DIEGO BOGADO TOMASIELLO

**MODELOS DE REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO E INDIVIDUAL
PARA ESTUDOS DE ACESSIBILIDADE EM SÃO PAULO**

São Paulo

2016

MODELOS DE REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO E INDIVIDUAL PARA ESTUDOS DE ACESSIBILIDADE EM SÃO PAULO

Diego Bogado Tomasiello

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

ORIENTADORA: Profa. Dra. Mariana A. Giannotti

**São Paulo
2016**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Tomasiello, Diego Bogado

MODELOS DE REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO E INDIVIDUAL PARA ESTUDOS DE ACESSIBILIDADE EM SÃO PAULO / D. B. Tomasiello -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

104 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.TRANSPORTE PÚBLICO {SÃO PAULO (SP)} 2.ACESSIBILIDADE 3.SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA 4.REDE DE TRANSPORTE 5.TRANSPORTE INDIVIDUAL I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

À minha família e em especial minha mãe
Maria Bernadette

Agradecimentos

À minha orientadora Profa. Dra. Mariana Abrantes Giannotti pela oportunidade que me foi dada, confiança, inestimável apoio, orientação, motivação e crescimento proporcionado.

Ao Prof. Dr. José Alberto Quintanilha por ter contribuído com o meu desenvolvimento como pesquisador ao longo do mestrado.

À minha mãe Maria Bernadette e aos meus irmãos Rafael, Miguel e Marina por terem me apoiado na escolha de seguir carreira acadêmica.

À minha namorada Clarice Megale por toda paciência e compreensão ao longo dos anos de mestrado.

Ao aluno de doutorado Renato Arbex pelo apoio inestimável com ideias, revisões, processamentos, análise de dados, produção de mapas e aprendizado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa.

À empresa TomTom pela disponibilização da base de dados de transporte individual com informações de trânsito.

À empresa Maplink por fornecer a base de dados para avaliação dos resultados dessa pesquisa.

À empresa SPTrans pela disponibilização de dados para a realização da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Pedro Balestrassi por todo o incentivo e apoio.

Aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento (LABGEO) e das disciplinas pelo aprendizado e apoio.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da POLI-USP pelos ensinamentos.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da POLI-USP, em especial à Patrícia Santana por toda a ajuda.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2	OBJETIVO	2
2.1	Objetivos específicos	3
2.2	Organização do texto.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Mobilidade	4
3.2	Acessibilidade	5
3.3	Índices de acessibilidade	8
3.3.1	Medidas de acessibilidade baseadas na localização	10
3.3.2	Componentes das medidas de acessibilidade.....	13
3.4	Modelos de rede de transporte público e individual	15
3.4.1	Modelagem de redes.....	15
3.4.2	Comparativos de modelos de rede de transporte público e individual	16
4	MÉTODOS.....	20
4.1	Área de Interesse.....	20
4.2	Materiais Utilizados	21
4.3	Esquema conceitual das redes de transporte público e individual	21
4.3.1	Esquema conceitual das redes de transporte público	21
4.3.2	Esquema conceitual das redes de transporte individual	24
4.4	Modelagem dos sistemas de transporte público e individual em SIG	26
4.4.1	Modelagem do Sistema de Transporte Público	27
4.4.2	Modelagem do Sistema de Transporte Individual	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Resultados dos modelos de transporte simples	46
5.2	Resultados dos modelos de transporte avançados	49
5.3	Avaliação	73
5.3.1	Avaliação da rede de transporte individual	73
5.3.2	Avaliação das redes de transporte público	76
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	82
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relacionamento entre os quatro componentes e a acessibilidade.....	13
Figura 2. Esquema conceitual da rede de transporte público em OMT-G.	22
Figura 3. Esquema conceitual da rede de transporte individual em OMT-G.	25
Figura 4. Fluxo do trabalho	26
Figura 5. Diagrama do modelo de dados GTFS.	29
Figura 6. Vértices das linhas de transporte público.....	30
Figura 7. Linhas de transporte público.	30
Figura 8. Espacialização dos pontos de parada do transporte público.	31
Figura 9. Quebra das linhas de transporte de acordo com os pontos de parada.	32
Figura 10. Rede de transporte público com conectores.	33
Figura 11. Rede de transporte público com linhas de ônibus, trem e metrô.....	34
Figura 12. Fluxo de processamento dos dados GTFS.....	34
Figura 13. Fluxo de processamento dos dados do CEM.....	36
Figura 14. Fluxo de configuração da rede de transporte público simples.	38
Figura 15. Fluxo de configuração da rede de transporte público avançado.	39
Figura 16. Recorte geográfico da base de dados disponibilizada pela TomTom.....	40
Figura 17. Atributos de mão de direção.	41
Figura 18. Vias com atributos de elevação que se cruzam em níveis distintos.	42
Figura 19. Fluxo para elaboração da rede de transporte individual simples.....	43
Figura 20. Fluxo para elaboração do modelo de transporte individual avançado.	44
Figura 21. Recorte da rede de transporte público do município de São Paulo.	45
Figura 22. Recorte da rede de transporte individual do município de São Paulo.	46
Figura 23. Tempos de viagem por transporte público e individual.	47
Figura 24. Diferença do tempo de viagem por transporte público e individual nos modelos simples.....	48
Figura 25. Mapa de quantidade de empregos por bairros que pagam menos do que 4 salários mínimos por mês no ano de 2012.	50
Figura 26. Renda média da população por bairros do município de São Paulo.	52
Figura 27. Índice de acessibilidade potencial absoluta a empregos de baixa renda por transporte público em 2014.	54
Figura 28. Relação linhas de metrô e trem e índice de acessibilidade por transporte público em 2014.....	56
Figura 29. Índice de acessibilidade potencial absoluta a empregos de baixa renda por transporte individual em 2014.....	58
Figura 30. Índice de acessibilidade potencial absoluta a empregos de baixa renda por transporte público em 2015.	60
Figura 31. Índice de acessibilidade potencial absoluta a empregos de baixa renda por transporte individual em 2015.....	61
Figura 32. Índice MAG aplicado nos índices de acessibilidade de transporte público e individual para o ano de 2014.....	63
Figura 33. Índice MAG aplicado nos índices de acessibilidade de transporte público e individual para o ano de 2015.....	64

Figura 34. Percentual acumulado de acesso aos empregos de baixa renda em 30 minutos de viagem.	66
Figura 35. Percentual acumulado de acesso aos empregos de baixa renda em 60 minutos de viagem.	67
Figura 36. Percentual acumulado de acesso aos empregos de baixa renda em 120 minutos de viagem.	68
Figura 37. Comparativo de acesso aos empregos por tempo de viagem.	69
Figura 38. Comparativo entre áreas de serviço para três favelas.	71
Figura 39. Acesso a empregos em 1 hora de viagem por zona OD as 07:00 AM.	72
Figura 40. Distribuição de frequência da subtração dos tempos de viagem.	74
Figura 41. Avaliação da disparidade entre os tempos de viagem através da rede de transporte individual e os dados de rastreamento em módulo.	75
Figura 42. Distribuição de frequência da diferença entre os tempos de viagem do Google Maps pela rede de transporte público avançada de 2014.	78
Figura 43. Avaliação da disparidade entre os tempos de viagem obtidos através do Google e através da rede de transporte público de 2014, em módulo.	79
Figura 44. Distribuição de frequência da diferença entre os tempos de viagem do Google Maps pela rede de transporte público avançada de 2015.	80
Figura 45. Avaliação da disparidade entre os tempos de viagem obtidos através do Google e através da rede de transporte público de 2015, em módulo.	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Resultados do comparativo dos tempos de viagem das trinta rotas através das redes de transporte público e Google Maps.	79
Quadro 2. Estatísticas das diferenças de tempo de viagem e percentuais.	80

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo comparar a eficiência dos sistemas de transporte público e individual através da modelagem de redes em SIG. Foram revisados os conceitos de acessibilidade e indicadores de acessibilidade, modelos de rede de transportes, abordadas as etapas para criação dos modelos de rede, bases de dados utilizadas, configurações e atributos no sistema SIG. Os comparativos foram realizados através de dois níveis de detalhamento (simples e avançado) para as redes de transporte e elaborados índices de acessibilidade para os bairros do município de São Paulo através de parâmetros extraídos das redes modeladas. O estudo de caso consiste na medição de um índice de acessibilidade para empregos de baixa renda. Como resultado, os bairros centrais do município apresentam maior acessibilidade, porém, para o transporte público, alguns bairros fora da zona central também apresentaram alta acessibilidade devido à oferta de transporte público (metrô).

ABSTRACT

This study aims to compare the efficiency of the public and individual transportation systems by modeling networks in GIS environment. The concepts of accessibility, accessibility measures and transportation models were reviewed. The stages for modelling transportation networks, databases, configurations and attributes in the GIS system were specified. The comparison was carried out through two models with different detail levels (simple and advanced). Accessibility indexes were developed for the neighborhoods in the municipality of Sao Paulo using the parameters extracted from the models. The study case consists in calculating the accessibility measure for low income jobs. As a result, the central neighborhoods have greater accessibility, but for the public transportation system, few neighborhoods out of the central zone also shown high accessibility due to the high availability of public transportation (metro).

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A megacidade¹ de São Paulo, com aproximadamente 12 milhões de habitantes (IBGE,2015), convive com grandes desafios relacionados a criação de sistemas de transporte eficientes. Fatores como grande volume de viagens diárias aliados ao transporte público saturado, zonas de produção e de atração de viagens distantes entre si e grandes congestionamentos diários são alguns dos aspectos complexos que refletem sobre a eficiência do transporte e sobre a qualidade da mobilidade e acessibilidade na cidade de São Paulo.

Com o avanço das tecnologias de informação, comunicação e posicionamento, a possibilidade de medir os tempos de viagem através da utilização de dados de rastreamento de veículos tornou-se uma ferramenta importante para o planejamento de transportes. O rastreamento de veículos, sejam eles do sistema de transporte público ou individual, passou a ser algo comum. A sua popularização está, em grande parte, relacionada com a queda no custo de receptores GPS e novas tecnologias para processamento e armazenamento de grandes volumes de dados, que possibilitaram a disseminação de soluções de rastreamento tanto a nível corporativo quanto individual.

Índices de acessibilidade, que tradicionalmente eram baseados em estimativas de tempos de viagem ou simplesmente usavam a distância como parâmetro para o seu cálculo, podem ser obtidos a partir de tempos de viagem medidos pelo rastreamento, o que permitiria a obtenção de cenários mais realistas para pesquisas e planejamento em transporte.

A utilização dos dados de rastreamento de veículos para a modelagem e manutenção de redes de transporte em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é um desafio, visto que envolve grandes volumes de dados espaço-temporais, que precisam ser tratados para a incorporação nos modelos de rede. A modelagem de redes de transporte dinâmicas, que permitam identificar trajetos e tempos de viagem em horários e períodos distintos, retratando alterações ocasionadas por intervenções nas vias e/ou alterações nos itinerários das linhas de transporte, pode

¹ Segundo a ONU (2012) uma megacidade é aquela cidade que possui mais de 10 milhões de habitantes.

ampliar a compreensão da dinâmica da evolução do sistema de transportes em uma cidade.

A acessibilidade é definida por Cervero (1996) como a facilidade de acesso aos locais, enquanto a mobilidade é simplesmente a facilidade para se movimentar (Levine *et al.*, 2012). Os conceitos de acessibilidade e mobilidade são fundamentais para entender a dinâmica de uma área de interesse, pois revelam características específicas do sistema de transporte a ser estudado.

A componente espacial na avaliação dos sistemas de transportes é de fundamental importância, pois a forma como um município foi ocupado e a maneira como o sistema de transporte está inserido nesse contexto condizem com seus índices de acessibilidade e mobilidade (Levine *et al.*, 2012).

Diante desses desafios, este trabalho tem como motivação a contribuição para metodologias de modelos de redes de transporte que tornem as análises subsequentes, de acessibilidade e mobilidade, mais condizentes com a realidade. Para tal, além da própria modelagem da rede que incorpore o dinamismo supramencionado, que por si só já constitui um grande desafio, pretende-se aplicá-la no cálculo de índices de acessibilidade com o objetivo de avaliar a desigualdade existente na acessibilidade proporcionada pelos modos de transporte público e individual na cidade de São Paulo.

2 OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo o desenvolvimento de modelos de redes de transporte público e individual para estudos de acessibilidade, considerando tempos de viagem obtidos a partir do rastreamento de veículos, de modo a incluir flexibilidade no modelo de redes para incorporar a dinâmica espacial e temporal dos dados.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Criação dos modelos de rede de transporte público e individual para os anos de 2014 e 2015 no município de São Paulo;
- Criação do modelo de rede multitemporal;
- Validação dos modelos de rede;
- Aplicação de índice de acessibilidade;
- Elencar desigualdades na acessibilidade dos modos público e individual;
- Avaliar a evolução temporal da acessibilidade do transporte público entre 2014 e 2015 no município de São Paulo.

2.2 Organização do texto

O texto é organizado da seguinte forma:

- Revisão Bibliográfica sobre:
 - Mobilidade;
 - Acessibilidade;
 - Índices de acessibilidade;
 - Modelos de rede de transporte público e individual.
- Métodos:
 - Área de interesse;
 - Materiais utilizados;
 - Modelos conceituais das redes de transporte em formato OMT-G;
 - Modelagem dos sistemas de transporte público e individual em SIG.
- Resultados e discussões;
- Avaliação;
- Referências Bibliográficas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mobilidade

Para Tagore e Sikdar (1995) mobilidade urbana pode ser interpretada como a capacidade dos indivíduos se moverem de um local para outro a depender do desempenho do sistema de transportes (disponibilidade, frequência, tempo de espera, etc) e características do indivíduo (renda, veículo próprio, recursos que o indivíduo pode gastar na viagem, etc). Para Sales Filho (1997), a mobilidade está relacionada com os deslocamentos diários de pessoas no espaço. O autor cita que não apenas a ocorrência efetiva de sua viagem deve ser considerada, mas também sua facilidade ou possibilidade de ocorrência. Já para Rosado e Ulysséa Neto (1999) a mobilidade “traduz o grau de impedância do deslocamento”, ou seja, é considerada como o grau de dificuldade/restrrição que um usuário do sistema de transporte encontra para se locomover. Levine *et al.* (2012) diz que mobilidade é definida como a facilidade para se movimentar.

