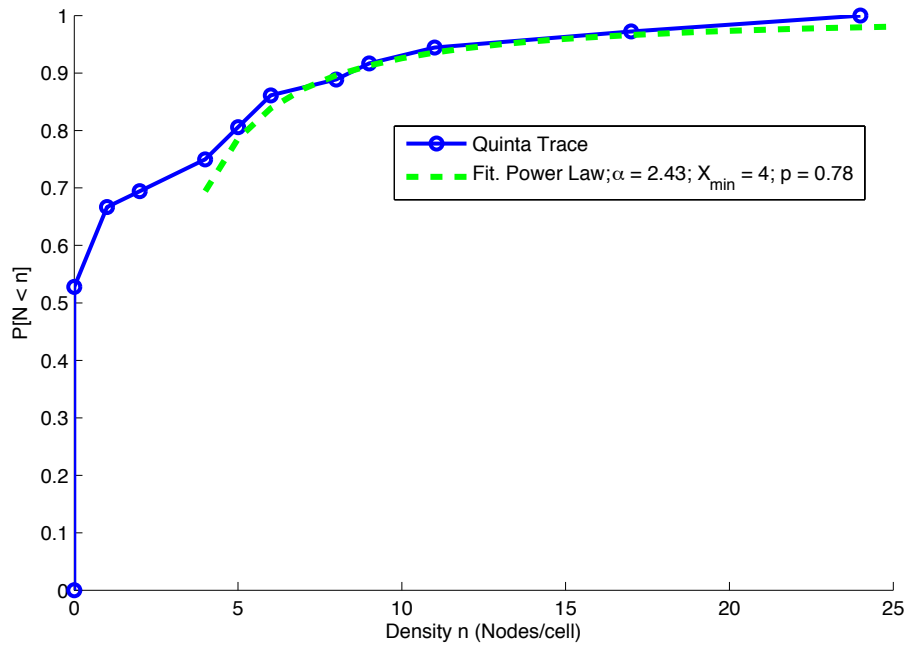


Figura 3. CDF da distribuição espacial dos nós para o *trace* de mobilidade da Quinta e o fitting da curva para um modelo que segue uma lei de potência.

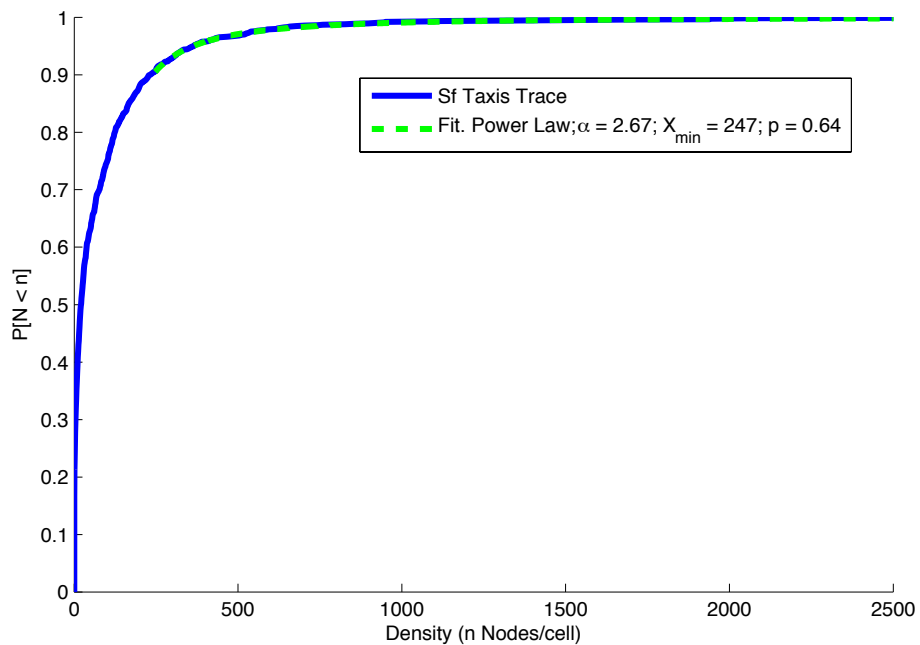


Figura 4. CDF da distribuição espacial dos nós para o *trace* de mobilidade de Taxis SF e o fitting da curva para um modelo que segue uma lei de potência.

