

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**ANÁLISE DA INTERDEPENDÊNCIA ENTRE O
DESENVOLVIMENTO URBANO E O TRANSPORTE
URBANO SOBRE TRILHOS**

Raphael Bruno Alves Teixeira

Belo Horizonte

2020

Raphael Bruno Alves Teixeira

**ANÁLISE DA INTERDEPENDÊNCIA ENTRE O
DESENVOLVIMENTO URBANO E O TRANSPORTE
URBANO SOBRE TRILHOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientador: Marcelo Franco Porto

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2020

T266a	<p>Teixeira, Raphael Bruno Alves. Análise da interdependência entre o desenvolvimento urbano e o transporte urbano sobre trilhos [recurso eletrônico] / Raphael Bruno Alves Teixeira. – 2020. 1 recurso online (xi, 104 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Marcelo Franco Porto.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexo: f.101-104. Bibliografia: f. 90-100.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Transportes - Teses. 2. Planejamento urbano - Teses. 3. Transporte ferroviário – Teses. 4. Transportes – planejamento – Teses. 4. Acessibilidade – Teses. I. Porto, Marcelo Franco. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 656(043)



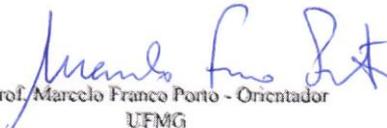
FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise da interdependência entre o desenvolvimento urbano e o transporte urbano sobre trilhos

RAPHAEL BRUNO ALVES TEIXEIRA

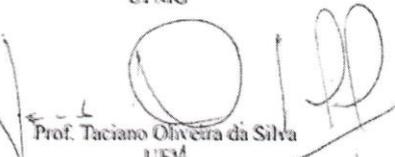
Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES.

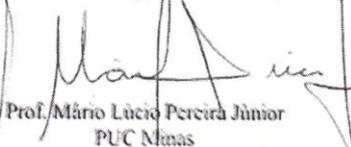
Aprovada em 03 de março de 2020, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Marcelo Franco Porto - Orientador
UFMG


Prof. Leandro Cardoso
UFMG


Prof. Ronaldo Guimarães Gouvêa
UFMG


Prof. Taciano Oliveira da Silva
UFV


Prof. Mário Lúcio Pereira Júnior
PUC Minas

Belo Horizonte, 3 de março de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sabedoria e força nos momentos difíceis, e por bênçãos incontáveis.

Agradeço ao meu orientador Marcelo Franco Porto, por apoiar minha visão e decisões e pelo suporte oferecido. Também aos demais professores e funcionários do departamento de Transportes e Geotecnia da UFMG, pela dedicação e excelência. Um muito obrigado aos professores Leandro Cardoso, Mario Lucio Pereira Junior, Ronaldo Guimarães Gouvêa e Taciano Silva por se disporem a participar da banca. Um grande obrigado também à professora Renata Oliveira pela conversa que tivemos no início desse processo e que foi uma bússola durante toda a escrita desta dissertação

Agradeço aos meus pais Ana e Vicente, meus irmãos Kariny e Breno e a toda minha família pelo empenho e amor ao longo desses 28 anos, certamente não chegaria até aqui sem vocês. Um enorme obrigado à Cinthia Stecchini pela amizade e por sempre estar disponível para ajudar, tack så mycket min käraste vän! Um agradecimento especial também ao Bruno Silva, cuja ajuda foi fundamental para entender a implementação de um modelo, se não fosse por sua ajuda na hora certa, estaria até hoje parado no mesmo ponto da dissertação. Agradeço a todos os meus amigos que de uma forma ou de outra estiveram presentes, me ouviram reclamar com paciência, e me deram suporte. E por fim não poderia deixar de agradecer à Anaís Mitchell por escrever a trilha sonora do meu ano de 2019. We're gonna sing it again and again.

*"Hounddog howls and the whistle blows, train come a-rollin' clickety-clack
everybody tryin' to get a ticket to go, but those who go, they don't come back,
they're going way down Hadestown, way down under the ground!"*

Anaïs Mitchell *in* Hadestown

*"The duty of planning tomorrow's work is today's duty;
though its material is borrowed from the future,
the duty, like all duties, is in the Present."*

C.S. Lewis *in* The Screwtape Letters

RESUMO

TEIXEIRA, Raphael Bruno Alves. **Análise da interdependência entre o desenvolvimento urbano e o transporte urbano sobre trilhos**. 122f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

A relação entre a ocupação urbana do solo e a infraestrutura de transportes é indissociável, entretanto o planejamento urbano e o planejamento de transportes são comumente tratados como duas áreas distintas, levando ao surgimento de problemas. Torna-se necessário, portanto unificar as duas áreas e buscar soluções coordenadas focadas em resultados. Nesse contexto, esse trabalho analisou a interdependência existente entre o desenvolvimento urbano e o transporte urbano sobre trilhos, e avaliou o impacto mútuo entre esses fatores. Criou-se um modelo de previsão de demanda do tipo *Spatial Durbin Error Model*, selecionado através da comparação dos resultados dos principais modelos de regressão espacial. Comprovou-se a natureza espacial do problema pelo teste do índice de Moran e multiplicador de Lagrange. Analisou-se indicadores do desenvolvimento urbano que influenciam e são influenciados pelo modo de transporte ofertado e comparou-se dois cenários futuros que preveem diferenças na ocupação territorial, buscando-se a maximização dos benefícios de transporte e do desenvolvimento voltado à acessibilidade. Os resultados apontam para uma forte relação entre as mudanças coordenadas no uso do solo e o aumento da demanda de viagens e melhorias nos indicadores propostos. A parcela maior da população vivendo nos arredores das estações se traduziu em um número de passageiros no transporte ferroviário cerca de 70% maior em comparação ao cenário sem densificação nessas áreas. O *share* do transporte ferroviário em relação aos outros modos de transporte também aumentou 62% nesse cenário, assim como um substancial aumento no acesso a empregos nessas áreas.

Palavras-Chaves: Interdependência, planejamento urbano; planejamento de transportes; transporte sobre trilhos; acessibilidade; modelo de regressão espacial.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Raphael Bruno Alves. **Análise da interdependência entre o desenvolvimento urbano e o transporte urbano sobre trilhos**. 122f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

The relationship between urban land use and transport infrastructure is inseparable, nevertheless urban planning and transport planning are treated as two distinct areas, which often leads to problems. It is therefore necessary to unify the two areas and seek coordinated, result-oriented solutions. In this context, this work analyzed the interdependence between urban development and urban rail transport, and assessed the mutual impact among both factors. A demand forecast model of the Spatial Durbin Error type was created, selected through comparison between the results of the main spatial regression models. The spatial nature of the problem was confirmed via Moran's I and Lagrange multiplier tests. Urban development indicators that influence and are influenced by the mode of transport were analyzed. Two future scenarios that predict differences in territorial occupation were compared, seeking to maximize the benefits of transport and accessibility oriented development. The results point to a strong relationship between changes in urbanization and the increased demand for travel, as well as improvements in the proposed indicators. The larger share of the population living in the vicinity of train stations translated into a 70% increase in the number of public transport users compared to the scenario without densification in these areas. The modal share of rail transport also grew 62% in this scenario, as well as a substantial increase in access to jobs in these areas.

Keywords: Interdependence, urban planning; transport planning; rail transport; accessibility; spatial regression model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rede de trens e metrô de Sydney em 2020 (TRANSPORT FOR NSW)	5
Figura 2: Participação percentual dos principais periódicos na referência bibliográfica	8
Figura 3: Ano de publicação dos artigos na referência bibliográfica	9
Figura 4: Padrões de ruas. Fonte: GARCÍA-PALOMARES <i>et al.</i> (2018).....	34
Figura 5: Contiguidades do tipo <i>Rook</i> (A), <i>Queen</i> (B) e 2-vizinhos-mais-próximos.....	42
Figura 6: Diagrama metodológico	44
Figura 7: Áreas de Serviço a pé e por ônibus	46
Figura 8: Histograma da distribuição das viagens por estação antes (esquerda) e depois (direita) da transformação aplicando o logaritmo natural	51
Figura 9: Qualidade do ajuste do MIE multiníveis.....	59
Figura 10: Qualidade do ajuste para o modelo SDEM ²	60
Figura 11: Densidade populacional média nas áreas de serviço em 2016 [hab/ha]	62
Figura 12: Densidades médias futuras adotadas nas áreas de serviço [hab/ha].....	63
Figura 13: Potencial de novos moradores nas áreas de serviço das estações	64
Figura 14: Taxa de empregos / P.E.A. nas áreas de serviço em 2016 (logaritmo).....	66
Figura 15: Mapa de acessibilidade temporal por transporte público – estação <i>Redfern</i>	67
Figura 16: P.E.A. acessível em 41 minutos por transporte público em 2016 às áreas de serviço	68
Figura 17: Mapa dos índices de centralidade das estações.....	69
Figura 18: Mapa do potencial de atração de novos negócios e geração de empregos	70
Figura 19: Projeção da taxa de empregos / P.E.A. nas áreas de serviço em 2051 (logaritmo)	71

Figura 20: Polígonos de acesso temporal antes e depois da implantação da linha do metrô ...	72
Figura 21: Concentração de PM10 em <i>Macquarie Park</i> antes e durante o fechamento do ramal ferroviário <i>Epping-Chatswood</i> . Fonte: NSW Government, 2020.	77
Figura 22: Resultado do modelo SDEM ² para o cenário futuro 1	79
Figura 23: Resultado do modelo SDEM ² para o cenário futuro 2	80
Figura 24: Diferenças de movimentação entre os cenários 2 e 1	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição das variáveis incluídas nos modelos	48
Tabela 2: Coeficientes de correlação de Pearson	49
Tabela 3: Resumo das variáveis independentes incluídas em cada modelo.....	51
Tabela 4: Resultados estatísticos da regressão linear do tipo MMQ.....	52
Tabela 5: Índice global de Moran para os resíduos da regressão MMQ.....	52
Tabela 6: Diagnóstico do multiplicador de Lagrange para autocorrelação espacial	52
Tabela 7: Resultados estatísticos dos modelos <i>lag</i> , SLX e SEM	54
Tabela 8: Resultados estatísticos dos modelos SAC, SDM e SDEM.....	55
Tabela 9: Resultados dos impactos do modelo SDEM ²	56
Tabela 10: Resultados do MIE nível inferior (<i>lag</i>)	57
Tabela 11: Resultados do MIE nível superior (SAC).....	59
Tabela 12: Resumo da densidade populacional nas áreas de serviço em 2016 [hab/ha].....	61
Tabela 13: Resumo de densidades populacionais propostas nas áreas de serviço [hab/ha]	63
Tabela 14: Resumo do potencial de novos moradores nas áreas de serviço	64
Tabela 15: Resumo estatístico das taxas de emprego / P.E.A. nas áreas de serviço	65
Tabela 16: Resumo da P.E.A. acessível em 41 minutos por transporte público às estações....	68
Tabela 17: Resumo do número de novos empregos adicionados às áreas de serviço.....	71
Tabela 18: Resumo estatístico da taxa de empregos / P.E.A. nas áreas de serviço.....	72
Tabela 19: Vagas de emprego acessíveis em 41 minutos por T.P. antes e depois do metrô	73
Tabela 20: Equipamentos públicos de saúde e educação acessíveis em 41 minutos por T.P. antes e depois do metrô	73

Tabela 21: Equipamentos públicos de cultura e lazer acessíveis em 41 minutos por T.P. antes e depois do metrô.....	74
Tabela 22: Tempos totais de viagem antes e depois do metrô [minutos].....	75
Tabela 23: Resumo estatístico das movimentações nas estações para os cenários futuros.....	81
Tabela 24: Custos do tempo de viagens para os cenários futuros analisados.....	83
Tabela 25: Divisão modal das viagens na <i>Greater Sydney</i> em 2017.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABS	Australian Bureau of Statistics
AIC	Akaike Information Criterion
AUD	Dólar australiano
BRT	Bus rapid transit
CBD	Central business district
CBTU	Companhia Brasileira de Trens Urbanos
DOA	Desenvolvimento orientado à acessibilidade
DOTS	Desenvolvimento orientado ao transporte sustentável
GEE	Gases de efeito estufa
GTFS	General Transit Feed Specification
hab	Habitantes
Lag	Spatially lagged Y model
MIE	Modelo de interação espacial
MMQ	Mínimos múltiplos quadrados
NSW	New South Wales
OD	Origem-Destino
P.E.A.	População economicamente ativa
RM	Região metropolitana
SAC	Spatial Autoregressive Combined Model
SAR	Spatial Autoregressive
SDEM	Spatial Durbin Error Model
SDM	Spatial Durbin Model
SEM	Spatial Error Model
SLX	Spatially Lagged X Model
T.P.	Transporte público
TPAC	Transporte público de alta capacidade
USD	Dólar americano
VKT	Vehicle-kilometers traveled
VLТ	Veículo leve sobre trilhos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	6
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	6
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	6
1.2	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	7
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
2	REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	8
2.2	A ACESSIBILIDADE NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE	9
2.3	TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO URBANO	12
2.3.1	<i>Desenvolvimento compacto, adensamento, DOTS, DOA e 5-D's</i>	12
2.3.2	<i>Transporte urbano sobre trilhos como indutor de desenvolvimento</i>	18
2.3.3	<i>Planejamento regional integrado</i>	20
2.3.4	<i>Externalidades do transporte</i>	24
2.3.5	<i>Indicadores do desenvolvimento urbano</i>	26
2.4	ANÁLISE DE DADOS E MODELOS USADOS NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE.....	30
2.4.1	<i>Principais fatores que influenciam o ridership</i>	30
2.4.2	<i>Modelos recorrentes de previsão de demanda</i>	36
3	METODOLOGIA.....	44
3.1	ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL DO TRANSPORTE PÚBLICO.....	45
3.1.1	<i>Obtenção de dados de viagem e uso do solo</i>	45
3.1.2	<i>Criação de modelo Uso do Solo x Ridership.....</i>	47
3.2	ANÁLISE DO POTENCIAL DA OFERTA DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO	61
3.2.1	<i>Cálculo dos indicadores do desenvolvimento urbano</i>	61

3.2.2	<i>Avaliação de cenários futuros</i>	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	90
	ANEXO A	101

1 INTRODUÇÃO

A palavra interdependência pode ser definida como estado ou condição de duas coisas ligadas entre si por uma dependência recíproca, em virtude da qual realizam as mesmas finalidades pelo auxílio mútuo. Assim é a relação entre o transporte em suas diversas formas e o meio urbano, como dois lados indissociáveis de uma mesma moeda. Talvez por esta razão o potencial de moderar a demanda de transporte através de mudanças no ambiente construído é um dos temas mais extensamente pesquisado em planejamento urbano (EWING; CERVERO, 2010). Cao *et al.* (2009) analisam 38 estudos que testam os efeitos de auto seleção residencial no comportamento de viagem, e concluem que quase todos esses estudos encontraram evidências “inequívocas” de associações estatisticamente significantes entre o ambiente construído e o comportamento de viagem, independentemente da influência de auto seleção. No entanto, ao se falar em planejamento, o que se observa na prática é a separação das duas áreas. O planejamento de transporte se torna uma ferramenta secundária usada apenas para solucionar problemas ou suprir demandas existentes. Esse descompasso tem levado grandes cidades em todo o mundo a um caos urbano, observado, sobretudo nos congestionamentos diários e seus inúmeros impactos negativos.