Segundo Giannotti *et al.* (2007), “a crescente quantidade de tecnologias de coleta de posicionamento, tal como o sistema GPS, redes de celular, entre outros, está possibilitando a coleta de grandes volumes de dados espaço-temporais e permitindo a descoberta de comportamentos do movimento que levam a novas aplicações e serviços”. Padrões espaço-temporais que possibilitem a visualização do deslocamento de uma população ou objetos são abstrações que ajudam no entendimento do fenômeno de mobilidade (Giannotti *et al.*, 2007).

Para Giannotti *et al.* (2011), o grande volume de dados, coletado através de dispositivos móveis como celulares e navegadores GPS, podem ajudar no entendimento da mobilidade humana e na descoberta de padrões e modelos que caracterizem as trajetórias diárias de atividades que realizamos. Segundo Wang *et al.*, (2011), atualmente a coleta de dados mais completa sobre a mobilidade humana e interações sociais é realizada por companhias de telecomunicações. Os telefones celulares, que possuem quase 100% de penetração em países industrializados, são carregados por seus donos ao longo de toda sua rotina diária, o que os torna o proxy mais abrangente existente no momento (Wang *et al.*, 2011). As operadoras de telefonia móvel gravam, por motivo de cobrança, as torres de telefonias mais

próximas aos aparelhos todas as vezes que os usuários os utilizam, sendo os movimentos dos indivíduos capturados com detalhes (Wang *et al.*, 2011).

As principais ferramentas analíticas da engenharia de transportes, como a matriz origem-destino, são baseadas em dados coletados via entrevistas e pesquisas de campo. As entrevistas e pesquisas de campo possuem uma série de limitações, principalmente relacionadas ao seu custo, periodicidade, obsolescência rápida, falta de completeza e falta de acurácia (Giannotti *et al.*, 2011). A falta de informações semânticas ou de contexto de grandes volumes de dados de mobilidade tornam a sua utilização, na substituição dos métodos tradicionais de pesquisa, como sendo algo não elementar, apesar de representarem fidedignamente as atividades, que são coletadas de maneira contínua e em tempo real (Giannotti *et al.*, 2011).

Ainda segundo Giannotti *et al.* (2011), existe um longo caminho a ser percorrido para que os dados GPS brutos possam ser utilizados como representações úteis sobre o comportamento de mobilidade, sendo necessário um processo de descoberta de conhecimento de mobilidade (*mobility knowledge discovery process*), que se baseia na integração entre consultas e mineração de dados, orientados pelo conceito de trajetória.

Carruthers e Lawson (1995) citam que é necessário distinguir acessibilidade de mobilidade.

3.2 Acessibilidade

A acessibilidade é um conceito que tem sido utilizado para o planejamento do território e modelagem espacial a mais de cinquenta anos (Geurs *et al.*, 2015). É um consenso que a interação entre dois locais diminui com o aumento da desutilidade (distância, tempo e custo) entre eles, mas sua interação aumenta de acordo com a quantidade de atividades em cada local (Isard, 1956). Sua origem remonta aos anos de 1920, quando Reilly (1929) formulou a “lei da gravitação do varejo”. Mais tarde Stewart (1948) formulou as definições de força demográfica, energia e potencial, agora chamados de acessibilidade (Hansen, 1959). Segundo Batty (2009), a

acessibilidade era utilizada para o planejamento econômico regional e aplicada na teoria da localização.

Hansen (1959), foi o primeiro a relacionar o conceito de acessibilidade ao potencial de interação com oportunidades e o utilizou para o cálculo da previsão de desenvolvimento de novos empregos na cidade de Washington. Desde então as análises de acessibilidade passaram a ser empregadas em questões de interações espaciais, dando origem aos modelos de interação espacial. Os modelos de interação espacial relacionam acessibilidade, economia, demografia e transportes e foram utilizados em diversos contextos (Geurs *et al.*, 2015). Anas (1983) formalmente demonstrou a equivalência entre as teorias dos modelos de interação espacial e os modelos de microeconomia logit. Nos anos 80, Weibull (1980), que considerou a acessibilidade como uma propriedade da configuração espacial das oportunidades de interação espacial, antecipou a relevância de se utilizar conceitos de conectividade e topologia para as análises de acessibilidade. Nas últimas décadas, estudos relacionados a acessibilidade foram utilizados em diversas áreas de pesquisa, como geografia urbana e rural, engenharia de transportes, economia espacial e geografia da saúde (Geurs *et al.*, 2015).

Recentemente, os estudos de modelagem de acessibilidade estão focados no detalhamento do uso e ocupação do solo, seguindo a tendência de desenvolvimento de modelos mais complexos e desagregados (Geurs *et al.*, 2015). Apesar dos esforços no detalhamento do uso e ocupação do solo, ainda existe uma carência de pesquisa sobre o relacionamento dinâmico entre o uso e ocupação do solo e acessibilidade. Pesquisas sobre a interação entre o uso e ocupação do solo e transportes (LUTI) são muito importantes na área de transportes, vide trabalhos realizados por McLoughlin (1969), Wilson *et al.* (1977), Foot (1981), Webster *et al.* (1988) e de la Barra (1989). A nova geração de modelos de acessibilidade tem se beneficiado da tecnologia geoespacial como, por exemplo, as análises em transportes propiciadas pela *Geographic Information Science for Transport Analysis (GIS-T)*, que são ferramentas poderosas para a visualização e modelagem da acessibilidade (Thill, 2009). Outra tendência para as linhas de pesquisa em acessibilidade é a utilização de portais web e aplicativos para o mapeamento de equipamentos locais que afetam a acessibilidade, conforme trabalhos realizados por Páez *et al.* (2013).

Com relação ao conceito de acessibilidade, Davidson (1995) define que ela consiste na facilidade com que cada pessoa, em um dado ponto, pode ter acesso, via sistema de transporte, a todos os outros lugares em uma área definida, considerando as variáveis de atratividade e o custo percebido para atingi-los. O autor complementa inferindo que localidades com maior acessibilidade tenderão a ser mais atrativas do que localidades com menor acessibilidade, o que irá refletir em sua valorização.

Levine (1998) considera que a lógica da acessibilidade está mais associada à busca da capacidade de atingir destinos de interesse do que ao movimento em si. Assim, onde os destinos estão mais próximos, a acessibilidade é maior, mesmo se a velocidade da viagem for menor. Para Sales Filho (1998) a acessibilidade tem muito mais significado para o planejamento regional, urbano e de transporte do que apenas modelos de demanda ou de previsão do uso e ocupação do solo. Com isso o autor ressalta a importância de considerar a acessibilidade no planejamento do sistema de transporte. Reforçando a sua importância, Arruda (1999) considera que “o conceito de acessibilidade é, em certo grau, intuitivo e de grande importância para se avaliar intervenções de transportes”.

A acessibilidade pode ser definida, de uma forma geral, como sendo uma medida de esforço para se transpor uma separação espacial, caracterizada pelas oportunidades apresentadas ao indivíduo ou grupo de indivíduos, para que possam exercer suas atividades considerando o sistema de transporte (Raia Júnior, 2000). Para Páez *et al.* (2012), a acessibilidade, definida como o potencial para alcançar oportunidades espacialmente distribuídas (como empregos, lazer, interações sociais, entre outros), pode ser considerada uma das principais saídas do desenvolvimento espacial, sendo o resultado cruzado da rede de transportes e a distribuição geográfica das oportunidades. Owen e Levinson (2015) descrevem que a acessibilidade combina o conceito de mobilidade com o entendimento de que a viagem é motivada pelo desejo de se atingir destinos.

Desta forma, a acessibilidade pode ser entendida como uma medida associada ao território, enquanto que mobilidade está relacionada ao indivíduo e sua capacidade de deslocamento e movimentação.

3.3 Índices de acessibilidade

A acessibilidade é um conceito que pode ser abordado de diversas maneiras, não sendo possível caracterizá-la em sua totalidade por um único índice (Scheurer e Curtis, 2007). Para Litman (2003), “não existe uma forma de medir o desempenho de transportes que seja, ao mesmo tempo, conveniente e completa”. Apesar da dificuldade em definir um índice que possa caracterizar a acessibilidade, Geurs e van Wee (2004) recomendam que os índices de acessibilidade devam ter os seguintes comportamentos, independentemente de sua perspectiva:

1. “A acessibilidade deve refletir alterações de oportunidade de viagem, sua qualidade e impedimento: se o nível de serviço (tempo de viagem, custo, esforço) de qualquer modo de transporte em uma área aumentar (diminuir), a acessibilidade deve aumentar (diminuir) para qualquer atividade naquela área, ou para qualquer ponto dentro daquela área”;
2. “A acessibilidade deve refletir alterações no uso e ocupação do solo: se o número de oportunidades para uma atividade aumentar (diminuir) em qualquer local, a acessibilidade para aquela mesma atividade deve aumentar (diminuir) de qualquer local”;
3. “A acessibilidade deve refletir alterações em restrições ou demandas por atividades: se a demanda por oportunidades, para uma atividade com restrições de capacidade, aumentar (diminuir), a acessibilidade para aquela atividade deve diminuir (aumentar)”;
4. “A acessibilidade deve ser sensível a restrições e recursos: o aumento do número de oportunidades para uma atividade, em qualquer local, não deve alterar a acessibilidade daquela atividade para um indivíduo (ou grupo de indivíduos) que não é capaz de participar da atividade devido ao seu tempo”;
5. “A acessibilidade deve ser sensível ao acesso pessoal e oportunidades: melhorias em um modo de transporte ou aumento no número de oportunidades para uma atividade não deverão alterar a acessibilidade para um indivíduo (ou grupo de indivíduos) com recursos insuficientes (habilitação de motorista, nível de ensino) para utilizar o modo de viagem ou participar da atividade”.

A infraestrutura de transporte é frequentemente citada como um fator importante em processos de regeneração de territórios devido a grande associação entre o aumento da acessibilidade e o crescimento da atividade econômica (Mejia-Dorantes e Lucas, 2014). Dois exemplos importantes de regeneração são a construção do Metrosur (Metrosur, 2015), que é a linha 12 do metrô de Madrid, e a extensão da *Jubilee line* (Jubilee, 2015) que é uma das linhas do metrô de Londres. Em ambos os casos a construção da infraestrutura de transporte impactou economicamente a região, estimulando a criação de novas ofertas de atividades (Mejia-Dorantes e Lucas, 2014). Esses são exemplos de como a infraestrutura de transporte pode ser utilizada para gerar novas ofertas de atividades, ao invés de simplesmente conectar as demandas às ofertas já existentes.

Bertolini *et al.* (2005) discute como deve ser o processo de desenvolvimento de um índice de acessibilidade adequado, tanto para o contexto acadêmico, quanto para os tomadores de decisão. Os autores descrevem que o índice deve ser consistente com a percepção dos residentes, usuários, trabalhadores e visitantes da área e deve ser entendível para os tomadores de decisão. Os autores citam que o maior desafio metodológico é balancear uma medida que seja teoricamente e empiricamente consistente e, ao mesmo tempo, simples o suficiente para ser empregada por tomadores de decisão.

É importante distinguir os conceitos de acessibilidade individual e locacional, sendo o primeiro conceito relacionado a caracterização da facilidade com que os viajantes alcançam seus destinos e o segundo examina a acessibilidade como um fenômeno espacial, considerando custos e benefícios das viagens oferecidas pelo sistema de transportes entre as origens e destinos de interesse (Owen e Levinson, 2015). Segundo Horner (2004), medidas de acessibilidade individual são, geralmente, dados pobres para avaliar a estrutura intra-urbana de transportes, enquanto medidas de acessibilidade locacional são úteis para o entendimento do relacionamento entre transportes e uso do solo. Geurs e van Wee (2004) criaram uma taxonomia de medidas de acessibilidade divididas em quatro categorias:

- i. “Medidas baseadas na infraestrutura de transportes, através da análise do seu desempenho ou do nível de serviço”;

- ii. “Medidas baseadas na localização, analisando a acessibilidade de atividades distribuídas espacialmente, normalmente em um nível agregado”;
- iii. “Medidas baseadas nos indivíduos, que consideram a geografia de espaço-tempo, analisando a acessibilidade ao nível de indivíduos”; e
- iv. “Medidas baseadas na utilidade, analisando os benefícios de pessoas com diferentes níveis de acessibilidade às atividades espacialmente distribuídas”.

Para o presente trabalho, foram exploradas medidas de acessibilidade baseadas na localização, por esse motivo, será dado maior enfoque nesses índices.

3.3.1 Medidas de acessibilidade baseadas na localização

As medidas de acessibilidade baseadas na localização são empregadas na análise das oportunidades disponíveis, considerando suas distribuições espaciais e a impedância de viagem entre as origens e destinos (Geurs e van Eck, 2001). As medidas mais complexas incorporam efeitos de competição, através de restrições de capacidade nas atividades ofertadas (Geurs e van Wee, 2004).

As medidas de acessibilidade baseadas na localização possuem a vantagem de mensurar a eficiência da rede de transportes em conjunto com o uso e ocupação do solo, por esse motivo elas podem ser consideradas medidas complementares às de infraestrutura (Geurs e van Eck, 2001). As medidas baseadas em localização podem ser abordadas através de quatro enfoques: medidas de acessibilidade baseadas na distância (*distance or contour accessibility measures*); medidas de acessibilidade potencial (*potential accessibility measures*); medidas de acessibilidade potencial adaptada (*adapted potential accessibility measures*); e medidas que consideram as interações espaciais (*balancing factors of spatial interactions*) (Geurs e van Wee, 2004).

No presente trabalho foi aplicada uma medida de acessibilidade potencial e, por esse motivo, serão detalhadas essas medidas.

Medidas de acessibilidade potencial:

As medidas de acessibilidade potencial (*potential accessibility measures*), são baseadas nos trabalhos pioneiros de Stewart (1947) e Hansen (1959). Derivadas do modelo gravitacional (*gravity-based measures*), estimam a acessibilidade de oportunidades em uma zona i para todas as outras zonas (n) considerando que quanto menor a oportunidade e mais distante, menor a sua influência (Geurs e van Wee, 2004). Segundo Baradaran e Ramjerdi (2001) as medidas de potencial de oportunidades ou gravitacionais são, sem dúvida, as técnicas mais utilizadas dentre todas as técnicas de medidas de acessibilidade. O índice pode ser descrito pela seguinte fórmula (Hansen, 1959):

$$A_{1-2} = \frac{S_2}{T_{1-2}^x}$$

Onde:

A_{1-2} é o índice de acessibilidade relativa da zona 1 em relação a atividade localizada na zona 2;

S_2 corresponde ao tamanho da atividade na zona 2. Por exemplo, número de empregos, pessoas, etc.;

T_{1-2} corresponde ao tempo de viagem ou distância entre as Zonas 1 e 2;

x é o expoente que descreve os efeitos do tempo de viagem entre as zonas.