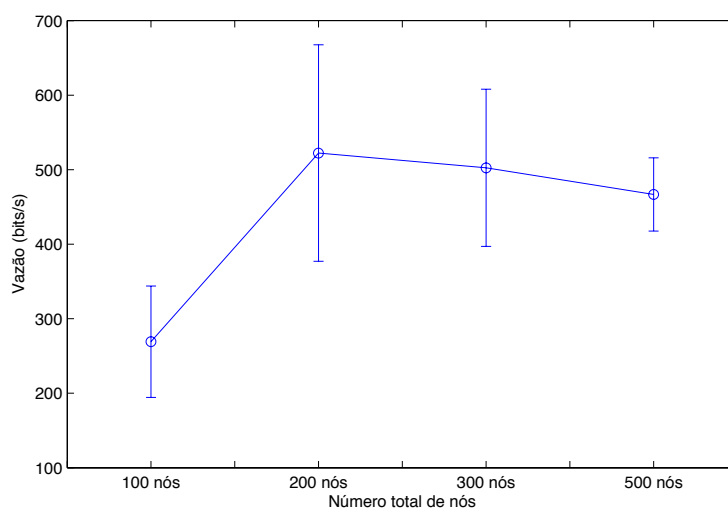
### 4.3. Impacto da Densidade

O objetivo desta seção é ilustrar o impacto da densidade em métricas básicas de funcionamento de rede. Tais métricas são: (1) *vazão*, média do número total de bits de dados

recebidos por um nó, dividido pelo tempo decorrido entre a recepção do primeiro bit do primeiro pacote e o instante da recepção do último bit do último pacote de dados pelo nó, (2) *retardo*, média do tempo decorrido entre a transmissão e a recepção dos pacotes de dados (recebidos com sucesso), e (3) *taxa de entrega de pacotes*, a razão entre o número total de pacotes recebidos e enviados por todos os nós.

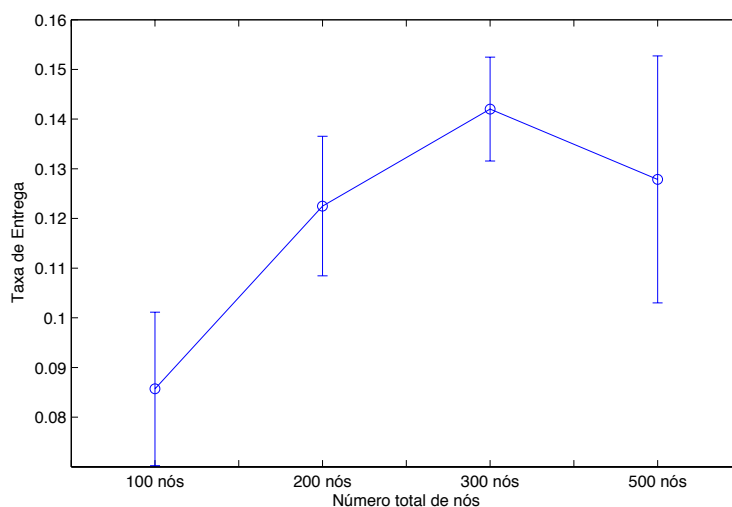
Para esta análise, escolheu-se o *trace* de mobilidade veicular [Piorkowski et al. 2009] como estudo de caso, por tratar-se de um cenário mais extenso com grande número de nós, e de forma que a variação da densidade e o seu impacto pudessem ser percebidos de forma mais representativa em uma simulação mais extensa. Neste cenário, foram definidos 4 valores de densidade diferentes para as simulações, refletindo o funcionamento da rede para uma condição diferente de densidade espacial. O número total de nós na simulação foi variado de forma a variar também a densidade total da rede real estudada. Os 4 valores de densidade (número de nós) possuem 100, 200 e 300 nós, além do último cenário com os 500 nós originalmente presentes no *trace* de mobilidade. Para os 3 valores de menor densidade, os nós foram escolhidos aleatoriamente. Devido a grande extensão do *trace* de mobilidade escolheu-se um período de 40000 segundos onde todos os 500 nós estavam presentes, e manteve-se essa a duração nas simulações realizadas.

O cenário de tráfego utilizado em nosso conjunto de simulações é composto de 30 fluxos CBR (*constant bit rate*) onde fonte e destino são escolhidos aleatoriamente entre os nós presentes em cada simulação. A movimentação dos nós não muda, dado que eles movem-se de acordo com o *trace* de mobilidade. Assim, de forma a gerar variações estatísticas para nossa avaliação, em cada rodada de cada cenário os pares fonte-destino dos fluxos foram também modificados aleatoriamente. Os fluxos iniciam-se em instantes escolhidos aleatoriamente ao longo da simulação e permanecem ativos até o fim da mesma, a uma taxa de transmissão de 4 pacotes por segundo.