O conceito de acessibilidade tem sido amplamente utilizado para esclarecer os benefícios resultantes da relação entre uso do solo e sistemas de transporte. Deboosere *et al.*, (2018) cita diversos estudos que analisaram esses benefícios, dentre os quais destacam-se valores da terra mais alto, menores riscos de exclusão social, menor duração de tempo de desemprego, e aumento na taxa de nascidos vivos em áreas com alta acessibilidade. O nível de acesso por transporte público demonstrou-se relacionado ainda ao aumento em *share* modal do transporte público.

Segundo Alonso (1964 apud DEBOOSERE *et al.*, 2018), as áreas com maior acessibilidade atraem a maior parte do desenvolvimento e se tornam os centros nas cidades. Em um processo que se auto-reforça, devido ao maior acesso a empregos e mão de obra, a competição favorece o desenvolvimento mais intensivo nesta localidade central, o que faz com que os preços aumentem. Mudanças no sistema de transporte, portanto, resultam em mudanças nos padrões do uso do solo através do efeito intermediador da duração de viagem e do valor da terra.

A coordenação entre órgãos públicos regionais e locais, combinada a circunstâncias econômicas favoráveis, são pré-condições para a associação entre transporte e

desenvolvimento acontecer (STARICCO; VITALE BROVARONE, 2018). No entanto, com raras exceções, à exemplo de Estocolmo (CERVERO, 1995) e outras localidades europeias e asiáticas, observou-se uma dissociação entre planejamento urbano e planejamento de transportes, entre responsáveis nas escalas local e regional, ou ambos. Há casos extremos como o observado na Região Metropolitana de Belo Horizonte, onde o planejamento urbano é responsabilidade das prefeituras, ignorando completamente a interação urbana que ocorre na metrópole, que não se restringe a limites municipais. A Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte existe apenas como um órgão consultivo, sem poder de deliberação. O planejamento de transporte, por sua vez, está totalmente fragmentado entre diversos entes que possuem interação mínima ou nula entre si. O transporte rodoviário é composto por ônibus municipais que são responsabilidade das secretarias municipais de transporte, e por ônibus metropolitanos, responsabilidade da Secretaria Estadual de Infraestrutura de Minas Gerais. O transporte ferroviário urbano, por sua vez, é gerido pela CBTU, uma empresa pública federal que gerencia o metrô BH e sistemas de diversas outras cidades no Brasil. Esse tipo de separação de responsabilidades é o status quo observado no Brasil, porém esse fenômeno e suas consequências são observados também em países desenvolvidos.

Nesse estudo tomou-se como exemplo a ser analisado a cidade de Sydney, a maior da Austrália. Os principais fatores para esta escolha são: familiaridade com o sistema de transporte e o ambiente local, sendo esse o atual lugar de residência do autor desse estudo; Pronta disponibilidade de dados abertos do transporte e do meio urbano, disponibilizados pelo governo estadual de *New South Wales* (NSW) e pelo *Australian Bureau of Statistics* (ABS); Existência de vários projetos de transporte em diferentes fases de implantação e que irão mudar a dinâmica da cidade no futuro próximo; Necessidade de mudanças no uso e ocupação do solo; e finalmente, mas não menos importante, o fato de que o local de aplicação do estudo não é um fator limitante, pois se espera que possa ser replicado em qualquer lugar onde haja dados disponíveis.

Em Sydney o planejamento de transportes é feito de modo integrado em escala metropolitana e regional e é de exclusiva responsabilidade do governo estadual de Nova Gales do Sul. Todavia, o gerenciamento da operação de diferentes modos é feito por entidades separadas, tanto públicas quanto privadas, o que resulta em falta de comunicação entre as partes e falta de sincronismo de horários entre os diferentes modos de transporte, ao contrário do que se observa em Estocolmo, por exemplo. O planejamento espacial em Sydney, por sua vez, até

recentemente era responsabilidade unicamente das prefeituras, que de modo geral levam em consideração a existência de infraestrutura de transportes em suas decisões, porém a escala local impõe limites ao planejamento integrado. Apenas em 2018, com uma mudança na legislação, tornou-se obrigatório a aprovação de leis de uso e ocupação locais pelo órgão estadual de planejamento metropolitano (GREATER SYDNEY COMMISSION, 2019) para adequar à visão de longo prazo pra toda a região, apesar das prefeituras ainda manterem um nível de autonomia sobre o tema. Também vai à contramão de um planejamento espacial eficiente a preferência da população australiana por residências unifamiliares, que compõem 71% das habitações da *Greater Sydney*, o que faz com que a densidade populacional seja muito baixa, da ordem de 1.200 hab/km² [12 hab/ha] em 2016, ao se considerar apenas a área construída (AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS, 2016) o que também causa espraiamento urbano.

Estima-se que a população da região metropolitana de Sydney deverá crescer de 5,1 milhões em 2017 para entre 6 a 6,4 milhões de habitantes em 2027 (AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS, 2017). Esse rápido crescimento deverá colocar ainda mais pressão em um mercado imobiliário que já apresenta altos valores médios – AU\$840.000¹ em janeiro de 2019 (NERIDA CONISBEE, 2019) e baixos índices de vacância de imóveis, de cerca de 3,5% em julho de 2019 (REINSW, 2019). Sem um projeto ambicioso de densificação em alguns subúrbios, a cidade sofrerá ainda mais os efeitos do espraiamento. Há vários projetos de revitalização de distritos inteiros em andamento (*Green Square, Barangaroo*) ou em fase de planejamento (*Waterloo, The Bays Precinct*) que podem servir de modelo para a implantação em novas estações, pois criam novas centralidades com usos mistos, boa conectividade ao TP e estrutura convidativa para pedestres e ciclistas, além de maiores densidades. Dessa forma, espera-se que grande parte do crescimento populacional previsto para a próxima década seja absorvido por áreas ao redor de estações, bem servidas de transporte público.

A rede de trens metropolitanos em Sydney é ampla, se estendendo por 813 km de trilhos divididos entre nove linhas, com trechos compartilhados entre duas ou mais linhas, e 175 estações no total (TRANSPORT FOR NSW, 2018). A rede sobre trilhos inclui também o metrô de Sydney, inaugurado no mês de maio de 2019 e composto de uma linha com 36 km e 13 estações e com trens *driverless* a cada 4 minutos no horário de pico (TRANSPORT FOR NSW, 2019a). Há também uma linha de VLT com 12 km e 23 estações conectando os subúrbios do *Inner West* à estação Central (TRANSDEV, 2019) e outras duas linhas de VLT

¹ AU\$1 equivale a R\$4,03, em 24/08/2020.

(*CBD & Southeast Light Rail*) inauguradas em 2020 que ligam o distrito central aos subúrbios à sudeste deste, em uma linha em formato de Y com 12 km de extensão total. Além destas, está sendo construída outra linha de VLT (*Parramata Light Rail*) também com 12 km de extensão e servindo a centralidade de Parramata e subúrbios adjacentes, bem como a segunda fase do metrô (*Sydney Metro City & Southwest*) com 30 km e 18 estações, sendo sete novas e 11 estações já existentes que fazem parte de uma linha de trens metropolitanos que será convertida para o metrô (TRANSPORT FOR NSW, 2019a).

Apesar da extensa rede ferroviária (Figura 1), a vasta maioria dos habitantes da *Greater Sydney* utiliza o automóvel para seus deslocamentos diários, com o *share* modal do transporte individual chegando a 65,6% dos deslocamentos em 2016 enquanto a soma de todos os modos de transporte público, mesmo em crescimento representa apenas 20,4%, sendo 13,5% por modos ferroviários e 6,9% por ônibus (AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS, 2016). As grandes distâncias e consequentes tempos de deslocamento elevados influenciam nesse cenário, com distâncias que passam dos 50 km e tempo de viagem embarcado de mais de uma hora entre as estações terminais e a estação Central de Sydney. Pesa também o preço das passagens que pode chegar a AU\$50 por semana, incluindo a falta de opções periódicas para usuários frequentes (ticket mensal, anual, etc.). Além disso, o *headway* em muitas linhas é insatisfatório mesmo em horário de pico e constantes atrasos de mais de cinco minutos chegam a afetar mais de 20% dos trens em algumas linhas em certos meses do ano (TRANSPORT FOR NSW, 2019b). Parte do problema se deve à sinalização antiga e a uma demanda em forte crescimento, de modo que o sistema não consegue suprir a demanda adequadamente. No ano fiscal de 2013-14 a rede de trens metropolitanos transportou 282,2 milhões de passageiros (TRANSPORT FOR NSW, 2015). Apenas quatro anos depois, no ano de 2017-18, esse número havia subido para 359,2 milhões, um crescimento de 27,3% no *ridership* (TRANSPORT FOR NSW, 2018). Parte do problema deverá ser solucionado a partir da inauguração da segunda fase do metrô de Sydney em 2024, que atenderá o CBD e irá anexar um trecho existente de uma linha de trem metropolitano, liberando capacidade de via e proporcionando um aumento na quantidade de trens que atendem as demais linhas. Estima-se que com isso haverá um aumento de 60% na capacidade total de passageiros da rede entrando e saindo do CBD (TRANSPORT FOR NSW, 2019a).

Há vários fatores que demonstram a necessidade por esses investimentos, dentre eles a iminente saturação da rede de trens, aliada ao aumento pela demanda de transporte e a necessidade de se criar novas habitações em um espaço de tempo relativamente curto, devido

ao rápido crescimento populacional. Para que esses objetivos sejam alcançados de maneira eficiente e usando conceitos modernos de planejamento urbano, Sydney foi escolhida como local de estudo.



Figura 1: Rede de trens e metrô de Sydney em 2020 (TRANSPORT FOR NSW)

1.1 Objetivos do trabalho

1.1.1 Objetivo geral

Diante do exposto, o objetivo geral desse trabalho é analisar o impacto mútuo que a reconfiguração urbana tem na demanda por transporte público, e que a oferta de capacidade de transporte tem nos padrões de uso e ocupação do solo.

1.1.2 Objetivos específicos

Especificamente, espera-se alcançar os seguintes objetivos:

- Identificação das características urbanas que apresentam maior efeito na geração de demanda em Sydney.
- Criação de um modelo de demanda que inclua as variáveis identificadas no item anterior.
- Análise do potencial de ocupação urbana ordenada por meio da oferta de capacidade de transporte em Sydney.
- Análise do impacto na acessibilidade causado pela reconfiguração urbana e maior oferta de transporte público.

Este estudo tem em seu cerne a motivação de responder a seguinte questão: É possível viabilizar modos de transporte ferroviário de alta capacidade através de alterações nos padrões urbanísticos? Optou-se por focar em modos de alta capacidade por sua inerente vantagem em relação à quantidade de passageiros transportados, que lhe confere maior potencial de transformação urbana, e por ser muitas vezes descartado devido unicamente aos altos investimentos requeridos. Há casos em que opções de média capacidade tais como VLT ou BRT atendem às necessidades e observa-se que já são muitas vezes preferidos pelo menor custo de implantação. No entanto, esse estudo foca em avaliar justamente se com uma visão de longo prazo a implantação de modos de alta capacidade pode ser viabilizada.

A hipótese principal é que a instalação de modos de transporte ferroviários urbanos de alta capacidade, aliada a um planejamento territorial que promova alterações direcionadas no uso da terra, induzem a geração de demanda por transporte público suficiente para viabilizar esses modos. Paralelamente, admitem-se duas hipóteses: que a reconfiguração do uso do solo supre a crescente demanda por moradia e, conseqüentemente, contém o espraiamento urbano, que é um grande problema observado em Sydney; e ainda que os ganhos coletivos de acessibilidade

e a redução das externalidades negativas compensam os custos de construção e operação no longo prazo. Como esperado, os resultados demonstraram que, se bem alinhados, planejamento urbano e provisão de infraestrutura podem se viabilizar mutuamente e justificar os investimentos necessários mesmo que a configuração urbana atual não preveja demanda suficiente.

1.2 Contribuição científica

A principal contribuição científica desse trabalho consiste do estudo dos efeitos mútuos observados na demanda do transporte público e no potencial de transformação urbana que esse representa. Ampliou-se o entendimento da relação de interdependência entre as duas áreas e estendeu-se o estudo para além da análise de demanda baseada em condições urbanas existentes, que é o comumente observado no planejamento de transporte. Esse trabalho apresenta uma metodologia para a quantificação do potencial de uso do solo urbano a partir do investimento em transporte urbano sobre trilhos, que pode ser aplicada a quaisquer localidades onde haja dados disponíveis.

1.3 Estrutura da dissertação

Além desse capítulo introdutório, outros quatro capítulos compõem esse trabalho. No Capítulo 2 será apresentada a revisão da literatura que fundamenta a metodologia dessa pesquisa, apresentada no capítulo 3. Os principais resultados obtidos são discutidos no capítulo 4 e finaliza-se esse trabalho com as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros, no capítulo 5.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo trata da relação entre desenvolvimento e transporte no meio urbano e a abordagem adotada na literatura para mensurar esta interação.

2.1 Revisão sistemática da literatura

Inicialmente buscou-se no *Google Scholar* resultados dos últimos cinco anos que contivessem a palavra “interdependência” relacionada a outras palavras chave:

- “*land use*” and “*rail*” “*travel demand*” “*interdependence*” – 75 resultados
- “*land use*” impact in “*public transport demand*” – 109 resultados
- “interdependência” entre “uso do solo” e “demanda por transporte” – 41 resultados
- “interdependência” entre “planejamento urbano” e “demanda por transporte” – 42 resultados

Também efetuou-se a busca por:

- “*public transport*” or “*transit*” and “*demand model*” – 428 resultados
- “relação” entre “uso do solo” e “demanda por transporte” – 216 resultados

Dentre os resultados foram encontrados aproximadamente 30 artigos que correspondem de alguma forma à temática desse estudo. Os resultados das pesquisas iniciais, no entanto, foram amplamente expandidos através da técnica *snowball* ao longo do tempo. No total foram selecionados 62 artigos, de 38 periódicos diferentes. A Figura 2 apresenta os principais periódicos e sua participação.