Quando consideradas mais do que duas zonas, a fórmula pode ser generalizada da seguinte maneira:

$$A_i = \sum_{j=1}^n \frac{W_j}{f(C_{ij})}$$

Onde:

A_i é a medida de acessibilidade na zona i para todas as oportunidades W na zona j ;

$f(C_{ij})$ é uma função que tem como argumento um custo (tempo ou distância) entre as zonas i e j ;

A função de custo, que é calculada para representar a dificuldade de transporte entre as zonas, pode ser uma exponencial negativa, conforme a fórmula:

$$A_i = \sum_{j=1}^n D_j e^{-\beta c_{ij}}$$

Onde:

A_i é a medida de acessibilidade na zona i para todas as oportunidades D na zona j ;

c_{ij} é o custo da viagem entre as zonas i e j ;

β é o parâmetro de sensibilidade ao custo.

Segundo Geurs e van Wee (2004), a função de custo utilizada tem uma influência significativa na medida de acessibilidade. Por esse motivo, ela deverá ser escolhida com cuidado e seus parâmetros devem ser estimados utilizando dados empíricos recentes do comportamento do tempo de viagem na área de estudo. Segundo Handy e Niemeier (1997), a função exponencial negativa é a mais utilizada e relacionada com a teoria de comportamento de viagem.

As medidas de acessibilidade potencial superam algumas das deficiências das medidas de isócronas (*contour measures*), pois elas avaliam os efeitos combinados dos elementos do uso e ocupação do solo e transportes, e incorporam as percepções das pessoas na função de custo (Geurs e van Wee, 2004). As medidas podem ser utilizadas como indicadores sociais por permitir a análise do nível de acesso de diferentes grupos socioeconômicos a oportunidades econômicas e sociais (Geurs e van Wee, 2004). Ainda segundo Geurs e van Wee (2004), as medidas de acessibilidade potencial também podem ser empregadas na avaliação espaço-econômica de projetos de transporte.

As desvantagens das medidas potenciais estão relacionadas à maior dificuldade para interpretação e comunicabilidade, pois as medidas não são facilmente interpretadas e comunicadas devido à combinação de elementos de uso e ocupação do solo, transportes e peso das oportunidades (Geurs e van Wee, 2004). Outras desvantagens estão relacionadas com a falta de efeitos de competição e restrições temporais.

3.3.2 Componentes das medidas de acessibilidade

As medidas de acessibilidade podem ser agrupadas em quatro componentes, sendo elas: componente de transporte; de uso e ocupação do solo; temporal; e individual (Geurs e van Eck, 2001). A Figura 1 ilustra o relacionamento entre os componentes.

Figura 1. Relacionamento entre os quatro componentes e a acessibilidade.

Fonte: Geurs e van Eck (2001).

“A componente de transporte reflete a desutilidade enfrentada por indivíduos ou grupos para percorrer a distância de sua origem até seu destino se utilizando de um modo de transporte específico, sendo expressa em quantidade de tempo, custo e/ou esforço” (Geurs e van Eck, 2001). Os autores citam que a componente de transporte consiste de três elementos, sendo eles: a oferta de infraestrutura, sua localização e características; a demanda de passageiros e cargas; e as características resultantes do uso da infraestrutura, que é a comparação entre a oferta de infraestrutura e

demanda de viagem, permitindo a espacialização do tráfego, tempo de viagem, custos e esforço para atingir um destino.

A componente de uso e ocupação do solo expõe a quantidade, qualidade e características das atividades distribuídas espacialmente. Segundo Geurs e van Eck (2001) a distribuição espacial das atividades ofertadas e da sua demanda influenciam no seu nível de acessibilidade, principalmente se elas possuem limitações de capacidade, como é o caso de empregos, escolas e hospitais. O resultado da interação entre a oferta e a demanda por atividades/oportunidades, também conhecida como efeito de competição, pode influenciar o nível de acessibilidade para atividades específicas. Devido a isso, a competição é um fator relevante a ser considerado em análises de acessibilidade, como parte da componente de uso e ocupação do solo (Geurs e van Eck, 2001).

“A componente temporal expõe a disponibilidade de atividades nas diferentes horas do dia como, por exemplo, horário comercial, e os horários em que indivíduos participam de atividades específicas como trabalho e recreação” (Geurs e van Eck, 2001). Os autores citam que a componente temporal da acessibilidade se origina dos estudos de espaço-tempo do sistema de atividades urbanas de Hägerstrand (1970) e Chapin (1974), em que áreas potenciais poderiam ser atingidas dadas restrições de tempo pré-estabelecidas.

“A componente individual reflete as necessidades, habilidades e atividades de indivíduos” (Geurs e van Eck, 2001). Segundos os autores, as necessidades dos indivíduos dependem de características como idade, renda, nível educacional e localização de suas casas. As habilidades estão relacionadas ao estado físico do indivíduo, como idade e deficiências, e acesso aos modos de transporte, que pode se restringir caso o indivíduo não possua habilitação ou carro. As atividades dependem da renda do indivíduo, tempo disponível, nível educacional entre outros fatores. Os autores afirmam que as características individuais influenciam consideravelmente o nível de acesso a atividades econômicas e sociais. “Em geral, a componente individual é incorporada em indicadores de acessibilidade através da estratificação da população de acordo com a seleção de características relevantes como, por exemplo, idade e gênero” (Geurs e van Eck, 2001).

3.4 Modelos de rede de transporte público e individual

3.4.1 Modelagem de redes

Segundo Laurini e Thompson (1992), o mundo é composto por “coisas” (“*things*”) denominadas de entidades. As entidades representam diversos elementos do mundo real como, por exemplo, vias, parques, casas, etc. Para que possam ser realizadas análises é necessário que as entidades sejam agrupadas e que definam um modelo abstrato denominado modelo conceitual. De acordo com Goodchild (1992), os modelos conceituais mais utilizados são os baseados em objetos (*object-based model*) e os baseados em campos (*field-based model*).

Os modelos conceituais baseados em objetos consideram que as entidades são representadas por objetos discretos, distintos e demarcáveis (Okabe e Sugihara, 2012). Segundo Laurini e Thompson (1992), os modelos baseados em objetos apresentam elementos geométricos (pontos, linhas, áreas e sólidos) e características abstratas (atributos).

Os modelos conceituais baseados em campos (*field based model*) são aqueles em que as entidades são representadas por funções ou vetores de atributos em um espaço contínuo (Longley *et al.*, 2005). Os atributos podem ser representados por valores nominais, ordinais, funções binárias, dentre outros valores. Os modelos conceituais são principalmente utilizados para representar elevações, precipitação, pressão barométrica, declividade e assim em diante (Okabe e Sugihara, 2012).

Segundo Borges *et al.*, (2005), as redes podem ser representadas através do modelo OMT-G através de uma classe de objeto que, além das propriedades geométricas, representa as suas propriedades topológicas. Assim como na teoria dos grafos, essas propriedades estão presentes em classes descendentes que representam nós e arcos.

Os arcos de uma rede podem ser unidirecionais ou bidirecionais, sendo que a orientação dos segmentos traduz o sentido do fluxo da rede (Borges *et al.*, 2005). Redes de transporte, quando criadas para representar o sentido do fluxo de veículos, são constituídas de segmentos unidirecionais (vias de mão única) e bidirecionais (vias de mão dupla). Já as redes de esgoto, que geralmente utilizam a

gravidade para o escoamento do esgoto, possuem segmentos com orientação unidirecional, enquanto que redes de telecomunicações são formadas apenas por segmentos bidirecionais.

Para a composição dos modelos de rede devem ser consideradas as restrições de integridade espacial. Segundo Borges *et al.*, (2005), as estruturas de dados de redes (formadas por arcos e nós – unidirecionais ou bidirecionais) estão sujeitas às restrições usuais impostas aos grafos. Considerando as redes formadas por arcos e nós, como as criadas nesta pesquisa, seja $G = \{N, A\}$ uma estrutura de rede, formada por um conjunto de nós $N = \{n_0, n_1, \dots, n_p\}$ e um conjunto de arcos $A = \{a_0, a_1, \dots, a_q\}$, os membros de N e A se relacionam com as seguintes restrições (Borges *et al.*, 2005):

- Para cada nó $n_i \in N$ deve existir pelo menos um arco $a_k \in A$;
- Para cada arco $a_k \in A$ devem existir exatamente dois nós $n_i, n_j \in N$.

Através das redes geométricas, podem ser realizadas análises no espaço da rede (*network space*), ou seja, análises espaciais considerando os arcos e os nós ao invés do plano cartesiano. Além de análises espaciais, as redes possibilitam a compreensão e a visualização dos atributos geométricos e topológicos de um objeto (Okabe e Sugihara, 2012). Uma vez criada a rede, análises de roteirização como, por exemplo, identificação de rotas mais curtas ou mais rápidas, podem ser realizadas (de Smith *et al.*, 2015), bem como o cálculo de matrizes de tempo de viagem entre todos os pares de nós origem-destino, que podem ser a base para vários tipos de estudos na área de planejamento de transportes, dentre os quais, estudos de acessibilidade.

3.4.2 Comparativos de modelos de rede de transporte público e individual

A criação de modelos de comparação de tempo e distância de viagens que consideram o transporte público e de transporte individual é objeto de estudo de poucos autores (Salonen e Toivonen, 2013). Os estudos que avaliaram a acessibilidade, através de vários modais implantados, mostram que para os Estados Unidos e Europa a maioria das áreas urbanas apresentam uma acessibilidade maior

para o transporte individual (carro) do que para o transporte público (Hess, 2005; Kawabata, 2003; Kawabata e Shen, 2007; Levinson, 1998; Shen, 2001; Silva e Pinho, 2010). Segundo Kwok e Yeh (2004) Hong Kong é uma das únicas exceções no mundo, pois a acessibilidade por transporte público é consideravelmente superior à acessibilidade por transporte individual (carro).

Utilizar o sistema de transporte individual é uma experiência muito diferente da de se utilizar o sistema de transporte público: “o carro está disponível a qualquer momento, enquanto que o sistema de transporte público possui horários específicos de serviço; um passageiro de trem ou metrô pode ler um livro enquanto um motorista não; um passageiro de ônibus pode conversar com outros passageiros, enquanto que o motorista está relativamente isolado” (Owen e Levinson, 2015). Devido às diferenças entre os sistemas de transporte público e individual, eles são considerados modos distintos, porém compartilham do mesmo propósito que é permitir que pessoas alcancem seus destinos pagando um custo em tempo/dinheiro (Owen e Levinson, 2015). Quando visto por este ponto, os sistemas de transporte podem ser comparados através de duas dimensões: conjunto de destinos que podem ser acessados; e o custo para acessar esses destinos (Owen e Levinson, 2015).

O cálculo de tempo de viagem através de redes requer dois tipos de informações: dados que descrevam a estrutura da rede; e dados que descrevam o custo de viagem ao longo dos arcos da rede (Owen e Levinson, 2015). Até meados dos anos 2000, a avaliação da acessibilidade em sistemas de transporte público era realizada, geralmente, através de representações simplificadas da rede de transporte. Segundo Owen e Levinson (2015), os tempos de viagem eram estimados ao invés de calculados, pois eram atribuídos valores como médias de velocidade; frequência de viagens; e horas de serviço para uma linha de ônibus específica.

Silva e Pinho (2010) realizaram um estudo de acessibilidade na região metropolitana de Porto (Portugal) comparando três tipos de modo de viagem: transporte individual (carro); caminhada; e transporte público. A técnica utilizada foi o *Structural Accessibility Layer* (SAL) considerando dados espaciais de setores censitários (área média de 0,06 km²). Foram calculados o índice *DivAct*, para cada um dos modos de transporte, as categorias de acessibilidade resultantes e os

clusters. Foram consideradas dezoito atividades diferentes como geradoras de viagem, dentre elas: emprego; escola; lazer; compras; e saúde. Os limites de acessibilidade foram estipulados de acordo com o tempo de viagem, que foram escolhidos de acordo com tempos reais medidos para cada modo de transporte. Para o transporte individual, foi considerada a acessibilidade para atividades dentro de 30 minutos de viagem, para caminhada 20 minutos e para transporte público 45 minutos (considerando no máximo 2 transferências, distância entre transferências de até 100 metros e tempo de espera na transferência de no máximo 5 minutos). As condições de mobilidade foram calibradas de acordo com valores médios de viagem para caminhada, cada rota do transporte público e individual (considerando congestionamentos e hierarquia viária).

O resultado do estudo mostra que através do modo caminhada, principalmente o centro urbano de Porto apresenta alta acessibilidade. Já quase metade da área de estudo não tem acesso ao serviço de transporte público. Apesar disso, a sua população representa apenas 15% da população total. Outro resultado importante é que 71% da população da região metropolitana de Porto está localizada em regiões de máxima acessibilidade às atividades consideradas através do transporte público. Com relação ao modo de transporte individual, 87% da área de estudo, o que representa 98% da população, apresenta alta acessibilidade.

Salonen e Toivonen (2013) afirmam que diversas premissas simplificadoras são consideradas quando modeladas redes de transporte. A tomada de decisões sólidas sobre os dados, parâmetros e premissas com relação às análises de tempo de viagem, é de fundamental importância para a confiabilidade dos resultados (Salonen e Toivonen, 2013). Segundo as autoras, muitos países mantêm e disponibilizam bases de dados de rodovias e arruamento com uma série de atributos (limites de velocidade, mão de direção, etc) e que as ferramentas de SIG permitem extrair facilmente informações de tempo de viagem através desses dados, porém essa abordagem ignora os efeitos de congestionamentos. Estudos realizados por Yiannakoulias *et al.* (2013) avaliaram os efeitos de inclusão de dados de congestionamento e penalidades por manobra no cálculo do tempo de viagem em Edmonton (estado de Alberta no Canadá) e concluíram que os tempos de viagem absolutos foram drasticamente alterados ao incluir esses fatores no modelo de transporte individual.

Com relação aos modelos de transporte público, a introdução do *General Transit Feed Specification* (GTFS) em 2005 (Google, 2015) possibilitou uma maior disseminação das informações de horários de transporte (Owen e Levinson, 2015). Trabalhos como os realizados por Krizek *et al.* (2009), Lei e Church (2010), Benenson *et al.* (2010), Mavoa *et al.* (2012), Owen e Levinson (2012) e Dill *et al.* (2013) demonstram diversos métodos para calcular a acessibilidade utilizando informações detalhadas de horários de transporte público (Owen e Levinson, 2015).