**Figura 5. Vazão total sob diferentes condições de densidade, para 100, 200, 300 e 500 nós.**

O protocolo de roteamento utilizado nas simulações foi o AODV (*Ad-Hoc on-demand distance vector*) e o alcance do rádio foi definido em 150 metros, para uma taxa



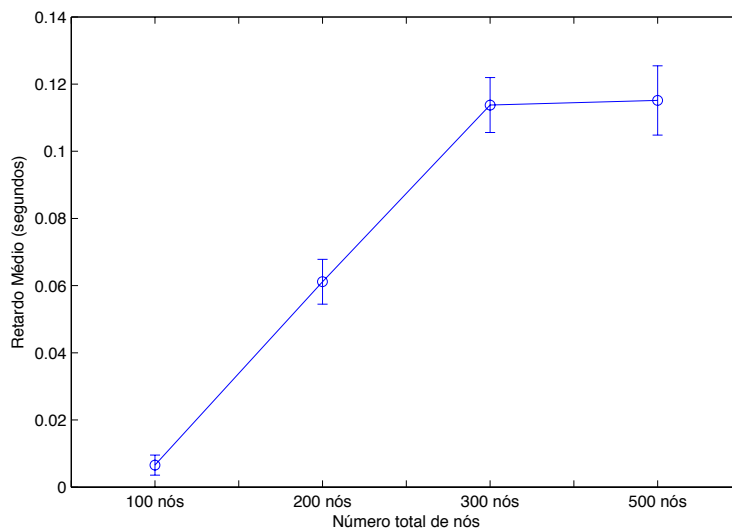
**Figura 6. Taxa de entrega total sob diferentes condições de densidade, para 100, 200, 300 e 500 nós.**

de transmissão de 54 Mbps utilizando o padrão IEEE802.11g.

A Figura 5 mostra a vazão total sob diferentes condições de densidade, onde é possível observar um impacto negativo no desempenho da rede para um aumento do número de nós e, conseqüentemente, aumento na disputa pelo meio. É possível perceber que o aumento do número de nós, apesar de proporcionar maiores possibilidades de rotas e aumento na taxa de entrega, como visto na Figura 6, não reflete ganho real na vazão onde a mesma permanece estatisticamente semelhante para 200, 300 e 500 nós. O único ganho real é quando dobra-se o número de nós de 100 para 200, uma vez que para 100 nós, o número de rotas é escasso e as perdas são grandes, diminuindo a taxa de entrega, como se pode notar na Figura 6.

Na Figura 7, pode-se observar que o retardo médio é menor para condições de densidade mais amenas (100 nós) e aumenta de acordo com o aumento da densidade. No entanto, esta métrica reflete apenas o retardo médio dos pacotes entregues com sucesso. A taxa de entrega para 100 nós é significativamente menor, onde os pacotes entregues, na sua maioria, são pacotes de fluxos cujos pares fonte-destino estão a poucos saltos de distância. Dado essa proximidade, o atraso para apenas 100 nós é menor. Já para redes mais densas, com o aumento no número de rotas e possibilidades dos pacotes percorrerem caminhos mais longos, estes pacotes entregues através de rotas compostas por mais saltos, contribuem para o aumento do retardo médio.

Novamente, assim como para as métricas de vazão e taxa de entrega mostradas nos gráficos anteriores - Figuras 5 e 6, respectivamente - é possível observar o forte impacto da densidade também sob a métrica do retardo médio das mensagens mostrada na Figura 7, onde o retardo médio das mensagens aumenta a medida que o número de nós na rede aumenta.



**Figura 7. Retardo médio sob diferentes condições de densidade, para 100, 200, 300 e 500 nós.**

## 5. Conclusão

O objetivo deste trabalho foi estudar a densidade de nós em redes reais e como essa densidade afeta o funcionamento de redes móveis reais, dado a importância desta métrica de mobilidade.

Foram analisados cenários reais de usuários movendo-se em uma área delimitada e a informação de densidade foi extraída. As concentrações de nós mostraram-se grandes em alguns poucos pontos. Estes eventos raros dão a distribuição de densidade, um aspecto de uma distribuição de cauda longa, onde muitos eventos de menor valor ocorrem com frequência grande, enquanto poucos eventos de valor maior ocorrem com pouca frequência.