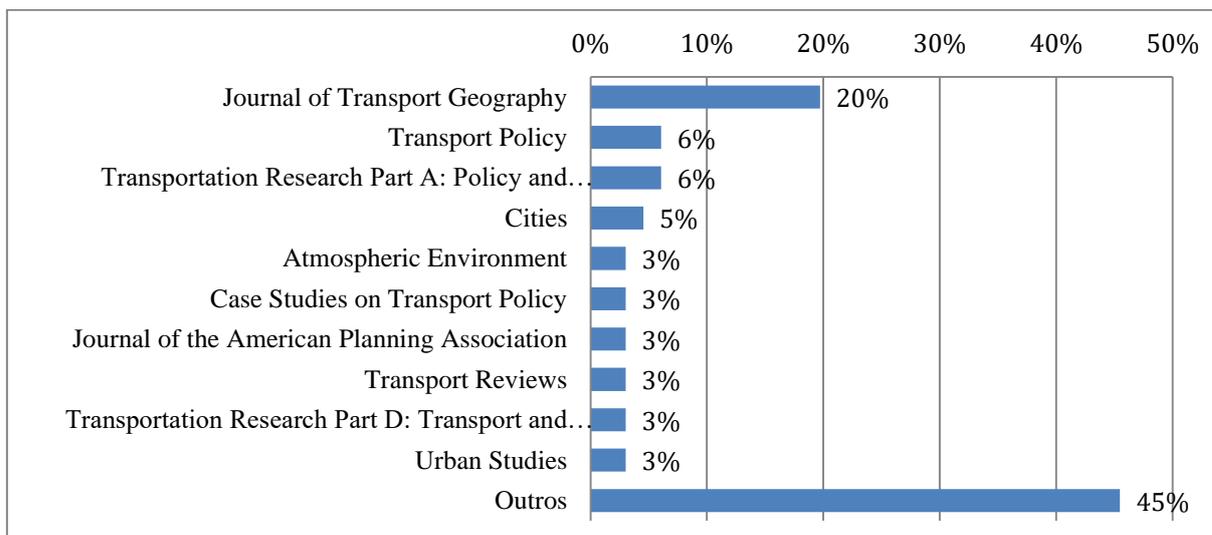


Figura 2: Participação percentual dos principais periódicos na referência bibliográfica

A Figura 3 apresenta o ano de publicação dos artigos que compõem a referência bibliográfica.

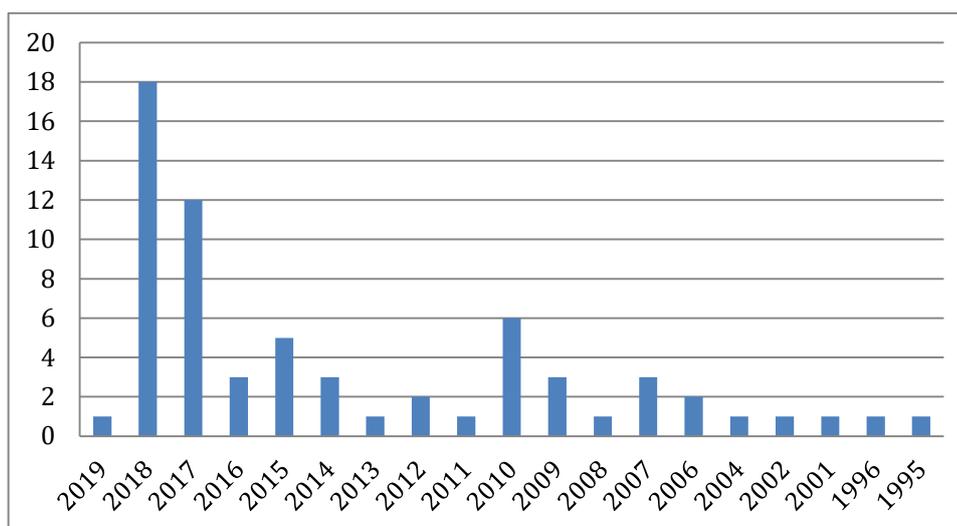


Figura 3: Ano de publicação dos artigos na referência bibliográfica

2.2 A acessibilidade no planejamento de transporte

Um conceito que permeia toda a discussão desse trabalho e que serve de fundamento para outras teorias de planejamento urbano e de transporte integrados é a acessibilidade. Convém, portanto, defini-la antes de aprofundar a discussão em temas mais específicos. O conceito de acessibilidade tem diferentes definições que variam de acordo com o meio ao qual ele é aplicado. No estudo dos transportes ela pode ser definida como a facilidade de alcançar destinos (BOISJOLY; EL-GENEIDY, 2017b) e é uma das medidas de desempenho mais abrangentes, ligando os sistemas de transporte ao uso da terra. Gil Solá *et al.*, (2018) afirma que, em termos simples, a acessibilidade trata-se da capacidade das pessoas de alcançar atividades, atrações e comodidades geograficamente dispersas de todos os tipos.

Aprofundando a definição, Miller (2018) enumera cinco pontos fundamentais sobre acessibilidade:

- i. Varia de ponto a ponto no espaço: A atividade (finalidade da viagem) é específica.
- ii. Combina o conceito de impedância de viagem (ou seja, a facilidade / dificuldade de alcançar ou interagir com diferentes pontos no espaço) com o de atratividade e / ou magnitude de oportunidades (ou seja, a conveniência / oportunidades de interação em um determinado ponto).

- iii. É uma medida do potencial de interação. A mobilidade, por outro lado, é a realização desse potencial em termos de viagens reais através do sistema de transporte.
- iv. Envolve a integração ou adição de oportunidades no espaço, ponderada pela facilidade de interação. Se houver muitas lojas atraentes perto de minha casa, minha acessibilidade para compras é claramente maior do que se houver apenas um número limitado de lojas de baixa qualidade e / ou localizadas muito longe.
- v. Dada a natureza da viagem com base nas necessidades / desejos, o conceito de "potencial de interação" (ou seja, acessibilidade) é claramente intimamente ligado ao de demanda de viagens, bem como às opções de localização de moradias e empresas.

Segundo Boisjoly e El-geneidy (2017), a acessibilidade depende de vários fatores de interação e é composta de três componentes: uso da terra, transporte e indivíduo. O acesso aos destinos é amplamente influenciado pela distribuição de atividades residenciais, econômicas, culturais e sociais (o componente de uso da terra). A acessibilidade depende ainda da rede de transporte que determina o tempo de viagem, os custos e a conveniência de um local para outro (o componente de transporte). Além dos fatores exógenos, características individuais como renda, nível de educação, gênero e propriedade de veículos afetam as habilidades e necessidades de acesso a destinos (o componente individual). As restrições de tempo também desempenham um papel importante na determinação da acessibilidade. Isso inclui o uso da terra, transporte e restrições individuais, como a disponibilidade de oportunidades (ou seja, horário de funcionamento), horários pessoais e horários dos serviços de transporte público.

Miller (2018) afirma que a principal função de um sistema de transporte é fornecer às pessoas e empresas acesso a outras pessoas e empresas, para que possam participar de atividades de todos os tipos (sociais, econômicas etc.), espacial e temporalmente distribuídas e para que possam fisicamente trocar informações, bens e serviços. O raciocínio é portanto, que a acessibilidade é um conceito central no planejamento de transportes, e pela lógica ela deveria nortear todo o processo. No entanto essa não é a realidade observada na prática, onde sua inclusão no planejamento de transporte é limitada. A abordagem baseada na mobilidade ainda domina o planejamento de transporte, e portanto a maioria dos projetos adotam apenas critérios de mobilidade em suas medições (BOISJOLY; EL-GENEIDY, 2017b).

A abordagem centrada na mobilidade é operacionalizada na formulação “prever e fornecer”, na qual planejadores modelam os fluxos de viagens pelas redes de transporte, simulam o impacto do uso futuro do solo e das mudanças populacionais nesses fluxos e identificam oportunidades para melhorar os fluxos por meio de expansões de capacidade. Perde-se, portanto, uma parte essencial da relação dinâmica entre a infraestrutura de transporte e os padrões de uso e ocupação territorial. A infraestrutura aprimorada de transporte influencia os novos padrões de uso, mas esses impactos raramente são contabilizados na análise do projeto de transporte (MERLIN *et al.*, 2018). A mudança para uma estratégia de melhoria da acessibilidade coloca a qualidade de vida das pessoas e uma ampla gama de comodidades e atividades locais (instalações de saúde, escolas, comércio, lazer, cultura, parques, etc) no centro do planejamento, estendendo-o muito além do domínio do pensamento convencional no planejamento de transporte (GIL SOLÁ *et al.*, 2018).

Alguns pesquisadores têm utilizado cada vez mais o conceito de acessibilidade para avaliar espacialmente os benefícios conjuntos proporcionados pela rede de transporte e pelo padrão de uso da terra de uma região e para identificar lacunas espaciais no acesso a oportunidades. A compreensão e visualização de padrões de acessibilidade e mudanças em uma região contribuem para o planejamento de intervenções de transporte e uso da terra direcionadas espacialmente (BOISJOLY; EL-GENEIDY, 2017b).

Há diferentes medidas de acessibilidade para uma ampla variedade de aplicações. Em geral, duas medidas são largamente utilizadas na literatura. Medidas de oportunidades cumulativas de acessibilidade computam quantas oportunidades um indivíduo pode alcançar em um tempo pré-determinado (método da isócrona), enquanto que medidas gravitacionais de acessibilidade não impõem um limite de tempo, mas descontam oportunidades por distância ou tempo. (HANSEN, 1959 apud DEBOOSERE *et al.*, 2018). Além dessas, Miller (2018) acrescenta outras duas métricas comumente encontradas. Distância (ou tempo) até a parada de metrô/trem mais próxima, a rodovia, a escola, o hospital, etc. E por último, medidas máximas aleatórias esperadas baseadas em utilidade (por exemplo, modelo de logit 'logsums'; Ben-Akiva e Leman, 1985).

De acordo com Miller (2018), acostumou-se a calcular as mudanças no tempo de viagem devido ao investimento em infraestrutura e outras políticas e a atribuir um valor econômico a essas mudanças nos cálculos via valor do tempo. Isso representa um benefício de mobilidade devido a uma economia de tempo, que pode ser usado produtivamente de outras maneiras.

Segundo ele, atualmente, não há uma maneira padrão e comparável de medir o benefício de acessibilidade da oportunidade ou potencial de interagir em vários níveis de acesso. Tornou-se necessário, portanto, padronizar conceitos teóricos e métodos operacionais e encontrar maneiras eficazes de comunicar a utilidade desses conceitos e medidas de maneira clara, convincente e credível ao público e aos tomadores de decisão para que a acessibilidade tome seu lugar como um conceito central no planejamento de transporte. Segundo o mesmo autor, definir acessibilidade em termos de superávit do consumidor é conceitualmente muito atraente, pois associa acessibilidade a uma medida muito bem estabelecida de bem-estar / benefício social. Também facilita a monetização da acessibilidade, o que pode ser útil para avaliações de custo-benefício.

2.3 Transporte e desenvolvimento urbano

Nesta seção, apresenta-se fatores que influenciam o modo como as pessoas se transportam na cidade e as teorias de planejamento territorial que relacionam o meio urbano com esse movimento de pessoas. Serão apresentados conceitos que baseiam esse trabalho, e serão discutidas as consequências de diferentes decisões de planejamento. Optou-se por conceitos de planejamento que priorizam acessibilidade sobre mobilidade, por entender que esses apresentam maiores benefícios ambientais, sociais e econômicos, e por constituírem uma quebra dos paradigmas adotados nas últimas décadas.

2.3.1 Desenvolvimento compacto, adensamento, DOTS, DOA e 5-D's

Partindo da premissa que transporte e ambiente são inter-relacionados e inseparáveis, pesquisadores e planejadores urbanos criaram conceitos a partir de teorias e observações dessa relação, e chegaram a algumas conclusões. Uma delas é que o desenvolvimento compacto reduz o uso do automóvel (EWING; HAMIDI, 2015). Para explicar o que configura o desenvolvimento compacto, Ewing e Hamidi (2015) teorizam que espraiamento e desenvolvimento compacto representam duas extremidades de um contínuo de possíveis tipos de desenvolvimento urbano, e são caracterizados não apenas pela densidade de construções ou habitantes, mas por outras variáveis “D”. Também segundo eles, a posição de uma região dentro desse contínuo pode ser medida e relacionada a resultados de políticas públicas.

As “variáveis D” citadas por eles são um conjunto de palavras que começam com a letra D e medem a influência do ambiente construído em pesquisas de transporte. Inicialmente Cervero e Kockelman, (1997) criaram os três D's, Densidade, Diversidade e Desenho urbano.

Posteriormente foram adicionados à lista por Ewing e Cervero (2001) mais dois D's, Destinos acessíveis e Distância ao transporte público, ficando então o conjunto conhecido como os 5 D's, que são as 5 dimensões do ambiente construído. Embora não seja parte do ambiente construído, a Demografia é considerada o sexto "D", por sua influência em estudos de viagens. Ewing *et al.* (2015) descrevem os cinco D's da seguinte forma:

A variável "Densidade" é sempre medida como a variável de interesse por unidade de área. Essa variável pode ser população, unidades habitacionais, empregos, área útil de edificações, dentre outros. População e emprego são às vezes agrupados para computar atividade geral por unidade de área.

A variável "Diversidade" mede o número de usos do solo diferentes em um dado local, e sua distribuição equilibrada com respeito a área total, área útil ou emprego. Medidas de entropia de diversidade são amplamente utilizadas em estudos de viagens, onde valores baixos indicam ambientes de uso único (zonas segregadas), e valores altos indicam usos mistos. Relações empregos/residências e empregos/população são usadas menos frequentemente.

As medidas de "Desenho urbano" incluem tamanho médio de quarteirões, proporções de interseções de quatro vias e número de interseções por km quadrado. Desenho urbano é também ocasionalmente medido através de existência e largura de calçadas, afastamento médio dos prédios, largura média das ruas, número de cruzamentos de pedestres, arborização ou outras variáveis físicas que diferenciam ambientes amigáveis aos pedestres de ambientes orientados aos automóveis.