No estudo realizado por Owen e Levinson (2015), foi calculada a acessibilidade aos empregos através do sistema de transporte público e individual (carro) e utilizados os valores para prever a divisão modal (público e individual) nos municípios de Minneapolis e Saint Paul no estado americano de Minnesota. A rede de transporte público foi construída através de dados em formato GTFS e vetores de arruamento provenientes do *Open Street Map* (OSM, 2015). A rede de transporte individual foi construída através de dados de arruamento e congestionamento disponibilizados pelo governo e pesquisas anteriores. Os autores utilizaram uma metodologia de avaliação da acessibilidade do sistema de transporte público sensível à variação do tempo ao longo do dia, denominada acessibilidade contínua. Foram utilizados parâmetros de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos de viagem a partir de diversas origens para calcular a acessibilidade acumulada aos empregos. Os resultados do estudo mostram que a acessibilidade através de transporte individual é superior a acessibilidade através do transporte público, e sua variação (transporte individual) é muito mais gradativa ao longo do espaço, pois para o transporte público existem picos de acessibilidade próximos a pontos de ônibus e estações.

Salonen e Toivonen (2013) propõem três níveis de complexidade para modelos de transporte público e individual que permitem fazer comparações de tempos de viagem entre ambos os modos. O objetivo do estudo das autoras é identificar a acessibilidade de diversos pontos de interesse (bibliotecas) na região metropolitana de Helsinque. Foram considerados os setores censitários, obtidos do censo da Finlândia, e as redes de transporte para extrair os tempos de viagem até as bibliotecas. As redes de transporte simples se utilizaram de atributos básicos como nomes de vias e linhas, enquanto que as redes de transporte mais complexas possuíam informações de trânsito e estacionamentos, no modelo de transporte individual, e informações de itinerário e tempo de transferência no modelo de

transporte público. O resultado do estudo mostra que o tempo de viagem para acessar as bibliotecas na região metropolitana de Helsinki é menor para usuários do transporte individual do que público. Os tempos para acessar as bibliotecas nos modelos avançados de transporte individual e público são, respectivamente, em 95% dos casos, 15 minutos e 21 minutos.

Neste trabalho são modeladas redes de transporte público e individual para que possam ser feitas análises comparativas, como será descrito a seguir.

4 MÉTODOS

4.1 Área de Interesse

A área de interesse do estudo é o município de São Paulo, que de acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), é uma das megacidades do mundo e apresenta uma gama de dados que serão utilizados como insumo para o estudo. O município possui uma população estimada de 11.895.893 habitantes para o ano de 2014 (IBGE, 2015), é dividido em 96 distritos, apresenta uma frota de veículos de aproximada 8.062.599 para o ano de 2015, sendo que aproximadamente 45.765 desses veículos são ônibus e 5.738.510 são automóveis (DETRAN, 2015).

Segundo dados da São Paulo Transportes S.A. (SPTrans, 2014), são transportados uma média de 6 milhões de passageiros por dia útil na cidade de São Paulo através de linhas de ônibus (Oliveira *et al.*, 2015). A rede viária utilizada por ônibus soma mais de 4 mil quilômetros, passando por 17 mil pontos de parada, sendo que existem 10 corredores de ônibus com um total de 126 quilômetros de extensão (Lavieri *et al.*, 2015). Adicionalmente ao sistema de transporte público operado por ônibus, operam outras companhias: Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô, 2015), a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM, 2015) e o sistema metropolitano de ônibus, operado pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos (EMTU, 2015), que interliga a capital aos municípios da região metropolitana (Oliveira *et al.*, 2015).

4.2 Materiais Utilizados

Serão utilizados Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para armazenar, preparar, organizar, analisar e produzir mapas dos dados e resultados dos estudos de mobilidade e acessibilidade urbana.

As bases de dados utilizadas no estudo são:

- Base de Logradouros do Município de São Paulo disponibilizada pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM, 2015);
- Base de dados de logradouros e tráfego disponibilizada pela TomTom (TomTom, 2015);
- Limite municipal (IBGE);
- Dados da RAIS do ano de 2014 (RAIS, 2014);
- Base de bairros do município de São Paulo;
- Setores Censitários (IBGE);
- Pesquisa Origem/Destino Metrô de 2007;
- Dados de transporte público disponibilizados pela SPTrans em formato GTFS;
- Base de dados de rastreamento GPS de ônibus (SPTrans);
- Base de dados de rastreamento de veículos (Maplink, 2015);
- Base de dados de semáforos (OSM, 2015).

4.3 Esquema conceitual das redes de transporte público e individual

4.3.1 Esquema conceitual das redes de transporte público

Para que a construção da rede de transporte público seja criada sem necessitar, obrigatoriamente, dos materiais listados no tópico anterior, foi criado o

esquema conceitual em formato OMT-G, onde são mostradas as classes de feições, processos e atributos fundamentais para a elaboração da rede. A Figura 2 ilustra o esquema conceitual em OMT-G.

Figura 2. Esquema conceitual da rede de transporte público em OMT-G.

A rede de transporte público é composta por cinco classes de feição e uma tabela: linhas de transporte público; trecho viário; linhas de transporte público; ponto de parada; estações; e tabela de rastreamento.

A classe de feição trecho viário apresenta todos os logradouros da área de interesse e deve possuir os atributos de: Nome de logradouro; Tipo de via; e Elevação. O atributo de nome de logradouro é fundamental para que no itinerário das rotas criadas ele seja informado ao usuário da rede. O atributo de tipo de via é utilizado para definir quais vias são trafegáveis no modo caminhada, por exemplo, vias residenciais são trafegáveis e vias expressas são intrafegáveis. O atributo de elevação é utilizado para que a roteirização não apresente falhas no modo caminhada em vias que possuem desnível, por exemplo, pontes, viadutos e túneis. Na classe de feição deverá ser adicionado um campo de velocidade de tráfego por trecho caso essa informação não exista na base de dados original.

A classe de feição linhas de transporte público apresenta todas as linhas de transporte da área de interesse e é composta pelos seguintes campos de atributos:

identificador da linha; nome da linha; e mão de direção. O identificador da linha tem como função identificar, através de um valor único, cada uma das linhas. O atributo de nome da linha é utilizado para orientar o usuário da rede qual a linha, ou as linhas, da rota criada. O atributo de mão de direção é empregado na orientação do sentido de fluxo (mão de direção) das linhas da classe de feição. Na classe de feição, deverão constar os tempos de viagem em cada um dos trechos das linhas de transporte. Caso não conste a informação do tempo de viagem, ele deverá ser calculado através de dados auxiliares (rastreamento, estimativas, etc).

As classes de feição ponto de parada e estações contém, respectivamente, todos os pontos de ônibus e estações. As classes de feição são compostas pelos campos de atributos: identificador do ponto de parada; identificador da linha; horário de chegada; horário de saída; e sequência de parada. O atributo identificador ponto de parada é um identificador único e é utilizado para relacionar os pontos de parada com a tabela de rastreamento. O atributo identificador da linha relaciona o ponto de parada com a linha de transporte. O atributo horário de chegada contém as informações de horário de chegada de cada um dos veículos das linhas de transporte que passam pelo ponto de parada. O atributo horário de saída contém as informações do horário que os veículos de transporte saem dos pontos de parada. O atributo sequência de parada possui as informações de qual a ordem dos pontos de parada das linhas de transporte.

A tabela de rastreamento é uma tabela composta pelos mesmos campos de atributos existentes na classe de feição paradas, porém com informações mais precisas sobre o tempo de viagem de cada uma das linhas. Caso a classe de feição já possua as informações precisas de tempos de viagem, não será necessário utilizar a tabela.

Quando são consideradas informações de mais de um período de referência para a construção de uma única rede de transporte, são construídas as redes multitemporais. A rede multitemporal é composta das mesmas classes de feição (Trecho Viário, Linhas de Transporte Público, Ponto de Parada e Estação) de uma rede simples, porém com mais de uma data de referência, no caso, os períodos de 06 a 10 de outubro de 2014 e 06 a 10 de abril de 2015. Como podem ocorrer alterações no sistema de transporte público considerando datas distintas, alterações

tanto geométricas (traçado e novas linhas) quanto de atributos (velocidades, nomes, etc), a rede precisa armazenar informações temporais. A forma encontrada para a rede armazenar os dados temporais é através de atributos que indicam se as linhas e os atributos existentes estão ativos para a data que se deseja gerar a rota. Essa solução funciona como uma data de início e fim de operação para cada registro de acordo com a data da rota a ser gerada.

Para a construção da rede multitemporal, são espacializadas as redes para cada período e avaliados quais trechos das linhas de transporte público são idênticos geometricamente. Os trechos das linhas de transporte geometricamente idênticos recebem os atributos de velocidade de cada período distinto em campos separados para cada período. Dessa forma, quando o usuário da rede multitemporal gerar uma rota em um trecho existente em ambos os períodos, serão consideradas impedâncias de tempos distintas a depender da data escolhida pelo usuário. No caso dos trechos de linhas de transporte público que possuem traçados distintos, considerando períodos distintos, ambos os trechos são incorporados na rede multitemporal, porém para cada período é informado se o trecho está ativo. Dessa forma, uma rede multitemporal incorpora informações de mais de um período de referência.

4.3.2 Esquema conceitual das redes de transporte individual

Da mesma forma que foi criado o esquema conceitual para a rede de transporte público, foi criado o esquema conceitual em formato OMT-G para a rede de transporte individual (Figura 03).

Figura 3. Esquema conceitual da rede de transporte individual em OMT-G.

A rede de transporte individual é composta de três classes de feições e uma tabela: Trecho Viário; Semáforo; Cruzamento; e tabela de Tráfego.

A classe de feição Trecho Viário contém todas as vias da área de interesse e possui os seguintes campos de atributos: Identificador único trecho; Nome de logradouro; Mão de direção; Tipo de via; e Elevação. O campo identificador único trecho é utilizado para relacionar a feição de trecho viário com a tabela com informações de tráfego. O campo Nome de logradouro é utilizado para armazenar as informações de nome das vias, permitindo que os usuários da rede saibam quais são as vias do itinerário gerado pela rota. O campo Mão de direção é utilizado para definir qual o fluxo no trecho. No caso da classe de feição Trecho Viário, ocorrem casos de vias com mão de direção dupla (bidirecional) e mão de direção única (unidirecional). O campo Tipo de via é utilizado tanto para a composição do nome do logradouro quanto para estabelecer os critérios de hierarquia de roteirização. O campo Elevação é utilizado para definir quais trechos viários estão no mesmo nível, prevenindo problemas de rotas em viadutos, pontes e túneis. Deverão ser adicionadas as informações de tráfego na classe de feição Trecho Viário, caso ela não apresente essas informações originalmente.

As classes de feição Semáforo e Cruzamento não necessitam ter atributos específicos, apenas deverão ser acrescentados os tempos de impedância no momento de configuração do modelo de rede.

4.4 Modelagem dos sistemas de transporte público e individual em SIG

A modelagem dos sistemas de transporte público e individual foi realizada em dois níveis de detalhamento, modelos simples e avançados. Para cada um dos quatro modelos foram geradas as matrizes de tempo de viagem entre todos os pares origem e destino com o objetivo de gerar posteriormente os índices de acessibilidade e compará-los. A Figura 4 mostra o fluxo do trabalho.

Figura 4. Fluxo do trabalho

Para o estudo, foram criadas as redes de transporte público e individual para os anos de 2014 e 2015. Por esse motivo, o fluxo representado pela Figura 4 foi realizado duas vezes, uma vez para o ano de 2014 e outra para o ano de 2015.

4.4.1 Modelagem do Sistema de Transporte Público

A modelagem do sistema de transporte público foi realizada através dos dados de linhas de ônibus, trens e metrô disponibilizados pela empresa SPTrans, em formato GTFS, do arquivo shapefile de logradouros disponibilizado pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM) e de dados de AVL (*Automatic Vehicle Location*) de todos os ônibus operados pela SPTrans.

4.4.1.1 Dados GTFS

Os dados em formato GTFS utilizados na pesquisa, possuem todas as linhas de ônibus, trens e metrô e seus respectivos pontos de parada (ônibus) ou estações (trem e metrô). Essa base foi utilizada para montar a geometria da rede de transporte público.

O formato GTFS (*General Transit Feed Specification*), consiste em um formato de compartilhamento de informações estáticas do transporte público (Google, 2015). Através dos arquivos em formato GTFS são compartilhadas diversas informações, incluindo os itinerários, horários de serviço das linhas de transporte público, tarifas e tempo estimado de deslocamento entre os pontos de parada das linhas. No caso dos dados disponibilizados pela SPTrans, por serem informações estáticas, são estimativas de tempo que buscam se aproximar da realidade do sistema de transporte público. Os dados GTFS consistem nos seguintes arquivos em formato texto:

- Agency.txt: apresenta informações gerais sobre a(s) empresa(s) responsáveis pela operação do sistema de transportes.
- Stops.txt: o arquivo disponibilizado pela SPTrans possui informações sobre o nome das paradas e suas respectivas coordenadas geográficas.
- Routes.txt: o arquivo armazena informações sobre os identificadores, nomes das rotas das linhas de ônibus, metrô e trem e a empresa responsável pela operação do sistema de transportes.

- Trips.txt: apresenta, principalmente, informações sobre o identificador do sentido da linha e o nome do ponto final (terminal) correspondente ao seu sentido.
- Stop_times.txt: apresenta as informações relativas ao tempo de deslocamento entre cada um dos pontos de paradas que fazem parte das linhas. Este arquivo possui os horários de chegadas e partidas das linhas em cada ponto de parada, o identificador das paradas e a sua sequência.
- Calendar.txt: o arquivo possui os identificadores das linhas que funcionam ao longo da semana através do campo “service_id”. Existem linhas que operam nos sete dias da semana, outras que operam apenas nos finais de semana e existem linhas mistas, ou seja, que podem deixar de operar alguns dos dias úteis da semana e nos finais de semana.
- Fare_attributes.txt: armazena os dados de tarifas do sistema de transporte público. No arquivo estão especificados os valores das tarifas, para os diferentes modais do sistema de transporte público, e os seus valores com conexões entre os diversos modais possíveis no município de São Paulo.
- Fare_rules.txt: o arquivo relaciona os valores das tarifas do sistema de transporte público com as rotas existentes nos arquivos.
- Shapes.txt: armazena as informações de geometria do sistema de transporte. As informações são armazenadas através da relação das coordenadas (latitude e longitude) de cada um dos vértices que compõem as linhas do sistema de transporte. Cada um dos vértices armazenados possui a informação de sua sequência na composição da linha e a distância acumulada desde o primeiro vértice da linha até o último.
- Frequencies.txt: o arquivo armazena a frequência dos ônibus, metrô ou trem ao longo de sua operação. Este arquivo diferencia o sentido de cada uma das linhas e a variação da frequência por horário de operação.