É interessante no entanto, modelar tal distribuição com o objetivo de futuramente poder fazer uso da mesma na definição de modelos de mobilidade capazes de manter e formar *clusters* de nós móveis com distribuições semelhantes as encontradas em ambientes reais. Neste contexto, assumimos a hipótese de que as densidades medidas dos *traces* de mobilidade reais seguem uma lei de potência, e confirmamos tal hipótese através de métodos estatísticos extraídos da literatura.

Além da análise da densidade, foi realizado a análise de desempenho de rede, através de resultados obtidos por simulação, onde fluxos CBR foram gerados sobre os nós de um extenso *trace* de mobilidade de movimentação veicular. O número de nós foi variado a fim de se avaliar o impacto da densidade em métricas básicas de funcionamento da rede, tais como vazão, retardo e taxa de entrega de pacotes, onde percebeu-se que a densidade impacta fortemente o desempenho de redes sob as métricas apresentadas.

## Referências

Albert, R. and Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.*, 74(1):47–97, 2002.

- Balachandran, A., Voelker, G. M., Bahl, P., and Rangan, P. V. (2002). Characterizing user behavior and network performance in a public wireless lan. In *Proceedings of the 2002 ACM SIGMETRICS*, pages 195–205.
- Balazinska, M. and Castro, P. (2003). Characterizing mobility and network usage in a corporate wireless local-area network. In *Proceedings of MobiSys 2003*, pages 303–316.
- Bettstetter, C., Gyarmati, M., and Schilcher, U. (2007). An inhomogeneous spatial node distribution and its stochastic properties. In *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, MSWiM '07.
- Bettstetter, C., Resta, G., and Santi, P. (2003). The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2(3):257 – 269.
- Borrel, V., de Amorim, M. D., and Fdida, S. (2005). On natural mobility models. In WAC.
- Camp, T., Boleng, J., and Davies, V. (2002). A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2:483–502.
- Campos, C., Azevedo, T., Bezerra, R., and de Moraes, L. (2009). An analysis of human mobility using real traces. In *Proceedings of the 2009 IEEE WCNC*.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., and Newman, M. E. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Rev.*, 51(4):661–703.
- CRAWDAD. <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/>.
- Gyarmati, M., Schilcher, U., Brandner, G., Bettstetter, C., Chung, Y. W., and Kim, Y. H. (2008). Impact of random mobility on the inhomogeneity of spatial distributions. In *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*.
- Henderson, T., Kotz, D., and Abyzov, I. (2004). The changing usage of a mature campus-wide wireless network. In *In Proceedings of ACM MOBICOM 2004*, pages 187–201.
- Jardosh, A., Belding-Royer, E., Almeroth, K., and Suri, S. (2005). Real-world environment models for mobile network evaluation. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 23(3):622 – 632.
- Kim, M. and Kotz, D. (2006). Extracting a mobility model from real user traces. In *Proceedings of IEEE INFOCOM*.
- Lim, S., Yu, C., and Das, C. (2006). Clustered mobility model for scale-free wireless networks. In *Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on*.
- Mei, A. and Stefa, J. (2009). Swim: A simple model to generate small mobile worlds. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 2106 –2113.
- Musolesi, M. and Mascolo, C. (2007). Designing mobility models based on social network theory. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*, 11:59–70.
- Musolesi, M. and Mascolo, C. (2009). Mobility models for systems evaluation. In *Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications*, pages 43–62. Springer.
- Navidi, W. and Camp, T. (2003). Stationary distributions for the random waypoint mobility model. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3:99–108.

- Nunes, B. A. A. and Obraczka, K. (2011). On the invariance of spatial node density for realistic mobility modeling. In *Proceedings of the 2011 IEEE Eighth International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, MASS '11, pages 322–331, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Nunes, B. A. A. and Obraczka, K. (2012). Modeling spatial node density in waypoint mobility. In *Proceedings of the 2012 IEEE Ninth International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, MASS '12. IEEE Computer Society.
- Nunes, B. A. A., Obraczka, K., and Rodrigues, A. (2012). Saga: socially- and geography-aware mobility modeling framework. In *Proceedings of the 15th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, MSWiM '12, pages 367–376, New York, NY, USA. ACM.
- Piorkowski, M., Sarafijanovic-Djukic, N., and Grossglauser, M. (2009). CRAWDAD data set epfl/mobility (v. 2009-02-24). Downloaded from <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/epfl/mobility>.
- Tang, D. and Baker, M. (2000). Analysis of a local-area wireless network. In *Proceedings of the MobiCom 2000*, pages 1–10.
- The Scenario Generator. <http://isis.poly.edu/qiming/scengen/index.html>.