Já a variável "Destinos acessíveis" mede a facilidade de acesso a lugares atratores de viagens, que podem ser locais ou regionais. Em alguns estudos, acessibilidade regional é simplesmente a distância até o centro. Em outros é o número de empregos ou outras atrações acessíveis em um dado tempo de viagem, que tendem a ser mais alto em áreas centrais e mais baixo em áreas periféricas. O modelo gravitacional de atração de viagens mede destinos acessíveis. Acessibilidade local, por outro lado, é geralmente medida como a distância à atração mais próxima de um certo tipo. Esta variável é a principal influência ambiental nas distâncias de viagem.

Por último, "Distância ao transporte público" é usualmente medida como uma média das rotas mais curtas desde as residências ou locais de trabalho até a estação de trem ou ponto de

ônibus mais próximos. Pode ser também medida pela densidade de rotas de transporte público, distância entre paradas ou número de estações por unidade de área.

Todas essas variáveis influenciam na maneira como as pessoas se transportam e podem, ou devem, ser usadas como indicadores em políticas públicas que visam alcançar um desenvolvimento compacto como maneira de diminuir a necessidade por transporte e, conseqüentemente, os problemas relacionados ao espraiamento urbano. Focar apenas na densidade pode até mesmo apresentar resultados opostos ao desejado, pois desenvolvimento adensado, sem os outros D's ainda é dependente de veículos (EWING; CERVERO, 2017). De acordo com Ewing e Hamidi (2015) o governo pode incentivar padrões de desenvolvimento mais eficientes aumentando o custo do uso de automóveis, tornando leis de zoneamento mais liberais ao uso misto e ao adensamento e fazendo parcerias com construtoras para adotarem novos padrões. As distâncias de viagem são geralmente menores em locais que são mais acessíveis e têm maiores densidades ou usos mistos. Isto ocorre ao comparar tanto as viagens baseadas nos lares de diferentes bairros residenciais quanto às viagens para destinos não residenciais em diferentes centros de atividade.

Ao analisarem a organização espacial de áreas urbanas na Polônia, Marcińczak e Bartosiewicz (2018) obtiveram resultados que indicam que em áreas urbanas maiores a distância é percebida como um obstáculo mais forte ao deslocamento, e que a maioria dos residentes tende a trabalhar localmente nos subcentros. Os resultados confirmam ainda que quanto mais urbanizado, em termos de emprego, os mercados de trabalho se caracterizam por deslocamentos relativamente mais curtos. Descobriram assim que as formas urbanas monocêntricas, com grande concentração de empregos em uma área, estão associadas a viagens mais longas. Os resultados também mostram que um grau mais elevado de policentricidade promove viagens de deslocamento mais curtas, e portanto apóia a noção de que a policentricidade é uma forma de estrutura espacial que reduz o volume de viagens de longa distância (MARCIŃCZAK; BARTOSIEWICZ, 2018).

Ao analisar 283 condados metropolitanos nos EUA, Carruthers (2002) descobriu que programas governamentais de gerenciamento do crescimento urbano com fortes requerimentos de consistência e mecanismos de fiscalização são ferramentas promissoras na redução do espraiamento. Por outro lado, programas que não requerem consistência ou que apresentam mecanismos de fiscalização ineficientes podem produzir o efeito contrário ao esperado e inadvertidamente contribuir para o espraiamento.

A cidade de Albuquerque, nos EUA cobra taxas de impacto diferentes para providenciar nova infraestrutura com base na localização do empreendimento. A política, implementada em 2004 fez com que uma nova unidade residencial construída em partes da cidade completamente servidas de infraestrutura pagasse 350 USD de taxa contra mais de 5000 USD em áreas parcialmente servidas. Nos dois anos anteriores a implementação da política, 31 por cento das novas permissões para construção de unidades residenciais eram nas áreas totalmente servidas de infraestrutura. Nos dois anos após a implementação, esse número subiu para 52 por cento (EWING; HAMIDI, 2015).

Dentre os conceitos de planejamento urbano mais estudados atualmente destaca-se o Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável, ou DOTS (do inglês *Transit Oriented Development - TOD*). De acordo com a definição de Calthorpe (1993), o DOTS apresenta-se na forma de zonas de uso misto em que a distância de acesso ao transporte público e ao núcleo comercial é de no máximo cerca de 600 m. Essa distância é recomendada por ser confortável para caminhadas de cerca de 10 minutos, porém o tamanho ideal é determinado caso a caso, e depende das características dos arredores. Zonas de DOTS misturam áreas residenciais, comerciais, de escritório, áreas abertas e de uso público em um ambiente propício à caminhada. Dessa forma, a área torna-se convidativa para que seus residentes e trabalhadores se desloquem por meio de quaisquer modos, seja transporte público, a pé, de bicicleta, etc. De acordo com Belzer e Autler (2002 *apud* SAHU, 2018), o DOTS tem o potencial de contribuir ao urbanismo sustentável ao mudar a dependência do transporte privado para o público.

Segundo Salat e Ollivier (2017), para se atingir os resultados esperados, modificações em usos do solo existentes precisam criar valor. Áreas de DOTS geralmente dão uma atenção maior ao desenho urbano, espaços habitáveis e atenção ao pedestre, o que cria valor e faz com que a demanda por imóveis nessas áreas cresça, encarecendo o preço das moradias (DEBOOSERE *et al.*, 2018).

O planejamento da interação entre a oferta de capacidade e o uso do solo pode ser encarado como um problema de otimização. Li et al. (2010) criam um modelo que otimiza os benefícios de DOTS com o objetivo de alcançar um transporte público de alta capacidade (TPAC) sustentável economicamente, ambientalmente e socialmente. Segundo os autores, esse resultado está atrelado às seguintes características:

i. Maximização do número de usuários do TPAC:

A fim de melhorar o fluxo bidirecional de passageiros em qualquer período de tempo, as atividades residenciais, de trabalho e recreativas devem ser aumentadas em cada área. Isto se deve ao fato que as atividades residenciais interferem no número de passageiros no horário de pico da manhã, as atividades de trabalho igualmente no horário de pico da tarde e atividades recreativas podem aumentar o número bidirecional de passageiros fora do pico.

ii. Maximização da compactidade do uso do solo:

Dentro de um escopo aceitável, o uso da terra deve ser o mais compacto possível para melhorar a eficiência do uso da terra.

iii. Maximização do grau de uso misto do solo:

Para aumentar a interação local e diminuir a necessidade por viagens longas, o uso misto do solo é incentivado. No entanto, o grau de uso misto do solo não pode ser muito alto, por razões econômicas. O número total de tipos de uso da terra não deve exceder quatro em uma mesma área.

iv. Maximização do valor da terra em torno da estação de TPAC:

Considerando a sustentabilidade econômica do TPAC, além de maximizar o número de passageiros, o preço da terra ao redor das estações também deve ser maximizado.

v. Maximização do aumento da qualidade de vida em torno da estação TPAC:

A fim de garantir a qualidade de vida em torno da estação, o nível de conflito entre os usos do solo adjacentes deve ser minimizado, e a quantidade de instalações públicas deve oferecer serviços compatíveis com o número de residentes.

vi. Minimização do custo do controle de poluição:

Quanto maior a densidade do uso da terra, maior é o impacto ambiental local. É necessário, portanto, reduzir o custo relacionado à poluição produzida pela ocupação mais densa.

vii. Assegurar equidade social:

De um modo geral, o preço dos imóveis em torno das estações é relativamente alto e, portanto, as pessoas de baixa renda geralmente não têm acesso à moradia nessas áreas. A fim de melhorar a sustentabilidade social do DOTS e permitir que a conveniência seja compartilhada por todos os cidadãos, uma proporção da área ao redor da estação de TPAC

deve ser usada para o desenvolvimento de moradias sociais, disponíveis cidadãos de baixa renda.

Além das restrições mencionadas, os referidos autores fazem as seguintes recomendações:

- A capacidade de uso do solo não deve exceder a demanda total de imóveis na cidade.
- A densidade do uso do solo deve ter seus limites impostos de acordo com as regulamentações locais de planejamento urbano.

No entanto, DOTS é uma ferramenta de planejamento inerentemente local, e originalmente não contempla padrões de uso de solo no nível regional. O conceito DOTS considera apenas acesso ao transporte público, mas não a acessibilidade que é promovida pelo transporte público. (DEBOOSERE et al., 2018). Como os padrões de viagem são em sua maioria determinados pelos níveis de acessibilidade regionais promovidos pelos sistemas de transporte, o uso de DOTS torna-se insuficiente para aumentar a utilização do transporte público e para atrair desenvolvimento urbano (BOARNET, 2011; CHATMAN 2013 apud DEBOOSERE et al., 2018).

Pensando em acessibilidade regional como principal fator determinante de deslocamentos, Deboosere et al. (2018) sugerem o conceito de Desenvolvimento Orientado à Acessibilidade (DOA). Esse é definido como uma estratégia que equilibra acessibilidade entre oportunidades de emprego e trabalhadores para criar um ambiente que conduza ao desenvolvimento urbano. O DOA pode ajudar planejadores a considerar explicitamente não apenas o acesso ao transporte coletivo, mas também a acessibilidade promovida por ele.

Shen *et al.*, (2014) examinam os efeitos de acessibilidade local e regional no desenvolvimento ao redor de uma estação em Madri, e identificam que a acessibilidade é um preditor significativo em determinar mudança no uso do solo. O DOA incentiva os planejadores urbanos a desenvolverem estratégias que alavanquem o acesso para guiar e acelerar ou desacelerar os fenômenos que naturalmente acontecem com mudanças na acessibilidade, como mudanças no tempo de viagem e desenvolvimento econômico. Áreas de DOA são, portanto, vizinhanças ou localidades onde os planejadores usam as várias ferramentas a seu dispor para controlar os níveis de acessibilidade de modo a atrair um desenvolvimento misto, com residências, comércios ou indústrias. Políticas de uso do solo e fiscais podem acelerar o modo com que as mudanças em acessibilidade impactam o uso do solo, enquanto que o clima econômico geral é um aspecto vital para determinar se o desenvolvimento ocorrerá ou não em uma área (DEBOOSERE *et al.*, 2018).

DOTS pode ser compreendido como um componente do DOA. Enquanto o DOTS foca somente em condições locais de acesso e egresso ao transporte público e a distribuição local de uso do solo, o DOA também considera o acesso pelo transporte público e a distribuição regional de uso do solo, além de acesso a destinos por outros modos (DEBOOSERE *et al.*, 2018).

2.3.2 Transporte urbano sobre trilhos como indutor de desenvolvimento

A alta capacidade e alto nível de serviço (explicitado pela confiabilidade e previsibilidade) de corredores ferroviários os tornam boas alternativas de transporte urbano quando comparados a outros modos. Cidades onde a rede metroferroviária se encontra bem estabelecida já há muito tempo observam um fenômeno em que a rede de transporte se torna uma parte vital da cidade. Estações são comumente tidas como o principal ponto de referência de certas localidades, e o mapa da rede uma nova maneira de navegar a área urbana. Localidades que porventura são distantes por meio rodoviário devido à geografia ou forma urbana se tornam facilmente acessíveis por meio ferroviário. Esta ampla acessibilidade promovida pelo transporte sobre trilhos, ampliada pelo fato que a rede não é geralmente afetada por fatores externos como clima ou congestionamentos, torna os corredores ferroviários áreas naturais e desejáveis para o desenvolvimento urbano.

No entanto, a construção de uma estação de transporte público sozinha não é suficiente para induzir o desenvolvimento. O contexto local da estação em termos de clima econômico metropolitano e fatores específicos da estação desempenham um papel significativo nas mudanças que podem ser esperadas (NILSSON; DELMELLE, 2018).

A ação do planejador urbano também é essencial para que se alcancem os resultados esperados da implantação de corredores ferroviários. Técnicas de DOTS foram usadas com sucesso e se encontram significativamente desenvolvidas na Europa. Destacam-se duas capitais nórdicas, Estocolmo na Suécia e Copenhague na Dinamarca, onde corredores para a canalização do crescimento que “transborda” das áreas centrais foram definidos antecipadamente no processo de planejamento, e a infraestrutura ferroviária foi construída, por muitas vezes antes mesmo da existência de demanda, para guiar o crescimento ao longo dos eixos desejados (CERVERO, 2006).

A habilidade de misturar diferentes usos do solo ao longo de corredores lineares é um benefício pouco estimado do uso misto do solo em nível sub-regional. Os planejadores

urbanos em Estocolmo criaram um equilíbrio de empregos e residências ao longo dos corredores ferroviários, criando um fluxo bidirecional balanceado. Durante os horários de pico, 55 por cento dos viajantes estão indo em uma direção e 45 por cento na direção oposta. Um cenário similar é encontrado em Singapura, onde a dispersão de usos mistos do solo ao longo dos corredores criou fluxos bidirecionais e distribuiu a demanda por transporte mais uniformemente ao longo do dia (CERVERO, 2006). Essa baixa pendularidade é benéfica ao sistema e demonstra as vantagens da integração entre planejamento urbano e de transportes.

Outro bom exemplo da aplicação de DOTS encontra-se no condado de Arlington, na região metropolitana de Washington, EUA. Usando estratégias similares às de Estocolmo e Copenhague, o crescimento ordenado ao longo de corredores ferroviários transformou bairros dormitório em centralidades adensadas com escritórios, comércio e residências. O zoneamento nessas áreas foi alterado antes do desenvolvimento, permitindo que empreendimentos que atendessem a todos os parâmetros pré-determinados obtivessem aprovação automática. A segurança de longo prazo destas medidas para os construtores foi essencial para o sucesso do plano, assegurando que o governo local não “mudaria de ideia”. Como resultado, essas áreas que correspondem a apenas 8% da área total do condado, abrigam hoje 26% da população. O condado apresenta algumas das maiores porcentagens de uso do transporte público na região, com 39,3 por cento dos residentes ao longo do corredor indo para o trabalho usando o transporte público (CERVERO, 2006).