O diagrama do modelo de dados é descrito na Figura 5.

Figura 5. Diagrama do modelo de dados GTFS.

Fonte: <http://www.stm.info/fr/a-propos/developpeurs/description-des-donnees-disponibles>

4.4.1.2 Espacialização dos dados GTFS

A etapa de espacialização dos dados GTFS consistiu em transformar as informações tabulares (texto), contidas nos arquivos GTFS, em informações espaciais manipuláveis em ambiente SIG.

A primeira etapa consistiu em espacializar os vértices das linhas de transporte público disponibilizadas no GTFS. Nessa etapa foram espacializados os dados das linhas de ônibus, trem e metrô através de suas informações de latitude e longitude. A Figura 6 mostra o resultado da espacialização.

Figura 6. Vértices das linhas de transporte público.

Espacializados os vértices das linhas de transporte público, foram utilizados os atributos de identificação de cada linha e sua sequência de vértices para gerar as linhas. A Figura 7 mostra o resultado do processo de geração das linhas.

Figura 7. Linhas de transporte público.

Após gerar as linhas, elas ainda não possuem as quebras nos pontos de parada (pontos de ônibus e estações de trem e metrô), o que é fundamental para que a rede possa ser modelada. As quebras das linhas de transporte público nos pontos de parada são necessárias para que exista a conectividade entre o modo caminhada e os modos de ônibus, trem e metrô. Por esse motivo, foram espacializados os pontos de parada através de suas coordenadas (Figura 8).

Figura 8. Espacialização dos pontos de parada do transporte público.

Espacializados os pontos de parada do sistema de transporte público, é preciso que eles estejam relacionados com as suas correspondentes linhas de transporte. Por esse motivo foram separadas cada uma das linhas e seus pontos de parada de acordo com o identificador e realizadas as quebras das linhas (Figura 9).

Figura 9. Quebra das linhas de transporte de acordo com os pontos de parada.

Para possibilitar a inserção de informações de tempos de espera e demais penalidades, as linhas foram quebradas e transladadas em poucos centímetros. O objetivo de transladá-las poucos centímetros é criar os conectores entre as linhas de transporte e os pontos de parada, possibilitando seu uso em rotas da rede. Outro motivo é evitar que elas fiquem sobrepostas, pois ao construir a rede no ambiente SIG a sobreposição de linhas levaria a problemas relacionados a transferências sem penalidade.

Transladadas as linhas, foram gerados os seus nós e relacionados espacialmente os seus atributos com os atributos do ponto de parada correspondente. O objetivo dessa etapa é identificar qual o ponto de parada correspondente aos nós das linhas de transporte público e criar um atributo que padronize o sentido de construção dos conectores. É necessário padronizar o sentido de construção dos conectores porque serão atribuídas penalidades de tempo de espera no modelo, logo, o tempo de espera só se aplicará aos usuários que embarcarão nos veículos e não para aqueles que desembarcarão. Com o

sentido de construção dos conectores padronizado, é possível especificar qual sentido do vetor receberá a impedância de tempo. Relacionados os atributos, foram construídos os conectores (Figura 10).

Figura 10. Rede de transporte público com conectores.

Finalizada a construção dos conectores, a rede de transporte público possui dados das linhas de ônibus, trem e metrô para o município de São Paulo (Figura 11).

Figura 11. Rede de transporte público com linhas de ônibus, trem e metrô.

Segue abaixo o fluxo de processos executados para o processamento dos dados GTFS (Figura 12):

Figura 12. Fluxo de processamento dos dados GTFS.

Para a modelagem da rede de transporte público é essencial a incorporação do modo caminhada. O conceito da rede é que os usuários saiam de sua origem no modo caminhada, embarquem nas linhas de transporte público (ônibus, metrô e trem), desembarquem e acessem seu destino através do modo caminhada. Por esse motivo foi incorporada a base de logradouros disponibilizada pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM).

4.4.1.3 Modo Caminhada - Processamento dos dados do CEM

A base de dados do Centro de Estudos da Metrópole (CEM) possui os logradouros do município de São Paulo. A escolha da base de dados do CEM se deu devido a sua maior completude em relação à base de dados do *Open Street Map* (OSM, 2015). Através da base do CEM foi modelado o modo caminhada.

O modo caminhada é essencial para a rede de transporte público, pois a viagem iniciará no modo caminhada, permitindo acessar as linhas de transporte público, e finalizará através do modo caminhada, quando ocorrerá o desembarque do transporte público e o percurso no modo caminhada até o destino final.

A base de dados do CEM, por ser originalmente destinada a processos de geocodificação, não possui todos os atributos necessários para a geração de rotas, como informações de mão de direção e velocidade de deslocamento. Como originalmente não existem essas informações na base de dados, foram criados dois campos para armazená-las. Para o modo caminhada, foram atribuídas as informações de mão dupla para todos os logradouros do município e velocidade de 5 km/h. A velocidade de 5 km/h foi atribuída conforme estudo realizado por Owen e Levinson (2015).

Incorporadas as informações de mão de direção e velocidade na base de dados do CEM, foi realizada a quebra dos trechos de logradouros correspondentes aos pontos de parada de ônibus, estações de trem e metrô com o objetivo de permitir a integração entre os modos de viagem. Quebrados os trechos, foram construídos os conectores entre o modo caminhada e os pontos de parada (ônibus,

trem e metrô). Os conectores entre o modo caminhada e os pontos de parada são usados para inserir informações de tempo de acesso às estações e, dessa forma, ocorrer a integração entre todos os modos da rede de transporte público. Para criá-los, foram gerados os nós dos logradouros e relacionados espacialmente com os pontos de parada visando relacionar atributos de identificação e padronizar o sentido de construção dos conectores.

Criados os conectores, a rede de transporte público está geometricamente finalizada. As próximas etapas consistem na inserção das informações de impedância (velocidade de tráfego, tempo de espera e tempo de acesso). Segue abaixo o fluxo para processamento dos dados do CEM (Figura 13):

Figura 13. Fluxo de processamento dos dados do CEM.

4.4.1.4 Processamento dos dados de AVL

Os dados de AVL (*Automatic Vehicle Location*), disponibilizados pela SPTrans, consistem em conjuntos de pontos contendo a identificação dos veículos, latitude, longitude e horário de coleta dos pontos. Através dessa base podem ser realizadas diversas análises e obtidos valores mais fidedignos para a calibração das redes de transporte público com relação aos tempos de viagem de cada um dos trechos (percurso entre dois pontos de ônibus).

O processamento dos dados de AVL foi realizado considerando o identificador do veículo e o horário em que ele passa em cada ponto de parada de ônibus. O objetivo é identificar quanto tempo leva para que o mesmo veículo saia de um ponto de ônibus e chegue ao ponto de ônibus seguinte ao longo do dia. Dessa forma, foram calculados os tempos reais gastos em cada trecho de todas as linhas da cidade de São Paulo ao longo de uma semana de operação para o período analisado de 2014 e 2015. Para mais informações sobre o processamento dos dados de AVL, vide trabalho realizado por Arbex *et al.*, (2015).

Identificadas as velocidades dos veículos para cada trecho de cada linha, para cada hora ao longo do dia, os dados foram exportados para o formato GTFS e incorporados na rede de transporte público avançado.

4.4.1.5 Modelagem do Sistema de Transporte Público Simples

Para a modelagem da rede de transporte público simples, foram consideradas as geometrias provenientes dos arquivos em formato GTFS disponibilizados pela SPTrans e os dados do CEM, conforme procedimentos listados anteriormente. O conceito da rede de transporte público simples é utilizar parâmetros de impedância (velocidade de tráfego e tempos de espera) simplificados.

Os parâmetros atribuídos ao modelo variaram de acordo com o modo de transporte. Para as linhas de ônibus foram atribuídos os valores de velocidade média de 40 km/h e para as linhas de trem e metrô 60 km/h. As velocidades foram consideradas constantes ao longo do dia.

Através da extensão Network Analyst do sistema ArcGIS, foram inseridos os parâmetros na configuração da rede e realizado o processamento. A Figura 14 mostra o fluxo para configuração da rede de transporte público simples.

Figura 14. Fluxo de configuração da rede de transporte público simples.

4.4.1.6 Modelagem do Sistema de Transporte Público Avançado

A modelagem do sistema de transporte público avançado se utiliza da mesma geometria do modelo simples, porém as informações de impedância do modelo são mais detalhadas. O modelo avançado incorpora as informações processadas dos dados de AVL disponibilizados pela SPTrans para os dois períodos em análise. Dessa forma, as velocidades reais de campo foram incorporadas como atributos de velocidade para cada trecho. Os tempos de espera foram incorporados ao modelo a partir de informações disponibilizados nos arquivos GTFS da SPTrans, sendo sensíveis às variações ao longo das semanas dos dias (20 a 24 de outubro de 2014 e 06 a 10 de abril de 2015). Para os demais modos de transporte público (trem e metrô), foram consideradas as informações de velocidade provenientes dos dados GTFS disponibilizados pela SPTrans.

Os parâmetros foram processados e geraram uma nova rede de transporte público, que permite escolher o horário de partida da viagem e observar quais os trajetos de menor impedância ao longo do dia. A Figura 15 mostra o fluxo para geração do modelo de transporte público avançado.

Figura 15. Fluxo de configuração da rede de transporte público avançado.

4.4.2 Modelagem do Sistema de Transporte Individual

A modelagem do sistema de transporte individual foi realizada através dos dados disponibilizados pela empresa TomTom e baixadas através de seu portal web (<http://trafficstats.tomtom.com>). A versão da base de dados disponibilizada é a primeira versão de 2015 e a área disponibilizada abrange uma região maior do que a do município de São Paulo, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16. Recorte geográfico da base de dados disponibilizada pela TomTom.

4.4.2.1 Atributos de mão de direção

Para a construção da rede de transporte individual, o atributo de mão de direção é um parâmetro necessário para que o modelo permita a criação de rotas mais realistas, ou seja, que respeitem os sentidos de tráfego das vias. Por esse motivo, foi criado um campo de mão de direção e atribuídos os seus valores de acordo com o sentido de construção das vias. A Figura 17 mostra as informações de mão de direção para algumas vias próximas à Avenida Paulista:

Figura 18. Vias com atributos de elevação que se cruzam em níveis distintos.

4.4.2.3 Dados de trânsito

Os dados disponibilizados contêm mais do que apenas geometrias das vias, contêm informações de condições de tráfego para uma quantidade considerável de vias no município de São Paulo. As informações de tráfego foram disponibilizadas em tabelas que podem ser associadas com os trechos de logradouro e foram fatiadas em períodos de uma hora ao longo dos dias 20 a 24 de outubro de 2014 e 06 a 10 de abril de 2015. Dessa forma, foram disponibilizadas as bases de dados com informações de trânsito separadas por hora das 06:00h da manhã até as 20:00h da noite.

As informações existentes nas tabelas de trânsito, que foram incorporadas no modelo de transporte individual avançado, são as velocidades médias para cada trecho de logradouro ao longo dos dias.

4.4.2.4 Modelagem do Sistema de Transporte Individual Simples

O modelo do sistema de transporte individual simples considera as informações de mão de direção, elevação e limite de velocidade das vias. Como não são consideradas informações de trânsito, o modelo incorpora apenas as velocidades de fluxo livre de acordo com o limite de velocidade de cada trecho da base de dados de arruamento. A Figura 19 mostra o fluxo para elaboração da rede de transporte individual simples.

Figura 19. Fluxo para elaboração da rede de transporte individual simples.

4.4.2.5 Modelagem do Sistema de Transporte Individual Avançado

O modelo do sistema de transporte individual avançado incorpora os atributos de mão de direção, elevação e informações de trânsito para o cálculo da velocidade.

As informações de trânsito fazem com que o modelo seja sensível à hora do dia do início da viagem. Quando são estipulados diferentes períodos, o trajeto calculado pelo algoritmo de roteirização poderá mudar de acordo com o carregamento nas vias e, conseqüentemente, diminuição da velocidade média para o horário de interesse.

O modelo considera que apenas um modo para a viagem, que é o modo carro. A Figura 20 mostra o fluxo para elaboração do modelo de transporte individual avançado.

Figura 20. Fluxo para elaboração do modelo de transporte individual avançado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado dos procedimentos realizados anteriormente, foram criadas as redes de transporte individual e público para as datas de 20 a 24 de outubro de 2014 e 06 a 10 de abril de 2015 com dois níveis de detalhamento (simples e avançado).

A partir dessas redes é possível realizar cálculos de tempo de viagem para quaisquer locais dentro do município de São Paulo, possibilitando entender a evolução temporal do sistema de transporte público e individual do município de São Paulo. As Figuras 21 e 22 ilustram um recorte da rede de transporte público e individual para a região central do município.

Figura 21. Recorte da rede de transporte público do município de São Paulo.

Rede de Transporte Individual - Centro de São Paulo

Figura 22. Recorte da rede de transporte individual do município de São Paulo.

5.1 Resultados dos modelos de transporte simples

A primeira análise realizada através dos modelos de transporte individual e público simples para o ano de 2014 foi o comparativo de tempos de viagens entre ambos os modelos. Foram geradas as rotas com origem nos centroides dos setores censitários do IBGE e destino no centroide do setor censitário da cidade universitária. Um total de 18.952 rotas foram geradas, coletados os tempos de viagem e analisados os resultados. A Figura 23 mostra os tempos de viagem extraídos dos modelos.

Figura 23. Tempos de viagem por transporte público e individual.

Os resultados dos tempos de viagem apresentados na Figura 23, mostram que os tempos de viagem para acessar a cidade universitária são consideravelmente menores para usuário do sistema de transporte individual em todo o município de São Paulo.

Outra análise realizada foi o cálculo da diferença de tempo entre as viagens por transporte público e individual por setor censitário. A Figura 24 ilustra os resultados encontrados.

Figura 24. Diferença do tempo de viagem por transporte público e individual nos modelos simples.

A Figura 24 mostra que nas porções centrais do município de São Paulo a diferença entre o tempo de viagem em transporte público e individual é consideravelmente menor do que para as regiões periféricas do município. Esse fato está associado com o nível de acessibilidade em cada região do município. Na porção central existe uma maior oferta de transporte, aumentando a acessibilidade, enquanto que nas regiões periféricas a oferta de transporte é menor, o que diminui a acessibilidade e, consequentemente, aumenta o tempo de viagem.

5.2 Resultados dos modelos de transporte avançados

Considerando os modelos de rede de transporte público e individual avançados para os anos de 2014 e 2015, foram criados os índices de acessibilidade aos empregos que pagam menos do que 4 salários mínimos por bairros do município de São Paulo. Para a análise, foi utilizado o índice de acessibilidade potencial absoluta:

$$A_i = \sum_{j=1}^n \frac{W_j}{f(C_{ij})}$$

A_i é o índice de acessibilidade do bairro;

W_j é a demanda de empregos de baixa renda (< 4 salários mínimos) no bairro j ;

$f(C_{ij})$ representa o custo de viagem (tempo) da origem i ao destino j .

Para identificar a quantidade de empregos que pagam menos do que 4 salários mínimos por bairro, foram utilizados os dados da RAIS (2014) como fonte de informação e a base de dados de CEP dos correios para delimitação dos bairros. A Figura 25 mostra o mapa de quantidade de empregos que pagam menos do que 4 salários mínimos por mês, agrupados por bairros do município de São Paulo.

Figura 25. Mapa de quantidade de empregos por bairros que pagam menos do que 4 salários mínimos por mês no ano de 2012.

A espacialização dos dados de empregos que pagam menos do que 4 salários mínimos por mês no mapa de bairros do município de São Paulo mostra que a distribuição desses postos de trabalho é desigual entre os bairros do município. Os bairros localizados no centro expandido do município concentram a maior parte dos empregos, enquanto que os bairros localizados nas demais zonas oferecem poucos postos de trabalho.

Para ilustrar como estão distribuídas as demandas de trabalho que recebem menos do que 4 salários mínimos por mês no município de São Paulo, foi elaborado um mapa que representa a distribuição da renda média da população por bairros no município de São Paulo (Figura 26).

Figura 26. Renda média da população por bairros do município de São Paulo.

De acordo com o mapa apresentado na Figura 26, poucos são os bairros do centro expandido do município onde a renda média salarial é de menos de 4 salário mínimos por mês (R\$ 2.488,00 em 2012), ou seja, a demanda para os empregos tem como origem as periferias do município.

A concentração de oferta de emprego no centro do município e da demanda em zonas periféricas faz com que a demanda tenha que se deslocar das periferias para o centro do município, o que, por sua vez, pode ocasiona congestionamentos nos horários de pico e exigir maior eficiência do sistema de transporte público.

Identificada a quantidade de empregos que pagam menos do que 4 salários mínimos por mês e a distribuição da renda média por bairros do município, foram calculados os tempos de viagem a partir das redes de transporte público e individual avançadas para os anos de 2014 e 2015. Como o objetivo é calcular a acessibilidade aos empregos, foi considerado o horário das 7:00h da manhã para a geração das rotas. A Figura 27 mostra os resultados do índice de acessibilidade calculado para o sistema de transporte público.

Figura 27. Índice de acessibilidade potencial absoluta a empregos de baixa renda por transporte público em 2014.

Como pode ser observado na Figura 27, os bairros periféricos possuem menor acessibilidade aos empregos de baixa renda. Isso se deve ao fato de a maioria dos empregos que pagam menos de 4 salários mínimos estarem localizados nos bairros centrais do município de São Paulo, logo, quanto mais distantes os bairros forem do centro, maior o tempo de viagem a estas oportunidades de emprego e, consequentemente, menor a acessibilidade a esses empregos.

Quando o mapa de acessibilidade aos empregos de baixa renda é observado com maior atenção, é possível identificar que os bairros com maiores índices de acessibilidade são cortados por linhas de metrô e trem (Figura 28).

Figura 28. Relação linhas de metrô e trem e índice de acessibilidade por transporte público em 2014.

O resultado do índice de acessibilidade aos empregos que pagam menos de 4 salários mínimos através da rede de transporte individual, mostra, novamente, que os bairros centrais apresentam maior acessibilidade em relação aos bairros periféricos (Figura 29).

Figura 29. Índice de acessibilidade potencial absoluta a empregos de baixa renda por transporte individual em 2014.

O resultado do índice de acessibilidade às oportunidades de emprego de baixa renda, através do transporte individual, é mais homogêneo se comparado ao índice gerado através do modelo de transporte público. Esse resultado mostra que as oportunidades de emprego estão concentradas na porção central do município de São Paulo e que a oferta de transporte individual, por ser homogênea, se difere da oferta de transporte público, que é influenciada significativamente pela existência de estações de metrô e trem.

Os mesmos índices de acessibilidade foram calculados, respectivamente, para as redes de transporte público (Figura 30) e individual (Figura 31) do ano de 2015.

Figura 30. Índice de acessibilidade potencial absoluta a empregos de baixa renda por transporte público em 2015.

Figura 31. Índice de acessibilidade potencial absoluta a empregos de baixa renda por transporte individual em 2015.

Calculados os índices de acessibilidade para os anos de 2014 e 2015, foi utilizado o índice desenvolvido por Kwok e Yeh (2004) para comparar os índices de acessibilidade do transporte público e individual. O índice proposto pelos autores é denominado de MAG (*Modal Accessibility Gap*) e possui como objetivo mensurar a disparidade entre o modo de transporte mais eficiente e o menos eficiente. No caso do presente estudo foram comparados os modos de transporte público e individual:

$$MAG = \frac{A^P - A^I}{A^P + A^I}$$

MAG: Índice que mensura a disparidade entre os modos de transporte;

A^P: Acessibilidade do transporte público;

A^I: Acessibilidade do transporte individual.

Como pode ser observado na formulação do índice, o resultado é um valor normalizado entre -1 e 1. Dessa forma, quando a acessibilidade de um local por transporte público for nula e a acessibilidade por transporte individual for diferente de zero, o índice MAG será de -1. Caso ocorra o contrário, ou seja, o índice de acessibilidade por transporte individual para um local específico for nulo e o índice de acessibilidade para o mesmo local por transporte público for diferente de zero, o índice MAG será igual a 1 (Kwok e Yeh, 2004). A Figura 32 ilustra os resultados encontrados com a aplicação do MAG para os índices de transporte público e individual do ano de 2014 e a Figura 33 ilustra os resultados para o ano de 2015.

Figura 32. Índice MAG aplicado nos índices de acessibilidade de transporte público e individual para o ano de 2014.

Figura 33. Índice MAG aplicado nos índices de acessibilidade de transporte público e individual para o ano de 2015.

Os resultados do índice MAG (Figura 32 e Figura 33) mostram que para todos os bairros do município de São Paulo, o transporte individual é mais eficiente que o transporte público em termos de tempo de viagem para acesso aos empregos que pagam menos do que 4 salários mínimos no ano de 2015 às 07:00 A.M.

No centro expandido do município, bairros como Bela Vista, Brás, Luz e Centro, que possuem altos índices de acessibilidade aos empregos que pagam menos de 4 salários mínimos, apresentam diferença de tempo de viagem entre o transporte público e individual menor do que, por exemplo, os bairros de Perdizes e Pacaembu. Essa diferença se dá pela menor oferta de transporte público (metrô e trem) nos bairros de Perdizes e Pacaembu em relação aos bairros localizados no centro.

Na zona leste do município foram encontradas menores variações entre os índices de acessibilidade, ou seja, o resultado do índice MAG se aproxima de 0. Através da análise dos índices de acessibilidade do transporte individual e público, são identificados os baixos valores dos índices para ambos os modos na zona leste. Além dos índices de acessibilidade apresentarem valores absolutos baixos, eles variam pouco entre os dois modos. Dessa forma, as pessoas que recebem menos de 4 salários mínimos, saem às 07:00 A.M. e que têm como origem a zona leste, possuem pouca vantagem de utilizar o transporte individual em relação ao transporte público.

Análises de acessibilidade acumulada aos empregos de baixa renda também foram realizadas. Neste caso, foi calculada a matriz de tempo de viagem entre todos os pares origem-destino dos bairros de São Paulo. Para a quantidade de empregos de baixa renda, foram considerados empregos que pagam até 4 salários mínimos e limiares de tempos de viagem de 30, 60 e 120 minutos. As Figuras 34, 35 e 36 mostram, respectivamente, o percentual de empregos de baixa renda acessados por bairro em um período de 30, 60 e 120 minutos considerando o sistema de transporte público às 07:00 AM. A Figura 38 mostra o comparativo entre o acesso aos empregos de baixa renda considerando os três tempos de viagem para todo o município de São Paulo.

Acesso aos Empregos de até 4 Salários Mínimos - 30 Minutos - T.P. - 2014

Figura 34. Percentual acumulado de acesso aos empregos de baixa renda em 30 minutos de viagem.

Acesso aos Empregos de até 4 Salários Mínimos - 60 Minutos - T.P. - 2014

Figura 35. Percentual acumulado de acesso aos empregos de baixa renda em 60 minutos de viagem.

Acesso aos Empregos de até 4 Salários Mínimos - 120 Minutos - T.P. - 2014

Figura 36. Percentual acumulado de acesso aos empregos de baixa renda em 120 minutos de viagem.

Figura 37. Comparativo de acesso aos empregos por tempo de viagem.

Como pode ser observado na Figura 37, os diferentes limiares de tempo de viagem alteram consideravelmente o acesso aos empregos de baixa renda no município de São Paulo. O tempo de viagem de 30 minutos é muito baixo para o acesso aos empregos de baixa renda, pois mesmo os bairros centrais, que concentram a maioria dos empregos de baixa renda, possuem um baixo percentual de acesso acumulado aos empregos. Considerando 60 minutos de tempo de viagem, a quantidade de empregos que podem ser acessados aumenta consideravelmente. O aumento da quantidade de empregos acessíveis nos bairros centrais está relacionado com a proximidade dos empregos de baixa renda e maior oferta de transportes. Aumentando o limiar de tempo de viagem para 120 minutos, grande parte dos bairros centrais do município acessam praticamente a totalidade de empregos de baixa renda disponíveis no município. Ao contrário dos bairros centrais, os bairros periféricos possuem baixo acesso aos empregos, pois estão demasiadamente afastados das oportunidades e existe pouca oferta de transportes.

Para analisar a acessibilidade foram realizados estudos de caso em três favelas do município de São Paulo com relação aos locais acessíveis de acordo com o tempo de viagem através do sistema de transporte público. As favelas analisadas foram Paraisópolis, São Francisco Global e Cantinho do Céu, onde foram considerados os tempos de viagem de 30, 60 e 120 minutos. A Figura 38 mostra as áreas acessíveis de acordo com os tempos de viagem e a Figura 39 o total acumulado de empregos acessíveis considerando a quantificação de empregos por zona OD da Pesquisa OD do Metrô de 2007 em 60 minutos de tempo de viagem por transporte público.

Figura 38. Comparativo entre áreas de serviço para três favelas.

Figura 39. Acesso a empregos em 1 hora de viagem por zona OD as 07:00 AM.

A favela de Paraisópolis, por estar localizada em uma região que apresenta maior oferta de transporte, permite que as pessoas que lá vivem possam acessar mais oportunidades de emprego de baixa renda em comparação com os moradores das favelas de São Francisco Global e Cantinho do Céu. Através das áreas de serviço de 30, 60 e 120 minutos, ilustradas na Figura 38, fica visível o quanto os moradores de Paraisópolis estão mais próximos de oportunidades de empregos de baixa renda da área central do que os moradores das demais favelas em análise.

Além da maior proximidade com a região central do município de São Paulo, que apresenta maior oferta de transporte, outro motivo é a proximidade com estações de metrô (se comparado com as demais favelas em análise). A Figura 39 mostra a área de serviço de 1 hora realizada a partir do centroide do bairro de Paraisópolis, mostrando que os moradores têm condições de acessar o centro do município através do metrô e de vias rápidas como a avenida 9 de Julho.

5.3 Avaliação

5.3.1 Avaliação da rede de transporte individual

A avaliação da rede de transporte individual avançada para o ano de 2014 foi realizada através de dados auxiliares de outra fonte. A base auxiliar de rastreamento de veículos utilizada para a avaliação foi disponibilizada pela empresa Maplink. A base de dados consiste de 612.849 registros com informações de latitude, longitude, identificador do veículo, data, horário e velocidade dos veículos no momento rastreado. A rede de 2014 foi criada através de dados da mesma semana (06 a 10/10/14) que os dados disponibilizados pela Maplink, justamente para que fosse possível avaliar os tempos de viagem da rede construída.

Para a avaliação da rede, foram realizados dois filtros na base de dados original disponibilizada pela Maplink. O primeiro filtro separou apenas os registros do dia 08/10/2014 (quarta-feira) para facilitar a avaliação. O segundo filtro separou os registros do dia 08/10/2014 compreendidos dentro do período das 07:00h às 12:00h para que os registros rastreados estivessem no mesmo período das rotas geradas através da matriz origem-destino às 07:00h na rede de transporte individual.

Filtrados os registros, eles foram espacializados através das suas informações de latitude e longitude e relacionados espacialmente com os centroides dos bairros do município de São Paulo, que foram utilizados na criação da matriz origem-destino contendo os tempos de viagem. Para relacioná-los espacialmente, foram criados buffers de 300 metros a partir dos centroides dos bairros para que todos os veículos que estivessem nas proximidades dos centroides fossem relacionados espacialmente a eles.

Relacionados os pontos de rastreamento de veículos com os centroides dos bairros do município de São Paulo, os pontos de rastreamento passaram a armazenar o identificador único de cada bairro, o que permitiu relacionar os tempos de viagem na matriz origem-destino com os tempos de viagem da base de dados disponibilizada pelo Maplink.

A disparidade entre os tempos de viagem dos dados de rastreamento disponibilizados pela Maplink e os tempos de viagem obtidos através da rede de transporte foram calculados através da subtração dos tempos da rede de transporte individual pelo tempo dos dados de rastreamento. A Figura 40 ilustra a distribuição de frequência dos resultados da subtração dos tempos de viagem.

Figura 40. Distribuição de frequência da subtração dos tempos de viagem.