À medida que a atratividade dos bairros aumenta com as facilidades proporcionadas pelas estações ferroviárias e pelo desenvolvimento orientado ao trânsito, a demanda aumenta e, por meio de um processo de oferta e demanda, a propriedade e o valor da terra aumentam (DEBREZION *et al.*, 2007). Nilsson e Delmelle (2018) demonstram que bairros pobres são mais propensos a seguir um caminho de mudança com aumentos no nível de escolaridade agregado e os valores das casas, juntamente com a diminuição da idade mediana e um fluxo de novos habitantes e moradias multifamiliares. Por outro lado, bairros mais afluentes e unifamiliares são amplamente resilientes a mudanças em seu caráter após qualquer tipo de colocação de estação de trânsito, e sua trajetória mais provável de mudança é de aumento no número de moradias multifamiliares. Em geral, em comparação com a dinâmica urbana, todos os tipos de vizinhança em torno das estações de trânsito têm uma probabilidade elevada de transição para uma classe caracterizada por uma alta proporção de moradias multifamiliares, imóveis alugados, poucas crianças e uma parcela relativamente alta de pessoas com diploma universitário. E embora não seja possível determinar estatisticamente, os bairros em ascensão

socioeconômica não experimentam mudanças raciais e étnicas dramáticas. Em todo caso, deve-se notar que os bairros são estáveis e demoram a mudar ao longo de uma década (NILSSON; DELMELLE, 2018), portanto quaisquer decisões de planejamento a serem tomadas devem ser de longo prazo. O planejamento equivocado pode levar a resultados muito aquém do esperado.

Loukaitou-Sideris e Banerjee (2000, apud NILSSON; DELMELLE, 2018) analisaram detalhadamente por que a Linha Azul de Los Angeles não estimulou o desenvolvimento. Eles apontaram para uma série de condições prévias que podem ter sido necessárias para que a linha de VLT funcionasse como um catalisador de desenvolvimento. Algumas delas incluíam as características físicas da área antes da instalação da linha de transporte público, locais de baixa densidade, em grande parte industriais, áreas não convidativas aos pedestres e falta de comprometimento institucional e envolvimento da comunidade.

Com planejamento adequado, porém, investimentos em transporte público podem ser indutores para o crescimento econômico. Em uma análise de 2001 a 2011 da região metropolitana de Toronto, no Canadá, Deboosere *et al.*, (2018) constatam que em áreas onde o sistema de transporte público melhorou, as chances de atração de empresas na região é maior do que nos locais onde houve melhorias na rede rodoviária. Esta é uma clara demonstração do poder de transformação do meio urbano proporcionada pelo transporte público.

2.3.3 Planejamento regional integrado

Para que políticas de transporte surtam resultados concretos, é necessário que haja a integração entre entidades responsáveis em um nível regional, uma vez que as movimentações de pessoas não se restringem a limites municipais. O planejamento regional coordenado apresenta vários benefícios potenciais que podem ser perdidos se deixados apenas às iniciativas locais.

Primeiramente, não há DOTS sem o “TS”, e sistemas sobre trilhos de alta qualidade conectando diferentes municípios só podem ser planejados, gerenciados e financiados num nível metropolitano ou regional (STARICCO; VITALE BROVARONE, 2018). Além disso, o planejamento regional pode avaliar qual o papel das áreas ao redor de cada estação em um sistema mais amplo, e conseqüentemente guiar as tomadas de decisões locais para apoiar um objetivo de maior escala (KAMRUZZAMAN *et al.*, 2014).

Barreiras institucionais são grandes impedimentos para a integração de uso do solo e transporte. Destacam-se: multiplicidade e falta de clareza dos papéis desempenhados pelas partes interessadas, sendo necessária uma coordenação regional para por o plano em prática; segmentação vertical, horizontal, espacial e financeira, evidenciado pelos diferentes entes governamentais em diferentes níveis de governo envolvidos em projetos de transporte integrados; arranjos governamentais fracassados, causados por competições entre municípios, falta de envolvimento de atores cruciais, resistência a mudanças e falta de comprometimento das partes interessadas (STARICCO; VITALE BROVARONE, 2018).

Newman (2009) identifica quatro ferramentas políticas consideradas essenciais para a implantação de projetos de DOTS bem sucedidos: políticas estratégicas que ligam centralidades com uma base de transporte rápido, que quase invariavelmente é de transporte sobre trilhos e elétricos; políticas estratégicas que estabeleçam onde centralidades devem ser criadas e com que tipo de densidade e usos; uma base de planejamento estatutória que requer que o desenvolvimento aconteça com a densidade e o desenho necessários em cada centralidade; um mecanismo de financiamento público-privado para permitir que tanto o sistema de transporte quanto a área de DOTS possam ser construídos ou reformados ligando o transporte público à centralidade que ele servirá. Observa-se a grande importância da atuação integrada dos órgãos de planejamento de transporte e urbano, além de outros setores do governo e da iniciativa privada.

Boisjoly *et al.*, (2018) afirmam ainda que em adição a novas fontes de receita, governos locais e regionais precisam explorar a multimodalidade juntamente a políticas restritivas direcionadas à posse de veículos para apoiar o uso do transporte público. Claramente o que se propõe é uma quebra de paradigmas tanto no planejamento territorial e de transportes quanto nas prioridades que norteiam as decisões de investimento. É comum que o principal problema a ser detectado e combatido é o congestionamento das vias rodoviárias. Partindo-se desta premissa, governos buscam soluções para aliviar a saturação dessas vias, o que na maioria das vezes significa aumento de capacidade viária. No entanto, a evidência sugere que os níveis de tráfego são determinados pela capacidade da estrada, logo intervenções que aumentam a capacidade das rodovias levam a viagens anteriormente reprimidas, resultando em 'tráfego induzido' (GODWIN, 1996; SMALL, 1999; NOLAND E LEM, 2002 apud METZ, 2018).

Quando por fim chega-se à inevitável conclusão que construir mais rodovias não resolve o problema do congestionamento, tende-se a realizar investimentos em transporte público e

outras ações visando diminuir o tempo médio de deslocamento, na esperança que parte dos motoristas optará pelo novo modo de deslocamento, gerando o benefício secundário da diminuição dos níveis de congestionamento. Há várias intervenções que podem afetar o nível e a composição do tráfego e que, supostamente, mitigam o congestionamento. Restrições à provisão de estacionamento nos destinos, incluindo uma tarifa de estacionamento no local de trabalho podem reduzir o tráfego de carros, uma vez que uma viagem não será feita sem uma garantia razoável de disponibilidade de estacionamento (DALE *et al.*, 2017). Em cidades de alta densidade, as restrições de vagas de garagens limitam a posse de carros, como por exemplo nos bairros de Londres, onde apenas 25 a 45% dos domicílios têm acesso a um carro, comparados com 50% a 75% dos bairros periféricos (METZ, 2018).

Aplicativos de localização de estacionamento, precificação dinâmica do estacionamento, promoção de modos ativos de viagem, consolidação de fretes, uso compartilhado de táxis e de carros, dentre outros, são abordagens que em tese poderiam diminuir o congestionamento. Outros meios de melhorar a confiabilidade do tempo de viagem para os residentes urbanos incluem investimento em rotas ferroviárias e isolamento de ônibus do tráfego geral, como no BRT. Não obstante, é de se esperar que surjam viagens reprimidas para aproveitar o espaço viário liberado por tais medidas. (METZ, 2018)

Embora a redução do congestionamento seja difícil, a experiência de cidades como Londres e Estocolmo sugere que é possível reduzir os níveis de tráfego por meio de uma combinação de cobrança de pedágio urbano e medidas que reduzem o espaço disponível para carros. Se a população de uma cidade cresce ao mesmo tempo que a saturação de suas vias impede que haja crescimento no nível de tráfego, a parcela de viagens de carro diminui, e conseqüentemente uma proporção menor da população viajante é exposta ao congestionamento rodoviário. Por exemplo, em Londres, que vem experimentando um crescimento populacional bastante rápido, a parcela de uso de carros diminuiu de 50% de todas as viagens em 1993 para 36% atualmente, com um novo declínio projetado (METZ, 2018).

Apesar de contrariar a opinião dominante, esta lógica, que está alinhada ao conceito de DOA, sugere que a melhor maneira de combater o congestionamento é reduzindo a área destinada aos carros. O congestionamento surge em áreas de alta densidade populacional com altas taxas de motorização. Muitas viagens de carro em potencial podem ser suprimidas pela expectativa de atrasos que excedam a disponibilidade de tempo diário do indivíduo (que, em

média, é de cerca de uma hora por dia). O congestionamento, portanto, tende a ser auto-regulável: se o tráfego aumenta, os atrasos aumentam e os usuários rodoviários mais flexíveis fazem outras escolhas, seja para viajar em um horário diferente, por um modo alternativo, para outro destino ou não viajar. (METZ, 2018)

A mesma lógica argumenta, consistente com as evidências disponíveis, que as medidas destinadas a reduzir o congestionamento fracassariam em seu objetivo por conta de viagens de carro anteriormente reprimidas: reduções iniciais no congestionamento diminuem os atrasos e tornam as viagens por automóvel mais atraentes, uma conclusão anteriormente alcançada por Givoni (2012 apud METZ, 2018). Fica claro, portanto, a necessidade de se mudar o foco das decisões de investimento em transporte urbano, de buscar soluções imediatas para velhos problemas, para uma visão de longo prazo para a cidade, com metas a serem alcançadas no futuro através dos mecanismos de planejamento disponíveis, em que o transporte é um meio e não um fim.

Staricco e Vitale Brovarone (2018) analisam projetos de DOTS regionais em duas localidades na Europa, Bologna MRS (Itália) e Stedenbaan (Holanda), os quais apresentam modelos de planejamento urbano e gerenciamento muito diferentes entre si. O modelo italiano é o urbanismo tradicional, similar ao do Brasil, em que há pouca ou nenhuma cooperação vertical e horizontal e o planejamento urbano limita-se a zoneamentos rígidos e códigos construtivos no nível local, com uma forte influência arquitetônica. Já a Holanda pertence à família da abordagem integrada abrangente (*Comprehensive integrated approach*) de planejamento espacial, que inclui uma hierarquia formal e sistemática de planos abrangendo do nível nacional ao local, e com forte coordenação horizontal e vertical.

Em ambos os casos a abordagem de DOTS foi explicitamente promovida no nível regional para aumentar o potencial de uso do transporte ferroviário e subsequentemente apoiar projetos de melhorias nos serviços ferroviários locais. Houve percalços e sucessos em ambos os locais, porém a visão integradora adotada no Stedenbaan e o modelo participativo de tomada de decisões permitiram que se alcançasse um melhor resultado geral, com a adesão dos municípios ao planejamento regional. Na Itália o projeto não alcançou todos os seus objetivos pela falta de adesão ao plano por alguns municípios. Nos dois países, assim como no Brasil, planos diretores regionais só se tornam efetivos se forem incorporados aos planos diretores municipais, que são os únicos com poder legal para regulamentar uso do solo (STARICCO;

VITALE BROVARONE, 2018). Isso demonstra a urgente necessidade de cooperação e integração no planejamento territorial e de transportes metropolitanos.

2.3.4 Externalidades do transporte

As externalidades das atividades de transporte vão muito além da poluição atmosférica e sonora. Todos os modos de transporte apresentam algum tipo de externalidade, mas as que mais afetam a população urbana diretamente são aquelas relacionadas aos modos rodoviários. Apenas o setor de transportes é responsável por cerca de um terço das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) nas cidades, que têm efeitos prejudiciais no meio ambiente, na economia, na saúde e na qualidade de vida (PERVEEN *et al.*, 2017). Na maioria dos centros urbanos ao redor do mundo, o transporte rodoviário é a maior fonte de poluentes atmosféricos locais, como monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs) e partículas suspensas totais (TSP) (TIMILSINA; DULAL, 2011). De acordo com Ewing e Hamidi (2015), se motoristas tivessem de arcar com todos os custos sociais relacionados ao uso do automóvel, incluindo emissões, estacionamento em vias públicas, custos de acidentes e outras externalidades, eles seriam propensos a optarem por residências, trabalho e locais de compras ou de lazer que requerem uma fração do seu tempo de viagem atual.

O transporte rodoviário urbano é responsável por emissões de GEE dos veículos motorizados privados e públicos que afetam a atmosfera em escala global. Outros poluentes atmosféricos e o ruído do transporte rodoviário urbano afetam localmente os usuários das estradas e a população do entorno. Outras externalidades incluem a poluição da água, vibrações e poluição visual e, além disso, as estradas também criam uma barreira para ciclistas e pedestres. Ademais, o tempo gasto na busca de estacionamento, o uso excessivo de terra destinada a estacionamentos, a contribuição para o efeito de ilha de calor urbana e os problemas de drenagem podem ter efeitos negativos significativos na área urbana (ANAS; LINDSEY, 2011).

Avanços tecnológicos em veículos e combustíveis tem o potencial de mitigar problemas de dependência em combustíveis fósseis e emissões de gases de efeito estufa, porém o crescimento de VKT (*vehicle-kilometres traveled*) associado com o desenvolvimento urbano pode superar a maior parte dos benefícios trazidos pela tecnologia. (EWING; HAMIDI, 2015). Rodier (2009) concluiu de sua meta-análise de 39 estudos que reduções em VKT e gases de efeito estufa provenientes de cenários onde há apenas mudanças no uso do solo são

relativamente modestas e menores do que o resultado obtido por mudanças nas políticas de transporte (cobrança de estacionamento, pedágio urbano, etc.). Contudo, os maiores efeitos são sentidos ao se adicionar transporte público à equação, indicando que para se alcançar os objetivos esperados de diminuição nos congestionamentos e externalidades negativas, é necessário atacar o problema por todos os lados. Segundo Ewing e Cervero (2017), todas as variáveis “D” tem efeitos estatisticamente significantes no VKT.

Aspectos ligados às características do meio urbano também podem apresentar externalidades negativas, como impactos à saúde das pessoas. Papas *et al.* (2007) analisam 20 estudos publicados entre 1997 e 2007 e concluíram que 17 deles encontraram ligações estatisticamente significantes entre obesidade e aspectos do ambiente construído, correlacionando a obesidade ao espraiamento urbano. Stevenson *et al.*, (2016) simularam mudanças de uso do solo em seis grandes cidades ao redor do mundo usando conceitos de desenvolvimento compacto. O cenário urbano compacto modelado resultou em ganhos de saúde para todas as cidades (para diabetes, doenças cardiovasculares e doenças respiratórias).