O que pôde ser observado é que a média das disparidades é de 4 minutos e 13 segundos, o que mostra que os tempos de viagem calculados na rede tendem a ser maiores do que os tempos obtidos via rastreamento obtidos pela Maplink. Um motivo que pode justificar o maior tempo de viagem através da rede de transporte individual em relação aos dados de rastreamento é que foram criados buffers de 300 metros a partir dos centroides, o que pode aumentar em até 600 metros o trajeto realizado pela rede.

Outros casos observados são de grandes diferenças de tempo negativas, ou seja, o tempo de viagem obtido através do rastreamento de veículos da Maplink é muito superior ao calculado pela rede de transporte. Esse tipo de caso ocorre quando os veículos rastreados param em seus trajetos entre a origem e o destino e, logo, o tempo de viagem é muito superior a uma viagem sem interrupções como a calculada a partir da rede.

A Figura 41 ilustra os resultados (em módulo) da subtração dos tempos de viagem da rede de transporte individual pelo de rastreamento.

Figura 41. Avaliação da disparidade entre os tempos de viagem através da rede de transporte individual e os dados de rastreamento em módulo.

Avaliando o módulo da diferença entre os tempos da rede de transporte individual e dos dados de rastreamento, pode-se observar que aproximadamente

50% dos registros apresentam uma disparidade de até 20 minutos (563 de 1133 registros).

5.3.2 Avaliação das redes de transporte público

As redes de transporte público avançadas dos anos de 2014 e 2015 foram avaliadas comparando os tempos de viagem de trinta rotas, traçadas através das redes, em relação aos tempos de viagem das mesmas rotas traçadas através do Google Maps (Google, 2015). As origens e os destinos das rotas para avaliação das redes foram distribuídos de forma a englobar todas as zonas do município de São Paulo.

Distribuídos os pontos de origem e destino, foram geradas as rotas através das redes de transporte público avançado para os anos de 2014 e 2015. Os tempos de viagem foram comparados com os tempos de viagem do Google Maps para as mesmas datas do passado, ou seja, os dias 08/10/2014 e 08/04/2015. O Quadro 1 mostra o comparativo dos tempos de viagem das trinta rotas geradas através das redes e do Google Maps.

Quadro 1. Resultados do comparativo dos tempos de viagem das trinta rotas através das redes de transporte público e Google Maps.

Rota	Tempo Rede 2014	Tempo Rede 2015	Tempo Google 2014	Tempo Google 2015	Diferença Absoluta 2014	Diferença Absoluta 2015	Perc. Diferença 2014	Perc. Diferença 2015
1	56	47	48	48	8	1	16	3
2	63	65	58	58	5	7	8	13
3	72	90	76	76	4	14	5	18
4	108	113	122	122	14	9	12	7
5	45	46	45	45	0	1	0	2
6	40	50	51	51	11	1	21	2
7	32	27	29	29	3	2	12	7
8	29	30	35	35	6	5	18	15
9	49	59	55	55	6	4	12	7
10	63	80	63	63	0	17	0	27
11	85	91	89	89	4	2	4	2
12	81	64	71	71	10	7	14	10
13	111	108	101	101	10	7	10	7
14	79	85	63	63	16	22	26	35
15	107	103	103	103	4	0	4	0
16	69	70	78	78	9	8	12	10
17	69	66	70	70	1	4	1	5
18	105	104	110	110	5	6	5	6
19	67	63	76	76	9	13	12	17
20	69	68	63	63	6	5	9	8
21	68	71	55	55	13	16	24	28
22	105	86	84	84	21	2	25	2
23	60	79	73	73	13	6	18	8
24	91	82	78	78	13	4	16	5
25	105	86	97	97	8	11	8	11
26	56	70	65	65	9	5	14	8
27	79	73	72	72	7	1	9	1
28	57	65	59	59	2	6	4	10
29	80	80	77	77	3	3	4	4
30	128	124	130	130	2	6	2	5

São apresentados no Quadro 1 os tempos de viagem para as trinta rotas através das redes de transporte de 2014 e 2015, os tempos de viagem através do Google Maps, as diferenças absolutas entre os tempos de viagem separadas por ano e o percentual da diferença absoluta em relação aos tempos de viagem extraídos do Google Maps. Como pode ser observado, os tempos de viagem calculados através do Google Maps se mantém iguais para os anos de 2014 e 2015.

Obtidos os tempos de viagem através das redes e do Google Maps, foram calculadas as estatísticas de média, mediana e desvio padrão para as diferenças absolutas dos anos de 2014 e 2015 e o percentual das diferenças (Quadro 2).

Quadro 2. Estatísticas das diferenças de tempo de viagem e percentuais.

	Média	Mediana	Desvio Padrão
Diferença Absoluta 2014	7,44	6,44	4,94
Percentual da Diferença 2014	10,83	10,82	7,21
Diferença Absoluta 2015	6,49	5,39	5,21
Percentual da Diferença 2015	9,45	7,39	8,25

O Quadro 2 mostra que a média e a mediana da diferença absoluta do ano de 2014 são maiores do que para o ano de 2015, porém a sua dispersão (desvio padrão) é menor em 2014. Esse fato se reflete nos percentuais das diferenças para os anos de 2014 e 2015.

A Figura 42 mostra a distribuição de frequência da subtração dos tempos de viagem do Google Maps pelos tempos de viagem das redes de transporte público para o ano de 2014.

Figura 42. Distribuição de frequência da diferença entre os tempos de viagem do Google Maps pela rede de transporte público avançada de 2014.

Os valores negativos, apresentados na distribuição de frequência da Figura 42, indicam que o tempo de viagem através da rede é maior do que o valor indicado pelo Google Maps e os valores positivos indicam o contrário, ou seja, os tempos de viagem calculados pela rede são inferiores aos indicados pelo Google Maps.

De acordo com a Figura 42, a diferença entre os tempos de viagem está concentrada, principalmente, no intervalo entre -10 e 5 minutos.

A Figura 43 ilustra os resultados do módulo da diferença entre os tempos de viagem obtidos a partir do Google Maps, em relação aos tempos de viagem obtidos a partir da rede de transporte público de 2014.

Figura 43. Avaliação da disparidade entre os tempos de viagem obtidos através do Google e através da rede de transporte público de 2014, em módulo.

Através da Figura 43 pode ser observado que as disparidades entre os tempos de viagem, em módulo, se concentram no intervalo de 1 a 10 minutos. Para três rotas geradas a disparidade entre os tempos foi de até 1 minuto, enquanto que para uma rota a disparidade está representada no intervalo de 20 a 25 minutos.

Com relação a rede de transporte público avançada para o ano de 2015, foram realizadas as mesmas análises. A distribuição de frequência das disparidades de

tempo entre as rotas geradas através do Google Maps e a rede são apresentadas na Figura 44.

Figura 44. Distribuição de frequência da diferença entre os tempos de viagem do Google Maps pela rede de transporte público avançada de 2015.

Os resultados encontrados foram diferentes, se comparados com o ano de 2014, apesar da diferença nula entre os tempos de viagem gerados através do Google Maps para as mesmas rotas entre os anos de 2014 e 2015. Através da Figura 44, pode-se notar que a concentração das disparidades de tempo está localizada, principalmente, no intervalo de tempo de -5 a 5 minutos.

Quando analisado o módulo das diferenças entre os tempos de viagem, vemos que o modelo de rede de transporte público do ano de 2015 se assemelha mais com os resultados apresentados pelo Google Maps, se comparado com o modelo de rede do ano de 2014 (Figura 45).

Figura 45. Avaliação da disparidade entre os tempos de viagem obtidos através do Google e através da rede de transporte público de 2015, em módulo.

O módulo da disparidade entre os tempos de viagem está concentrado entre o intervalo de 1 a 10 minutos, da mesma forma que o módulo das disparidades para o ano de 2014, porém o modelo de rede de 2015 apresenta uma quantidade maior de registros nesse intervalo, ou seja, a dispersão é menor. Para três rotas geradas, os tempos de viagem variam menos de um minuto enquanto que para uma rota gerada a diferença de tempo está localizada no intervalo de 20 a 25 minutos.

A comparação dos tempos de viagem das redes de transporte público com os tempos de viagem obtidos através do Google Maps é uma forma de controlar os resultados das redes, porém como foram associados dados reais de rastreamento de veículos (ônibus) são esperadas diferenças entre os tempos de viagem, pois se forem utilizadas pelo Google Maps as estimativas por horário disponibilizadas em formato GTFS pela SPtrans, os resultados serão distintos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foram criadas redes de transporte para estudos de acessibilidade na cidade de São Paulo, considerando tempos de viagem obtidos a partir de dados de rastreamento de veículos e incorporando a dinâmica espaço-temporal desses dados nas redes.

A acessibilidade, apesar de ser alvo de estudo de uma série de autores desde a década de 1920, tem sido mais estudada recentemente devido aos avanços tecnológicos que possibilitam o acesso a grandes volumes de dados de rastreamento, que permitem estudos de maior complexidade e menor nível de agregação. Nesta pesquisa foram considerados dados de rastreamento visando incorporar a dinâmica espaço-temporal do transporte público e individual nas redes de transporte para aplicação dos índices de acessibilidade.

Para a criação das redes de transporte com dados de rastreamento, foram realizadas parcerias com empresas que disponibilizaram esse tipo de informação, pesquisadas bases de dados em órgãos públicos e desenvolvidas metodologias para incorporar dados de rastreamento em modelos de rede em ambiente SIG. Outro desafio ao longo da pesquisa foi o desenvolvimento da metodologia para criação da rede de transporte multitemporal, que incorporou informações de períodos distintos dentro de uma única rede de transporte. Como resultado, a rede possibilitou a geração das rotas para dois períodos de análise, nos anos de 2014 e 2015.

Os tempos de viagem gerados a partir da rede de transporte público foram comparados com os previstos pelo Google Maps e os resultados mostraram que a rede é consistente. Pequenas variações nos tempos de viagem eram esperadas devido a natureza dos dados de rastreamento.

A avaliação da rede de transporte individual foi realizada através de dados de rastreamento, provenientes de outra fonte, e mostrou que os tempos de viagem das rotas traçadas são compatíveis com os dados de rastreamento.

Para utilizar as redes de transporte para mensurar a acessibilidade aos empregos que pagam menos do que 4 salários mínimos no município de São Paulo, foi realizada uma ampla revisão da literatura e o índice escolhido foi o índice de acessibilidade potencial, que permitiu retratar a acessibilidade aos empregos de interesse.

A aplicação do índice de acessibilidade, através de dados de quantidade de empregos por bairro e dos tempos de viagem obtidos pelas redes de transporte público e individual, permitiu o cálculo da acessibilidade dos bairros. Concluiu-se que os bairros localizados na região central do município, por possuírem grande quantidade de empregos e maior oferta de transporte público, apresentam índice de acessibilidade maior do que os bairros periféricos. Através do comparativo dos índices de acessibilidade, concluiu-se que a diferença entre os índices varia de bairro para bairro do município, sendo que a diferença é menor em bairros atendidos por linhas do metrô e maior quando há pouca oferta de transporte público.

As análises dos índices de acessibilidade resultantes permitem afirmar que as redes de transporte público e individual, criadas a partir de dados de rastreamento de veículos, enriquecem o cálculo do índice de acessibilidade potencial e se mostraram adequadas para o estudo da acessibilidade a empregos no município de São Paulo.

A partir das redes criadas e da metodologia desenvolvida, recomenda-se que sejam realizados mais estudos de acessibilidade no município de São Paulo, considerando não somente acesso aos empregos que pagam menos do que 4 salários mínimos, nem tampouco simulando apenas um horário de viagem de trabalho, como realizado nesta pesquisa. Vale ainda destacar a importância em expandir a área de estudo para incorporar a Região Metropolitana de São Paulo. Além disso, assim como foram calculados os índices de acessibilidade aos empregos, podem ser realizadas pesquisas de acessibilidade a equipamentos públicos de saúde, lazer, dentre outras categorias e explorados outros índices de acessibilidade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAS, A. (1983). **Discrete choice theory, information theory and the multinomial logit and gravity models**. Transportation Research B 17 (1), 13–23.

ARBEX, R.O.; da CUNHA, C.B.; SETTI, J.G.R. (2015). **Comparação de velocidades comerciais antes e depois da implantação de faixas exclusivas para ônibus na cidade de São Paulo através de análise de dados de GPS dos veículos**. 20º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito. ANTP, 2015. Disponível em: http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2015/06/12/3FB82D73-9327-4B96-A1FB-A90EC2193D81.pdf. Acessado em: 28 de outubro de 2015.

ARRUDA, J.B.F. (1999). **Determinação do impacto de projetos de transportes na acessibilidade do trabalhador às principais zonas de emprego urbano**. In: CNT/ANPET, orgs. Transporte em Transformação II. São Paulo, Makron Books. p.141-154.

BARADARAN, S.; RAMJERDI, F. (2001). **Performance of accessibility measures in Europe**. Journal of Transportation and Statistics, 4(2/3), 31-48.

BATTY, M. (2009). **Accessibility: In search of a unified theory**. Environment and Planning B: Planning and Design, 36, 191–194.

BEN AKIVA, M.; LERMAN, S.R. (1985). **Discrete Choice Analysis**. MIT Press, Cambridge, MA.

BENENSON, I.; MARTENS, K.; ROFÉ, Y. (2010). **Measuring the gap between car and transit accessibility**. Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board 2144 (1), 28– 35.

BERTOLINI, L.; LE CLERCQ, F.; KAPOEN, L. (2005). **Sustainable Accessibility: A Conceptual Framework to Integrate Transport and Land Use Plan-Making**. Two

Test- Applications in the Netherlands and a Reflection on the Way Forward. Transport Policy, Vol 12, pp 207-220.

BORGES, K.; DAVIS, C.; LAENDER, A. (2005). Modelagem conceitual de dados geográficos. In: CASANOVA, M. (Org). **Banco de Dados Geográficos**. MundoGeo, 2005. Versão digital: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/bdados/capitulos.html>. Acesso em novembro de 2015.

BREHENY, M.J. (1978). **The measurement of Spatial Opportunity in Strategic Planning**. Regional Studies 12:463-79.

BURNS, L.D.; GOLOB, T. (1976). **The Role of Accessibility in Basic Transportation Choice Behavior**. Transportation 5:175-98.

CARRUTHERS, D.; LAWSON, G. (1995). **The contribution of transport to the quality of life**. In: BLESSINGTON, H.K, ed. Urban Transport. London, Thomas Telford. p.11-20.

CEM (2015). **Centro de Estudos da Metrópole**. Disponível em: <http://www.fflch.usp.br/centrodametropole/>. Acessado em 04 de fevereiro de 2015.