Ewing e Cervero (2017) encontraram em sua análise de dezenas de artigos que medem benefícios do desenvolvimento compacto, benefícios que vão além da diminuição das viagens por automóvel e aumento das viagens a pé e por transporte público. Esse tipo de desenvolvimento propicia redução no consumo de energia residencial, redução nas fatalidades de pedestres e de ocupantes de veículos, aumento na atividade física e redução da obesidade, redução nos custos de transporte dos domicílios, redução no crime, aumento da segurança do tráfego, aumento no senso de comunidade, aumento na ascensão social e econômica, aumento nas interações sociais e engajamento da vizinhança, e aumento do capital social.

Dentre os benefícios secundários do desenvolvimento compacto, talvez os mais importantes sejam maior segurança energética e a redução da pegada de carbono. Estima-se que essa redução varie de 20 a 40% quando comparado ao espraiamento urbano (EWING et al., 2008 apud EWING; HAMIDI, 2015). Investimentos em infraestrutura de transporte público, particularmente em ferrovias e BRTs ajudam a reduzir os vários tipos de externalidades (congestionamentos, emissões e acidentes). Como exemplo, o trem de subúrbio produz próximo de metade das emissões de CO₂ que uma viagem de carro média por passageiro-quilômetro de viagem nos Estados Unidos (TIMILSINA; DULAL, 2011).

Gössling e Choi (2015) fazem uma análise de custo benefício das externalidades do transporte rodoviário em Copenhague, incluindo custos de tempo, custos operacionais, acidentes,

poluição, barulho, impostos, dentre outras, e descobrem que esse custo por km rodado para um automóvel é da ordem de 0,50 euros/km, seis vezes maior que o custo para bicicletas. Em sua análise para a União Europeia, Becker *et al.* (2012), estimou entre 10 a 20 centavos de euro por km o custo de externalidades dos automóveis para todos os países do bloco. Já Rizzi e De La Maza (2017) calcularam em US\$0,15 fora de pico e US\$0,51 em horário de pico, o custo por km das externalidades dos automóveis em Santiago, Chile.

Como pode se observar, os valores encontrados apresentam grande variação, devido aos fatores incluídos na análise e a estimativa de valor atribuída a cada um deles. Nocera *et al.* (2018) compararam 11 tipos de abordagens diferentes para a estimativa de valor de emissões de GEE provenientes do transporte. Segundo os autores nenhum método pode ser exclusivamente usado para selecionar um valor econômico absoluto de emissões de GEE pois os resultados das diferentes abordagens são muitas vezes contraditórios devido ao modo com que cada método enquadra o problema. Similarmente, Dobes e Leung (2015) analisaram a aplicação de análises de impactos econômicos amplos (*wider economic impacts*) em projetos de transporte na Austrália e Nova Zelândia e encontraram evidências de incongruências nos valores estimados, devido a grandes incertezas das análises de custo benefício.

2.3.5 Indicadores do desenvolvimento urbano

Respeitando-se os limites de capacidade da infraestrutura de transporte, busca-se medir o seu potencial em promover mudanças no local onde ele é instalado. Para isso são propostos indicadores que caracterizem critérios essenciais de desenvolvimento urbano:

2.3.5.1 Potencial de construção de novas habitações (número de habitantes);

Este indicador é provavelmente o mais importante fator ao se considerar investimentos de alto valor como projetos de corredores ferroviários. A capacidade de se construir novas habitações em locais bem servidos de transporte público permite aumentar a densidade nessas áreas minimizando as usuais consequências desse aumento no trânsito. O nível superior de acessibilidade temporal observado nos arredores de estações significa que ao se priorizar esses locais para o adensamento, uma parcela maior da população terá seu tempo de deslocamento reduzido, o que aumenta as possibilidades de locais acessíveis para emprego, lazer, etc. Além disto, a maior oferta de moradia nestas áreas ajuda a conter o espraiamento urbano. Esse indicador permite mensurar o número de moradias com base na área disponível e capacidade adicional do novo modo de transporte.

Em um projeto integrado de transporte e requalificação urbana o número exato de novas unidades habitacionais, e por consequência, de novos moradores, é decidido caso a caso a partir das peculiaridades e capacidade de crescimento de cada local, que norteiam as decisões dos planejadores urbanos. A diferença entre o número final de habitantes previsto para um local e a população residente inicialmente demonstra o potencial existente para a construção de novas habitações.

2.3.5.2 Potencial de atração de novos negócios e geração de empregos (medidas de centralidade; proporção de empregos por habitantes, acessibilidade a trabalhadores);

A localização e acesso aos empregos é outro importante fator no número de viagens, como visto anteriormente. Se uma maior porcentagem de empregos estiverem localizados nos arredores das estações, mais pessoas estarão dispostas a utilizar transporte público nos seus deslocamentos diários. A média de empregos/P.E.A. é um indicador interessante da concentração de empregos, e sua análise ajuda a identificar as áreas onde há falta de vagas, os subúrbios “dormitório”. Inclui-se apenas a P.E.A. pois o resto da população não é afetado diretamente pela quantidade de vagas de emprego. Em busca de aumentar a diversidade do uso da terra, é positivo que se distribua de forma mais equânime os empregos em uma região. Contudo, isso depende dos fatores de mercado, e todo negócio precisa de acesso à mão de obra e a consumidores para dar certo, por isso regiões de mais fácil acesso apresentam maior atratividade para instalação de novos negócios (PORTA *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2014). Deboosere *et al.* (2018) concluem em seu estudo da região metropolitana de Toronto que em 10 anos, entre 2001 e 2011, que a densidade de empregos aumentou mais nas áreas onde o acesso aos trabalhadores era mais alto, assim como em áreas que tiveram maior investimento em transporte público.

Sugere-se, portanto, a adoção de dois indicadores, relacionados ao acesso à mão de obra e acessibilidade para os consumidores. O primeiro pode ser medido através da acessibilidade temporal a trabalhadores. O tempo exato é determinado caso a caso, sendo usual a adoção de tempos de 30, 45 e 60 minutos. Para uma análise condizente com as características locais, sugere-se adotar o tempo médio de viagem no transporte público da cidade.

O segundo parâmetro está relacionado à localização do negócio. Uma análise das ligações na rede de transportes (incluindo transporte público e rodovias) permite calcular medidas de centralidade, sendo elas: *betweenness centraliy* (quantas vezes um nó é atravessado por caminhos mais curtos conectando todos os pares de nós na rede); *closeness centrality* (o

inverso da distância média desse nó para todos os outros nós da rede); e *straightness centrality* (grau de desvio entre o caminho real mais curto e uma linha reta virtual conectando dois pontos) (CRUCITTI *et al.*, 2006). Utilizando o estimador de densidade *kernel* do ArcGIS, é possível calcular um único indicador de centralidade que una as três medidas. Estimadores de densidade *kernel* geram uma densidade de eventos (pontos discretos) como um campo contínuo (raster) e, portanto, convertem diferentes conjuntos de dados para a mesma estrutura raster e permitem a análise das relações entre eles (PORTA *et al.*, 2009).

2.3.5.3 Oportunidades sociais (medidas de acessibilidade a emprego, saúde e educação)

A acessibilidade cumpre um importante papel no desenvolvimento urbano, e diferenças na acessibilidade de localidades geram grandes consequências em aspectos sociais como saúde, educação, renda e emprego. Por esse motivo vêm sendo cada vez mais utilizada em pesquisas e planos de transporte ao redor do mundo para medir níveis de oportunidades sociais (BOISJOLY; EL-GENEIDY, 2017a; GUZMAN *et al.*, 2017; LEE; MILLER, 2018). Esse indicador pode ser medido através de níveis de acessibilidade cumulativa a empregos, instalações de saúde (hospitais, clínicas, etc) e de educação (escolas e universidades) a partir das estações.

2.3.5.4 *Well being* e melhorias na qualidade de vida (tempo médio de deslocamento e acessibilidade a áreas de cultura e lazer)

Well being, as vezes traduzido como bem estar, é um conceito abstrato que vem ganhando proeminência em discussões de políticas públicas, nas quais transporte e ambiente urbano têm importantes papéis (COX *et al.*, 2010). Enquanto não há um consenso quanto a uma definição única e universal, é comum encontrar entre os indicadores de *well being* relacionados ao ambiente construído, acesso a atividades de lazer e culturais, disponibilidade de tempo e acesso ao transporte público (CHNG *et al.*, 2016; COX *et al.*, 2010; NORDBAKKE; SCHWANEN, 2015; STEVENSON *et al.*, 2016).

2.3.5.5 Sustentabilidade ambiental e socioeconômica (externalidades)

Em todo grande projeto de infraestrutura, requiere-se estudos de impactos ambientais e socioeconômicos. Esses estudos apresentam os efeitos esperados e medidas de mitigação desses efeitos a serem adotadas. Por outro lado, a quantificação monetária desses impactos é também usada em avaliações de custo benefício e possíveis ganhos estimados ajudam a equilibrar os altos investimentos necessários. O argumento para grandes investimentos em transportes é

frequentemente feito em termos de impacto no desempenho econômico (LAIRD; VENABLES, 2017).

Contudo, há grande variação em termos de indicadores utilizados e quantificação dos mesmos. Nesse estudo será utilizado como base o manual de *Princípios e Diretrizes para a Avaliação Econômica do Investimento e Iniciativas em Transportes* (NSW GOVERNMENT, 2018), disponibilizado pelo governo de Nova Gales do Sul, que lista externalidades a serem quantificadas nos projetos de transporte no estado. A lista é abrangente e inclui as principais externalidades comumente adotadas em estudos de impactos ambientais, contudo os valores considerados refletem a realidade local, e sua aplicação em outros locais deve levar isto em consideração. É recomendável utilizar critérios específicos para cada localidade. Os indicadores utilizados para medir externalidades e suas respectivas medições (ANEXO A) aplicados a esse estudo, são:

- a. Atraso a pedestres – [tempo]
- b. Qualidade do ar – [custos de mortalidade]²

Bathmanabhan e Madanayak (2010) encontraram forte correlação entre o tráfego rodoviário e a emissão de particulados em Chennai, Índia, que foram aproximadamente 20% maiores nas horas de maior tráfego durante todo o ano. Pérez *et al.*, (2010) encontraram em seu estudo que 52% dos níveis de PM10 em Barcelona podem ser atribuídos a emissões de tráfego. Pio *et al.*, (2019), similarmente encontraram um valor de 52% de emissões relacionadas ao tráfego em Porto. Ambas são cidades litorâneas onde o *spray* marinho responde por uma grande fração da concentração de PM10. Já Jandacka *et al.* (2017), encontraram um valor de 83% de emissões relacionadas com o tráfego rodoviário em Žilina, na Eslováquia, cidade não litorânea. Observa-se, portanto que as emissões relacionadas ao tráfego urbano, são de fato as principais fontes de particulados. Contudo, a concentração de PM10 é muito localizada. Borrego *et al.*, (2016) verificaram que 70% das emissões totais de PM10 e NOx são geradas em áreas de alta

² Os custos de mortalidade foram estimados como um aumento de 0,101% nas taxas de mortalidade diárias para um aumento de 1 micrograma/m³ de partículas (PM10). Os custos de mortalidade anuais são de AU\$35,30 por pessoa expostos por ano por micrograma/m³ de aumento no PM10. Esses custos são utilizados na avaliação dos efeitos negativos do tráfego gerado em áreas urbanas. Em particular, eles são usados para estudos de grandes mudanças nas redes de tráfego urbano que aumentam o tráfego em áreas urbanas ou que reduzem o tráfego com o crescimento do transporte público (NSW GOVERNMENT, 2018).

demanda de tráfego (>800 vph), em seu estudo na cidade de Aveiro, Portugal. Por estas razões, estimar as concentrações locais de PM10 com precisão requer modelos avançados que levam em consideração fatores geométricos da via, fluxo de veículos e velocidades médias, e em geral são feitos para trechos curtos.

2.4 Análise de dados e modelos usados no planejamento de transporte

Esta seção analisa estudos prévios que contêm modelagem de demanda de transporte e faz um levantamento das principais variáveis que explicam crescimento ou diminuição na demanda.

2.4.1 Principais fatores que influenciam o *ridership*

A palavra inglesa *ridership* expressa de forma simples o número de passageiros (ou viagens) realizadas em um modo de transporte em um dado período de tempo. São vários os fatores que o influenciam, ambos diretos, ou intrínsecos ao modo de transporte, quanto fatores externos ou indiretos. Variáveis socioeconômicas, o ambiente construído e o serviço de transporte público todos influenciam nas decisões de viagem dos domicílios. Baseado nos níveis de significância, as influências socioeconômicas parecem ser as mais fortes (EWING *et al.*, 2015).

Há muitos estudos que buscam relacionar as características do ambiente construído com *ridership*. Em sua meta-análise envolvendo mais de 50 desses estudos, Ewing e Cervero (2010) verificaram que a distribuição modal e a probabilidade de viagens a pé estão mais fortemente relacionadas com as dimensões “desenho urbano” e “diversidade” dos ambientes construídos. Densidade de interseções, equilíbrio de residências e empregos e distância a lojas apresentaram as maiores elasticidades. Segundo esse mesmo estudo, o acesso ao transporte público estimula a caminhada e está fortemente relacionado à participação modal e a probabilidade de viagens do transporte público.

Todas as variáveis “D” influenciam nas decisões de viagem dos domicílios. As influências mais fortes são Diversidade, Desenho urbano e Destinos acessíveis, enquanto Densidade apresenta a menor influência (EWING *et al.*, 2015). Já para Ewing e Cervero (2010), dentre as cinco dimensões do ambiente construído, a dimensão “Destinos Acessíveis” é a que mais fortemente se relaciona às viagens, tanto motorizadas quanto não motorizadas. Segundo os referidos autores, isso provavelmente se deve a níveis menores de posse e dependência de automóveis nas áreas centrais das cidades. Eles argumentaram que quase todos os novos

empreendimentos em áreas centrais são propensos a gerarem menos viagens por automóveis que o empreendimento mais bem desenhado, compacto e de uso misto que esteja em um local remoto. À medida que os valores dos D's aumentam (exceto distância ao transporte público, com uma relação inversa), o custo generalizado de viagem por modos alternativos (não-automóvel) diminui, a utilidade relativa aumenta e ocorrem mudanças modais. (EWING *et al.*, 2015)

Outro aspecto importante que influencia o *ridership* é o número e localização dos empregos. De acordo com Ewing e Cervero (2010) dentre as variáveis relacionadas à Densidade, o equilíbrio entre número de residências e empregos é um forte preditor de escolha modal por viagens a pé. A evidência sugere que ligar os locais onde as pessoas residem e trabalham permite que mais viagens sejam feitas a pé, e isso apresenta um efeito maior do que a existência de vários usos do solo em uma vizinhança. Outros autores reforçam essa ideia: segundo Ha *et al.* (2018), regiões metropolitanas com maior espraiamento urbano estão associadas a uma distribuição desequilibrada de empregos e moradias. Para Gordon e Lee (2015) dispersão de empregos, ao invés de apenas a densidade ou dispersão populacional é o fator crítico para congestionamento e tempo de viagem, sendo que empregos mais descentralizados e dispersos estão associados a tempos de viagem menores. E de acordo com Deboosere *et al.* (2018), empresas são atraídas a locais onde mão de obra e consumidores estão localizados, enquanto indivíduos são mais propensos a escolherem uma casa com mais fácil acesso a oportunidades de trabalho. Boisjoly *et al.*, (2017) em sua pesquisa na cidade de São Paulo encontraram resultados que sugerem que os trabalhadores de baixa renda residem em áreas onde a acessibilidade ao emprego por transporte público são mais baixos e têm maior probabilidade de serem empregados informalmente. Para cada aumento de 1% no nível de acessibilidade do transporte público aos empregos, a probabilidade de estar no setor informal de empregos diminui em 3%, mantendo todas as outras variáveis constantes em sua média.

A variável “diversidade” também apresenta um impacto considerável no *ridership*. A frequência de viagens por transporte público aumenta com a entropia de uso do solo até 800 m e a relação empregos/população até 1,6 km de casa (EWING *et al.*, 2015). Em outras palavras, locais de uso misto produzem mais viagens por transporte público do que locais exclusivamente residenciais ou comerciais.

Bothe *et al.* (2018) abordaram os benefícios mais amplos de grandes investimentos em transporte urbano e discutiram a relevância de dar atenção ao tempo e à escala geográfica na análise do crescimento do número de empregos antes, durante e após a introdução de novas infraestruturas de transporte urbano. Em primeiro lugar, a escala é muito importante ao se analisar as mudanças dentro e entre as áreas servidas ou não servidas por metrô. Ao abordar a reestruturação espacial em um nível agregado, o crescimento do número de empregos foi significativamente maior nas áreas servidas por metrô em Copenhague nos primeiros dez anos após a sua inauguração. Observar as mudanças de emprego em pequena escala também demonstrou que o crescimento de empregos foi distribuído de forma desigual ao longo das diferentes partes do corredor do metrô.

Em segundo lugar, a variável tempo também é uma questão importante a se considerar quando se avalia o impacto dos investimentos em transportes. A análise mostrou que as áreas ao redor do metrô cresceram em diferentes períodos de tempo, algumas paralelamente à construção do metrô, enquanto outras começaram a crescer em um estágio posterior. Isto realça as dificuldades em atribuir mudanças no número de empregos a um resultado de um grande investimento em transportes e, além disso, sugere que os resultados dos estudos feitos posteriormente são altamente sensíveis a quando são realizados. (BOTHE *et al.*, 2018)

Em terceiro lugar, o resultado corrobora os resultados dos estudos apresentados, mostrando que é necessário haver uma série de condições necessárias para estimular o desenvolvimento econômico quando grandes investimentos em transportes públicos são feitos. No caso de Copenhague, especialmente três condições parecem ser de grande importância quando se avaliam mudanças no emprego. O primeiro diz respeito à disponibilidade de terra ou espaço adequado e às políticas de planejamento. Em Copenhague, o crescimento do emprego é em grande parte limitado pelas estruturas urbanas pré-existentes, ocorrendo especialmente nas áreas de desenvolvimento de *brown fields* e *green fields*. Portanto, o desenvolvimento deve ser compreendido no contexto de como as antigas áreas industriais estão se tornando disponíveis com a transformação para a economia de serviços e conhecimento. Mudanças no emprego também precisam ser vistas no contexto de apoiar as políticas de planejamento e como essas políticas mudam ao longo do tempo. Apesar de um grande aumento no emprego na região de Ørestad, o desenvolvimento inicialmente esperado não ocorreu ali devido a uma mudança política no período, que priorizou um planejamento mais liberal e baseado nas preferências do mercado, o que favoreceu o desenvolvimento da orla marítima em especial.

Além disso, o contexto local e as condições prévias influenciaram o crescimento do emprego em áreas que já tinham um alto nível de capital humano. (BOTHE *et al.*, 2018)

A probabilidade de viagens a pé também aumenta com a acessibilidade a empregos dentro de 30 minutos por transporte público, e com a densidade de paradas de transporte público até 800 m de casa. O transporte público é complementar a caminhada, pois domicílios com bom acesso ao transporte público para seus deslocamentos até o trabalho tendem a possuir menos automóveis. E por possuir menos automóveis, eles são mais propensos a caminhar nas suas viagens para outros locais além do trabalho. A probabilidade de viagens a pé também cresce com o nível de compactação regional. Quanto mais compacta é uma região, maior o número de destinos acessíveis a pé (EWING *et al.*, 2015).

A distância média das viagens a pé nos EUA varia de acordo com o propósito da viagem, desde 800m para viagens à compras, até 1,4 km para viagens à trabalho. A média geral é 1,1 km (EWING *et al.*, 2015). Já em Sydney, Daniels e Mulley (2013) encontraram uma distância mediana de acesso ao transporte público (trem) de 805 metros (1018 metros no 75º percentil). As Diretrizes de Planejamento de Serviços para Sydney especificam que 90% das residências devem estar dentro de 400 m de uma linha férrea e / ou rota de ônibus durante o dia, e dentro de 800 m de uma linha férrea e / ou rota de ônibus durante a noite.

Modos de transporte com serviços melhores apresentam áreas de serviço maiores, cuja influência diminui gradualmente com a distância (MANOUT *et al.*, 2018). El-Geneidy (2014 apud MANOUT *et al.*, 2018) demonstrou que 90% dos usuários de transporte público em Montréal andam menos de 800 m até um ponto de ônibus e menos que 1,2 km até uma estação de metrô. A principal consideração dos pedestres ao escolher uma rota é minimizar o tempo e a distância percorridos. No entanto, outros fatores influenciam a escolha da rota, como segurança, atratividade da rota, qualidade da calçada e ausência de longas esperas nos semáforos. (GARCÍA-PALOMARES *et al.*, 2018)

García-Palomares *et al.* (2018) analisaram diferentes modelos de morfologia urbana e chegaram a conclusão que o tamanho médio do quarteirão em hectares para um buffer de 800 m da estação situa-se entre 3,34 e 1,52 hectares. Isso gera uma rede de ruas que dispersa o tráfego de carros e facilita a criação de um ambiente silencioso e adequado para pedestres. É importante reforçar as características que favorecem o acesso, como a ausência de barreiras, ou um padrão de ruas em grade que proporcione mais ligações de pedestres. Deve-se notar, contudo, que apenas densidade de ruas não reflete a possível orientação das ruas para as

estações, um fator chave no efeito dessa variável, à medida que as áreas de cobertura aumentam e o acesso das pessoas às estações é facilitado. Diferentes disposições de ruas (Figura 4) com a mesma densidade de rede podem ter efeitos diversos nas áreas de serviço e número de passageiros na estação, dependendo se as ruas são ou não orientadas na direção da estação.

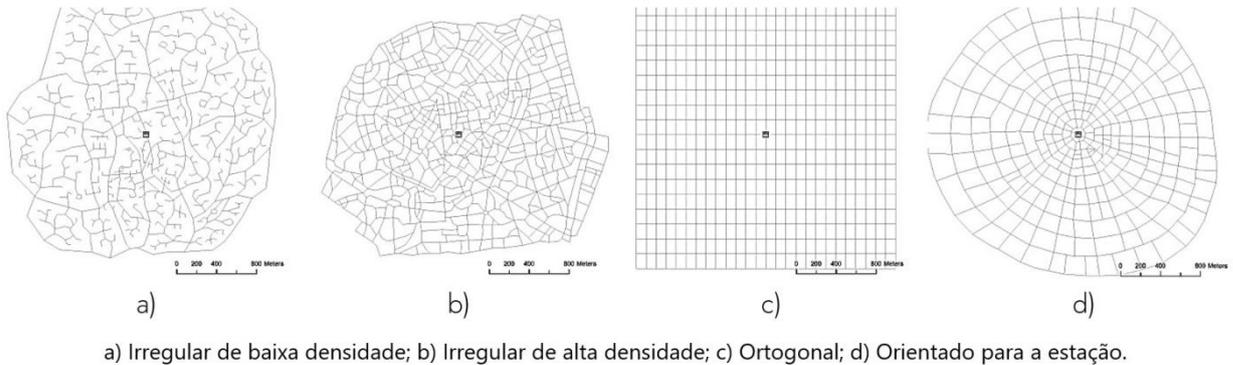


Figura 4: Padrões de ruas. Fonte: GARCÍA-PALOMARES *et al.* (2018)

Padrões de ruas em grades tradicionais (ortogonal) melhoram o acesso de pedestres às instalações de transporte público: os quarteirões de ruas geralmente são pequenos e as ruas são bem conectadas, de modo que o acesso a paradas e estações é fácil. A área de serviço a uma distância de 400 metros para uma estação situada em uma rede de ruas orientada em direção às estações (forma de teia de aranha) é quase o dobro da área de serviço de uma estação localizada em um sistema irregular de baixa densidade (ruas desconectadas e não contínuas). Estações em um sistema de rua irregular de alta densidade (sem forma definida mas bem conectadas) ou ortogonal teriam áreas de serviço de tamanho intermediário (as do sistema ortogonal sendo um pouco maiores) (GARCÍA-PALOMARES *et al.*, 2018).

Os autores também calcularam as distâncias percorridas dos 16 pontos cardeais, colaterais e subcolaterais até a estação para cada cenário e as comparou com as distâncias reais medidas em Madri, confirmando que essas distâncias são claramente menores no sistema de vias orientado para as estações. Em um cenário em que todas as estações teriam um sistema de rua orientado em direção às estações, a distância seria reduzida em 103 metros para residências e 97 metros para locais de trabalho, cerca de 20% a menos. No entanto, os sistemas de rua de baixa densidade e irregulares mantêm a população e o emprego longe das estações, aumentando as distâncias médias em 74 e 71 metros, respectivamente (um aumento de 14%). Se todas as estações estivessem em um ambiente com um sistema orientado para as estações, a população coberta aumentaria em 53%. Em contraste, um sistema de rua de baixa densidade

irregular levaria a uma redução significativa tanto na população (-39%) quanto no emprego (-35%) cobertos. Uma comparação entre o sistema orientado às estações e o sistema de baixa densidade irregular mostra que o primeiro abrange 151% mais população e 120% mais postos de trabalho do que o último, no limite de distância de 400 metros. Essa análise demonstra que a acessibilidade do transporte público em novos empreendimentos urbanos pode ser melhorada não apenas pelo aumento da densidade, mas também pelo aprimoramento do projeto da rede viária.

Cervero (2007) se concentrou em analisar a relação entre morfologia urbana e demanda de transporte público. Ele avalia os benefícios das áreas de DOTS, destacando o considerável aumento na demanda por transporte público em suas estações, que poderia ser cinco ou seis vezes maior do que a das estações fora dessas áreas. Ewing et al. (2015) encontraram também que regiões compactas estimulam viagens por bicicleta. Ruas interconectadas são um facilitador para o ciclismo, possivelmente por encurtar distâncias e fornecer várias opções de rotas.

Há uma afirmação comum que sistemas sobre trilhos são inerentemente mais atrativos que ônibus, contudo isso se deve ao fato dos níveis de serviço superiores geralmente observados no transporte ferroviário. A melhoria dos serviços de ônibus, em especial a frequência, é uma importante alavanca para o crescimento do número de passageiros do transporte público como um todo (BOISJOLY *et al.*, 2018). Constatou-se, no entanto, que passageiros são menos propensos a usar ônibus se o tempo de viagem ou o tempo de transferência forem grandes, e se o trajeto for servido por outro modo de transporte, como trem, VLT ou balsa (KIEU, 2018). Por outro lado, melhorias na qualidade do serviço, especificamente a confiabilidade do sistema de transporte público, podem aumentar o número de usuários, enquanto que uma piora na confiabilidade do serviço pode resultar em diminuição no número de usuários (BATES *et al.*, 2001 apud BOISJOLY *et al.*, 2018) e isso é válido para todos os modos de transporte.

Comprovando a importância da integração entre os modos, Boisjoly *et al.* (2018) analisou 25 regiões metropolitanas nos EUA e Canadá e constatou que operações de ônibus estão mais proximamente relacionadas às mudanças observadas na quantidade de passageiros, variando na mesma direção que a demanda por transporte público como um todo. Isto confirma a tendência de queda observada apesar do aumento nas operações de transportes sobre trilhos, sugerindo que apenas o crescimento do uso de modos ferroviários não é suficiente para

sustentar o número de passageiros que utiliza o transporte público. Ademais, um fator socioeconômico que é uma maior proporção de domicílios sem carro, está associado a mais viagens no transporte público. O mesmo estudo descobriu que essa é a variável com a segunda maior contribuição para o número de usuários no transporte público.

De Oña *et al.* (2018) analisaram os fatores de qualidade de serviço que podem influenciar as intenções comportamentais dos passageiros em relação ao uso de serviços de trânsito, e concluíram que "Disponibilidade do serviço" e "Acessibilidade" são as principais influências nas intenções dos usuários de usar um sistema de VLT. Em particular, se os usuários percebem altos níveis de qualidade no serviço como grande número de trens por dia, tempo de espera na plataforma reduzido, fácil acesso da rua às estações e plataformas e fácil acesso de pessoas com mobilidade reduzida, eles são propensos a reutilizar o sistema de VLT.

Em seu estudo sobre cidades norte-americanas, Boisjoly *et al.* (2018) observaram que um aumento de 10% na população está associado a um aumento de 3,39% na quantidade de usuários no transporte público. Já um aumento de 10% na área de uma região metropolitana está associado a uma diminuição de 2,80% no número de usuários do transporte público. Isto está provavelmente relacionado a uma diminuição na densidade populacional e na frequência do serviço.

2.4.2 Modelos recorrentes de previsão de demanda

Dentre os tipos de modelagem mais utilizados no transporte estão os modelos de passageiros diretos, os quais tentam estimar o número de passageiros em função dos ambientes das estações e dos serviços de trânsito, usando a regressão múltipla (KUBY *et al.*, 2004; CHU, 2004, GUTIÉRREZ *et al.*, 2011 apud GARCÍA-PALOMARES *et al.*, 2018). A análise de origem das viagens é focada nas residências, uma vez que, tipicamente, as pessoas iniciam sua primeira viagem de casa. Já a análise do destino das viagens foca na quantidade de empregos disponíveis em uma região, uma vez que o número de empregados determina a quantidade de viagens casa-trabalho que podem ser geradas e atraídas para aquela área. Além disso, locais de alta demanda como shoppings, estabelecimentos educacionais e hospitais são importantes polos de atração de viagens, também chamados atratores, e devem ser considerados ao se analisar o potencial de demanda do transporte público (MO, 2012).