CERVERO, R. (1996). **Paradigm shift: From automobility to accessibility planning** (Working Paper No. 677, Institute of Urban and Regional Development). Berkeley, CA: University of California.

CERVERO, R.; KOCKELMAN, K. (1997). **Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design**. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2 199 - 219

CHAPIN, F.S. (1974). **Human Activity Patterns in the City**. John Wiley & Sons, New York.

CPTM (2015). **Companhia Paulista de Trens Metropolitanos**. Disponível em: <http://www.cptm.sp.gov.br>. Acessado em 20 de fevereiro de 2015.

DAVIDSON, K.B. (1995). **Accessibility and isolation in transportation network evaluation**. Artigo apresentado na 7ª Conferência Mundial em Pesquisa de Transporte. The University of New South Wales, Sydney, Australia.

De La BARRA, T. (1989). **Integrated Land Use and Transport Modelling: Decision Chains and Hierarchies**. Cambridge University Press, Cambridge.

De SMITH, M.J.; GOODCHILD M.F.; e LONGLEY, P. (2015). **Geospatial Analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools – 5th Edition**. Disponível em: <http://www.spatialanalysisonline.com/HTML/>. Acessado em 08 de novembro de 2015.

DETRAN (2015). **Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo**. Disponível em: <http://www.detran.sp.gov.br/wps/portal/portaldetran/detran/estatisticastransito>. Acessado em 26 de agosto de 2015.

DILL, J.; SCHLOSSBERG, M.; LIANG, M.; MEYER, C. (2013). **Predicting transit ridership at the stop level: the role of service and urban form**. In: 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board.

EMTU (2015). **Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos**. Disponível em: www.emtu.sp.gov.br. Acessado em 17 de fevereiro de 2015.

EWING, R. (1993). **Transportation service standards as-if people matter**. Transportation Research Record 1400, pp 10-17.

FOOT, D. (1981) **Operational Urban Models**. Methuen, London.

GEURS, K.T.; RITSEMA VAN ECK, J.R. (2001). **Accessibility measures: review and applications**. RIVM report 408505 006, National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven. Disponível em <www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/408505006.html>.

GEURS, K.T.; VAN WEE, B. (2004). **Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions.** Journal of Transport Geography, 12, 127–140.

GEURS, K.T.; MONTIS, A.; REGGIANI, A. (2015). **Recent advances and applications in accessibility modelling.** Computers, environment and urban systems, 49, 82-85.

GIANNOTTI, F.; NANNI, M.; PEDRESCHI, D.; PINELLI, F. (2007). **Trajectory pattern mining.** In: Proceedings of the 13th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2007. p. 330-339.

GIANNOTTI, F.; NANNI, M.; PEDRESCHI, D.; PINELLI, F.; RENSO, C.; RINZIVILLO, S.; TRASARTI, R. (2011). **Unveiling the complexity of human mobility by querying and mining massive trajectory data.** The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases, v. 20, n. 5, p. 695-719, 2011.

GOODCHILD, M.F.; LONGLEY, P.A.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W. (2005). **Geographic information systems and science (Vol. 2).** John Wiley and Sons, Chichester.

GOODCHILD, M. F. (1992). **Geographical data modeling.** Computers & Geosciences, 18(4), 401-408.

GOOGLE (2005). **Transit.** Disponível em: <http://developers.google.com/transit/>. Acessado em 15 de fevereiro de 2015.

GUY, C.M. (1977). **A Method of Examining and Evaluating the Impact of Major Retail Developments on Existing Shops and Their Users.** Environment and Planning A 9:491-504

HÄGERSTRAND, T. (1970). **What about people in regional science?** People of the Regional Science Association 24, 7–21.

HANDY, S.L.; NIEMEIER, D.A. (1997). Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and Planning A* 29, 1175–1194.

HANSEN, W.G. (1959). **How accessibility shapes land use**. *Journal of American Institute of Planners* 25 (1), 73–76.

HESS, D.B. (2005). **Access to employment for adults in poverty in the Buffalo-Niagara region**. *Urban Studies* 42 (7), 1177–1200.

HORNER, M.W. (2004). **Spatial dimensions of urban commuting: a review of major issues and their implications for future geographic research**. *Prof. Geogr.* 56 (2), 160–173.

IBGE (2015). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acessado em 15 de fevereiro de 2015.

INGRAM, D.R. (1971). **The concept of accessibility: a search for an operational form**. *Regional Studies* 5, 101–107.

ISARD, W. (1956). **Location and Space Economy**. MIT Press, Cambridge. MA.

JUBILEE (2015). Disponível em: <https://tfl.gov.uk/tube/route/jubilee/>. Acessado em 10 de janeiro de 2016.

KAWABATA, M. (2003). **Job access and employment among low-skilled autoless workers in US metropolitan areas**. *Environment and Planning A* 35 (9), 1651–1668.

KAWABATA, M.; SHEN, Q. (2007). **Commuting inequality between cars and public transit: The case of the San Francisco Bay Area, 1990–2000**. *Urban Studies* 44 (9), 1759–1780.

KOENIG, J.G. (1980). **Indicators of urban accessibility: theory and applications**. *Transportation* 9, 145–172.

KRIZEK, K.J.; IACONO, M.; EL-GENEIDY, A.; LIAO, C.F.; JOHNS, R. (2009). **Access to destinations: application of accessibility measures for non-auto travel modes**. Minnesota Department of Transportation.

KWAN, M.P. (1998). **Space-time and integral measures of individual accessibility: a comparative analysis using a point-based framework**. *Geographical Analysis* 30 (3), 191–216.

KWOK, R.C.; YEH, A.G. (2004). **The use of modal accessibility gap as an indicator for sustainable transport development**. *Environment and Planning A*, 36(5), 921-936.

LAURINI, R.; THOMPSON, D. (1992). **Fundamentals of spatial information systems (Vol. 37)**. Academic press.

LAVIERI, P.S.; STRAMBI, O.; ARBEX, R.; de CARVALHO, E.C.S. (2015). **Caracterização da utilização de painel de mensagem variável nos pontos de parada de ônibus de São Paulo**. *TRANSPORTES*, 23(1), 87-94.

LEI, T.L.; CHURCH, R.L. (2010). **Mapping transit-based access: integrating GIS, routes and schedules**. *International Journal of Geographical Information Science* 24 (2), 283–304.

LEVINE, J.; GRENGS, J.; SHEN, Q. (2012): **Does Accessibility Require Density or Speed?**, *Journal of the American Planning Association*, 78:2, 157-172.

LEVINE, J. (1998). **Rethinking accessibility and jobs-housing balance**. *Journal of American Planning Association*, v.64, n.2, p.133-149.

LEVINSON, D.M. (1998). **Accessibility and the journey to work**. *Journal of Transport Geography* 6 (1), 11–21.

LITMAN, T. (2003). **Measuring Transportation: Traffic, Mobility and Accessibility**. *ITE Journal*, Vol 73, Nº 10, pp 28-32.

MAPLINK (2015). Disponível em: <http://maplink.com.br/>. Acessado em 01 de fevereiro de 2015.

MAVOA, S.; WITTEN, K.; McCREANOR, T.; O'SULLIVAN, D. (2012). **GIS based destination accessibility via public transit and walking in Auckland, New Zealand**. J. Transport Geography 20 (1), 15–22.

MCLOUGHLIN, J. (1969) **Urban and Regional Planning: A Systems Approach**. Faber & Faber, London.

MEIJA-DORANTES, L.; LUCAS, K. (2014). **Public transport investment and local regeneration: A comparison of London' s Jubilee Line Extension and the Madrid Metrosur**. Transport Policy, 35, 241-252.

METRÔ (2015). **Companhia do Metropolitano de São Paulo**. Disponível em: <http://www.metro.sp.gov.br/>. Acessado em 06 de fevereiro de 2015.

METROSUR (2015). Disponível em: https://www.metromadrid.es/es/viaja_en_metro/red_de_metro/lineas_y_horarios/linea12.html. Acessado em 10 de janeiro de 2016.

MILLER, H.J. (1999). **Measuring space–time accessibility benefits within transportation networks: basic theory and computational procedures**. Geographical Analysis 31 (2), 187–212.

OKABE, A.; SUGIHARA, K. (2012). **Spatial analysis along networks: statistical and computational methods**. John Wiley & Sons.

OLIVEIRA, A.V.M.; PAMPLONA, D.A.; FILHO, D.P.P. (2015). **Estudo e previsão de demanda do transporte urbano coletivo público na Região Metropolitana de São Paulo**. Revistas dos Transportes Públicos – ANTP – Ano 37 – 2015 – 1º quadrimestre.

ONU - Organização das Nações Unidas. **World Urbanization Prospects – The 2011 Revision – Highlights**. United Nations Organizations – Department of Economic & Social Affairs – Population Division, New York, 2012.

OSM (2015). Open Street Maps. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em 05 de fevereiro de 2015.

O’SULLIVAN, D.; UNWIN, D. J. (2003). **Geographic information analysis**, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, N.J.

OWEN, A.; LEVINSON, D. (2012). **Annual accessibility measure for the Twin Cities metropolitan area**. Minnesota Department of Transportation.

OWEN, A.; LEVINSON, D. (2015). **Modeling the commute mode share of the transit using continuous accessibility to jobs**. Transportation Research Part A: Policy and Practice, volume 74, april 2015, pages 110-122.

PÁEZ, A.; SCOTT, D.M.; MORENCY, C. (2012). **Measuring accessibility: Positive and normative implementations of various accessibility indicators**. Journal of Transport Geography, 25, 141–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>

PÁEZ, A.; MONIRUZZAMAN, M.; BOURBONNAIS, P. L.; MORENCY, C. (2013). **Developing a web-based accessibility calculator prototype for the Greater Montreal Area**. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 58, 103-115.

RAIA JÚNIOR, A.A. (2000). **Acessibilidade e mobilidade na estimativa de um índice de potencial de viagens utilizando redes neurais artificiais e sistemas de informações geográficas**. p. 19. Dissertação de mestrado – USP – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000 - Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-10112001-160812/en.php> acesso em 11 de dezembro de 2014.

RAIS (2014). **Relação Anual de Informações Sociais**. Disponível em: <http://acesso.mte.gov.br/portal-pdet/home/>. Acessado em 10 de outubro de 2015.

REILLY, W. J. (1929). **Marketing Investigations**. Ronald Press Company

ROSADO, M.C.; ULYSSÉA NETO, I. (1999). **Determinação de índices de acessibilidade a serviços de educação utilizando sistemas de informações geográficas**. Em: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XIII. Anais. São Carlos, 1999. ANPET. v.I, p. 29-39.

SALES FILHO, L.H. (1997). **Indicadores de acessibilidade: alguns aprimoramentos analíticos e seu uso na avaliação de redes estruturais de transporte urbano**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XI. Anais. 1995. ANPET. Rio de Janeiro. v2, p.985-996.

SALES FILHO, L.H. (1998). **The accessibility matrix – a new approach for evaluating urban transportation networks**. Paper presented at WORLD CONFERENCE ON TRANSPORTATION RESEARCH, 8, Antwerp, Belgium, 20p.

SALONEN, M.; TOIVONEN, T. (2013): **Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport**, Journal of Transport Geography, 31, 143-153.

SCHEURER, J.; CURTIS, C. (2007). **Accessibility measures: Overview and practical applications**. Department of Urban and Regional Planning, Curtin University, p. 52, 2007.

SHEN, Q. (2001). **A spatial analysis of job openings and access in a US metropolitan area**. Journal of the American Planning Association 67 (1), 53–68.

SILVA, C. (2008). **Comparative Accessibility for Mobility Management: The Structural Accessibility Layer**, PhD thesis, Research Centre for Territory, Transport and the Environment, Oporto University.

SILVA, C.; PINHO, P. (2010). **The structural accessibility layer (SAL): revealing how urban structure constrains travel choice**. Environment and Planning A 42 (11), 2735–2752.

SPTTrans (2014). **São Paulo Transporte S.A.** Disponível em: <http://www.sptrans.com.br/>. Acessado em 25 de abril de 2014.

STEWART, J. Q. (1948). **Demographic gravitation: Evidence and application.** Sociometry, 11, 31–58.

STEWART, J. Q. (1947). **Empirical mathematical rules concerning the distribution and equilibrium of population.** In: Geography Review, n. 37, p. 461–485.

TAGORE, M.R.; SIKDAR, P.K. (1995). **A new accessibility measure accounting mobility parameters.** Artigo apresentado na 7ª Conferência Mundial em Pesquisa de Transporte. The university of South Wales, Sydney, Austrália.

THILLI, J.C.; HOROWITZ, J.L. (1997). **Travel time constraints in destination choice sets.** Geographical Analysis 29, 108–123.

THILL, J.C. (2009). **Transportation applications of geographic information systems.** In M. Madden (Ed.), Manual of geographic information systems (pp. 1035–1049). Washington, DC: ASPRS.

TOMTOM (2015). Disponível em: http://www.tomtom.com/pt_br/. Acessado em: 01 de fevereiro de 2015.

VAN WEE, B. (2016). **Accessible accessibility research challenges.** Journal of Transport Geography, 51, 9-16.

WANG, D.; PEDRESCHI, D.; SONG, C.; GIANNOTTI, F.; BARABÁSI, A.L. (2011). **Human mobility, social ties, and link prediction.** In: Proceedings of the 17th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2011. p. 1100-1108.

WEBSTER, F.V.; BLY, P.H.; PAULLEY, N.J. (1988). **Urban Land-Use and Transport Interaction: Policies and Models.** Gower, Aldershot.

WEIBULL, J. W. (1980). **On the numerical measurement of accessibility.** Environment and Planning A, v. 12, n. 1, p. 53-67, 1980.

WILLIAMS, H.C.W.L. (1976). **Travel demand models, duality relations and user benefit analysis.** Journal of Regional Science 16 (2), 147– 166.

WILLIAMS, H.C.W.L.; SENIOR, M.L. (1978). **Accessibility spatial interaction and the spatial benefit analysis of land use—transportation plans.** In: Karlquist, A. (Ed.), Spatial Interaction Theory and Planning Models. North-Holland, Amsterdam.

WILSON, A.G.; REES, P.H.; LEIGH, C.M. (1977). **Models of Cities and Regions: Theoretical and Empirical Developments.** John Wiley & Sons, Ltd Chichester.

YIANNAKOULIAS, N.; BLAND, W.; SVENSON, L.W. (2013). **Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care.** Applied Geography 39, 172–182.