O modelo convencional de transporte em quatro etapas foi amplamente utilizado desde a década de 1950. É um sistema recursivo com uma relação causal unidirecional de geração de

viagem, distribuição de viagem, divisão modal e designação de viagem. Modelos de quatro etapas ainda são amplamente utilizados na previsão de demanda de transporte, embora haja críticas quanto a esse modelo. Os *feedbacks* das políticas baseadas em alterações do uso do solo e em mudanças nos preços não são especificados, tornando o modelo inadequado para o planejamento urbano e de transporte a longo prazo (NSW GOVERNMENT, 2018).

Modelos integrados de transporte de uso do solo urbano reconhecem as conexões complexas entre o uso do solo e os sistemas de transporte. A interação da demanda e da oferta através dos custos de transporte é essencial para modelar causas e efeitos dentro do sistema de transporte. O uso do solo afeta a localização e o volume da geração de viagens. O sistema de transporte afeta o uso do solo por meio da acessibilidade com certo atraso temporal. Mudanças nos custos de viagens impulsionam a transferência de trabalho, residência, negócios e atividades econômicas. A limitação dos modelos integrados de transporte e de uso do solo é que o encadeamento das viagens (*trip chaining*) não é totalmente abordado. O encadeamento de viagens refere-se ao fato de que muitos destinos ocorrem em sequências encadeadas de viagens diárias com vários destinos e paradas. O encadeamento de viagem tem efeitos de economia de tempo e custo e impactos na escolha do modo. Por exemplo, se a primeira etapa da viagem for feita por transporte público, o carro particular não é uma opção na segunda etapa da viagem. A modelagem de viagens baseada em atividades pode superar essa limitação (NSW GOVERNMENT, 2018).

Exemplos de aplicação desses modelos incluem Sohn e Shim (2010) que analisaram os fatores associados aos embarques no metrô da região metropolitana de Seul (Coreia do Sul), e através de análise de regressão linear descobrem sete variáveis que são significativamente associadas com embarques nas estações: emprego, área construída de imóveis comerciais, área construída de escritórios, densidade populacional, número de transferências, número de linhas alimentadoras de ônibus e uma variável *dummy* indicando estações de transferência, sendo “número de transferências” a única com sinal negativo. As variáveis encontradas foram similares àquelas comumente utilizadas em análises de regressão para previsão de demanda, e estão relacionadas ao conceito de DOTS.

Dentre os estudos já mencionados, Bothe *et al.* (2018) usaram a estatística descritiva em combinação com a modelagem MMQ (método dos mínimos quadrados) para analisarem o crescimento dos níveis de emprego intra-urbano como consequência da abertura do Metrô de Copenhague em 2002, citado em maior detalhe na seção 2.4.1. De Oña *et al.* (2018) propõem

um modelo Probit ordenado para analisar fatores de qualidade de serviço que podem influenciar as intenções comportamentais dos passageiros.

Kerkman *et al.* (2018) avaliaram o desempenho preditivo de modelos espacialmente explícitos que levaram em conta a autocorrelação espacial em relação aos modelos mais convencionais. Mais especificamente, compararam um modelo de regressão linear convencional (MMQ), que não levou em conta a autocorrelação espacial, com um modelo espacial autorregressivo (SAR, do inglês *spatial auto-regressive*) que levou esse fator em consideração. Os modelos SAR, em contraste com os modelos MMQ, não dependem apenas dos dados das variáveis independentes, mas também incluem as estruturas espaciais e as interdependências na estimativa do modelo e na realização das previsões. Esta informação é estável entre as especificações do modelo e, assim, reduz a vulnerabilidade dos modelos para incertezas nos dados disponíveis.

A adição de efeitos de autocorrelação espacial a modelos de demanda de viagem – tradicionais ou baseados em atividades – pode alterar substancialmente as estimativas dos fluxos de transporte público e, assim, influenciar o projeto da rede de transporte público, bem como avaliar os benefícios dos projetos de investimento em transporte público (KERKMAN *et al.*, 2017). Lesage e Pace (2008) mostraram que a dependência espacial no vetor de dados amostrais de fluxos OD pode surgir de variáveis omitidas que são correlacionadas com variáveis incluídas quando essas variáveis omitidas exibem dependência espacial. Segundo os autores, o uso de mínimos quadrados em face da dependência espacial no vetor variável dependente leva a estimativas tendenciosas e inconsistentes, e sugerem incorporar dependência espacial autorregressiva nos modelos. Os diferentes tipos de modelos espaciais autorregressivos são apresentados na seção 2.4.2.1.

2.4.2.1 Modelos Espaciais Autorregressivos (SAR)

Os modelos SAR podem ser categorizados baseado nos três tipos de interação espacial derivados do modelo de Manski (FLOCH; LE SAOUT, 2018) (Equação 2.1):

$$Y = \rho WY + X\beta + \theta WX + u; \quad u = \lambda Wu + \varepsilon$$

Equação 2.1

Em que:

Y é um vetor dos fluxos (dimensão: n regiões);

X é uma matriz $n \times k$ de variáveis independentes (k = número de variáveis);

W é uma matriz de pesos espaciais $N = n \times n$;

- β é um vetor de parâmetros a serem estimados (dimensão: n);
- ρ é o parâmetro autorregressivo, conhecido como defasagem espacial, a ser estimado (dimensão: 1);
- θ é o parâmetro dos efeitos espaciais para variáveis independentes defasadas;
- λ é o parâmetro do efeito de correlação espacial de erros conhecido como autocorrelação espacial (dimensão: n);
- u é um vetor de erros residuais (dimensão: n);
- ε é um termo de erro aleatório assumido como independente e identicamente distribuído.

O primeiro tipo é a interação endógena, quando o fluxo das áreas vizinhas (Y) afeta o fluxo local. O segundo tipo é uma interação exógena, quando os efeitos das características observadas nas áreas vizinhas (X - variáveis independentes) surtem efeito sobre o fluxo local. O terceiro tipo é uma correlação espacial dos efeitos devido características não observadas, ou seja, os erros residuais (ε) das áreas vizinhas afetam o fluxo local.

O modelo de Manski é um modelo geral não identificável nessa forma da Equação 2.1, ou seja, β , ρ , θ e λ não podem ser estimados ao mesmo tempo (FLOCH; LE SAOUT, 2018). Ao se restringir um ou mais dos parâmetros espaciais ($\lambda = 0$, $\rho = 0$ ou $\theta = 0$) derivam-se diferentes tipos de modelo:

a. Modelo *lag*

O modelo SAR mais comum é o modelo de defasagem espacial (*spatial lag model*), também conhecido como *lag*, *lag-Y* ou as vezes simplesmente SAR— referido daqui pra frente apenas como *lag*. No modelo *lag* considera-se $\lambda = 0$ e $\theta = 0$, de modo que apenas a variável dependente Y é defasada, assumindo portanto a forma apresentada na Equação 2.2:

$$y = X\beta + \rho W y + \varepsilon \tag{Equação 2.2}$$

Este modelo assume que os níveis da variável dependente y dependem dos níveis de y em zonas vizinhas. É, portanto, uma formulação da idéia de um transbordamento espacial: o número de embarques na zona i depende do número de embarques em zonas vizinhas. Além desse efeito direto, a especificação desse modelo também implica um efeito indireto. A influência de y_1 em y_2 também influenciará todos os pares de ODs que estão relacionados espacialmente a y_2 por meio do efeito direto de y_2 em y_3 e assim por diante (KERKMAN *et al.*, 2017). A matriz W inclui informações sobre quais zonas são consideradas contíguas e

podem influenciar as observações umas das outras. Existem diferentes tipos de matriz de contiguidade que podem ser adotadas, explicadas em maior detalhe no capítulo 3.

b. Modelo SLX

SLX (de *Spatially Lagged X*, também conhecido como *lag-X*) é outro modelo que utiliza a defasagem espacial, porém nas variáveis independentes (X). Nesse modelo $\lambda = 0$ e $\rho = 0$, portanto ele assume a forma apresentada na equação 2.3:

$$y = X\beta + \theta WX + \varepsilon$$

Equação 2.3

Este modelo assume que os níveis das variáveis explicativas X da área i podem afetar seu vizinho j . Por não apresentar uma defasagem no vetor de fluxos y é um modelo que considera apenas os efeitos diretos dos vizinhos de i . Isso implica que esse é um modelo que considera impactos locais, e não globais como o modelo *lag*.

c. Modelo SEM

O modelo SEM (*Spatial Error Model*) por sua vez considera que a autocorrelação não está no resultado em si, portanto qualquer autocorrelação é atribuída à falta de covariáveis espaciais nos dados. Se essas covariáveis espacialmente relacionadas pudessem ser medidas, a autocorrelação seria zero (SPARKS, 2015). Nesse modelo $\rho = 0$ e $\theta = 0$, portanto ele é escrito conforme apresentado na Equação 2.4:

$$y = X\beta + u; \quad u = \lambda Wu + \varepsilon$$

Equação 2.4

O erro espacial pode ser motivado pela heterogeneidade espacial, por uma variável omitida com efeitos espacialmente distintos, ou outros fatores.

d. Modelo SDM

O modelo SDM (*Spatial Durbin Model*) combina os modelos *lag* e SLX. Segundo Sparks (2015) geralmente há autocorrelação residual no modelo *lag*, que pode ser atribuída a uma variável ausente espacialmente correlacionada. Isso pode ser resolvido defasando as variáveis independentes no modelo. Com isso apenas $\lambda = 0$ e o modelo assume a forma (Equação 2.5):

$$y = \rho Wy + X\beta + \theta WX + \varepsilon$$

Equação 2.5

e. Modelo SDEM

O modelo SDEM (*Spatial Durbin Error Model*) por sua vez é uma combinação dos modelos SLX e SEM. Ele assume que não há interação espacial endógena e enfatiza as externalidades da vizinhança (FLOCH; LE SAOUT, 2018). Ele expande o SEM ao incluir as variáveis espaciais não especificadas por meio das variáveis independentes defasadas (SPARKS, 2015), chegando à Equação 2.6:

$$y = X\beta + \theta WX + u; \quad u = \lambda Wu + \varepsilon$$

Equação 2.6

f. Modelo SAC

O último modelo derivado diretamente do modelo de Manski é uma combinação dos modelos lag e SEM: o modelo SAC (*Spatial Autoregressive Combined*) também conhecido como Kelejian-Prucha, SARAR ou Cliff-Ord. Segundo Kerkman *et al.* (2017) a dependência espacial entre fluxos pode ser causada pela influência direta de fluxos relacionados espacialmente, ou por variáveis independentes omitidas que são espacialmente correlacionadas. Portanto a influência direta entre os fluxos é explicada na especificação igual a do modelo *lag*, e a autocorrelação espacial causada por variáveis independentes omitidas (correlacionadas espacialmente) pode ser resolvida no termo de erro. Nesse modelo $\theta = 0$, portanto ele considera as interações endógenas e a correlação residual, assumindo a forma apresentada na Equação 2.7:

$$Y = \rho WY + X\beta + u; \quad u = \lambda Wu + \varepsilon$$

Equação 2.7

Onde é possível ter duas matrizes de pesos espaciais diferentes, W^1 e W^2 . Nesse modelo o termo de erro defasado é assumido por todas as áreas vizinhas, levando a um processo de erro global (SPARKS, 2015).

Para se atestar a ocorrência de dependência espacial na variável dependente, primeiramente deve-se realizar regressão linear convencional, do tipo MMQ, buscando o modelo que melhor se ajuste aos dados e cujas variáveis independentes são estatisticamente significantes. Os embarques e desembarques devem ser modelados como uma função das características espaciais e das características da oferta de transporte público. Isso inclui características populacionais, densidades, emprego, frequência de TP, opções de transferência e características de paradas e estações, dentre outras (KERKMAN *et al.*, 2017). Além disso, para garantir a validade do modelo deve-se testar as variáveis para colinearidade pelo coeficiente de correlação de Pearson, e avaliar o modelo através do R^2 , do teste T e valor-p.

Além desses parâmetros, há também os coeficientes espaciais ρ e λ que refletem a dependência espacial inerente aos dados da amostra, medindo a influência média das observações vizinhas nas observações (GOLGHER; VOSS, 2016).

Adicionalmente deve-se avaliar se há de fato autocorrelação espacial através do índice de Moran e testes do multiplicador de Lagrange (ANSELIN *et al.*, 1996). Esse último indica qual o modelo de regressão espacial melhor se ajusta aos dados, se *lag* ou SEM. No entanto, esse resultado muda conforme o modelo, que pode envolver variáveis diferentes para cada tipo. Esse procedimento que analisa os resíduos da regressão e mostra a ocorrência de *clusters* (agrupamentos) espaciais foi utilizado por Bothe *et al.* (2018), Kerkman *et al.* (2017) e Tu *et al.* (2018). Deve-se atentar ao fato que uma variável que não é estatisticamente significativa em um modelo pode o ser em outro. Por esses motivos, deve-se testar as especificações que maximizem o ajuste de cada modelo ao invés de escolher apenas um por métodos estatísticos. Adicionalmente, pode-se analisar o AIC (*Akaike Information Criterion*), uma técnica com base no ajuste da amostra para estimar a probabilidade de um modelo prever os valores futuros (BURNHAM; ANDERSON, 2004). Um bom modelo é aquele que tem AIC mínimo entre todos os outros modelos.

Outro fator que interfere na escolha do melhor modelo é a matriz de pesos espaciais W . A matriz é comumente construída seguindo um de três tipos de contiguidade: *Queen*, *Rook* ou *K-vizinhos-mais-próximos*. As nomenclaturas *queen* (rainha) e *rook* (torre) se referem ao movimento das peças de xadrez: no tipo *queen* zonas são consideradas contíguas se compartilham pelo menos um ponto ou borda na fronteira, no tipo *rook* só são consideradas contíguas as áreas que compartilham uma borda. No terceiro tipo, K é um número inteiro escolhido conforme cada caso, e as distâncias são geralmente calculadas a partir dos centroides das áreas. A Figura 5 exemplifica cada tipo.

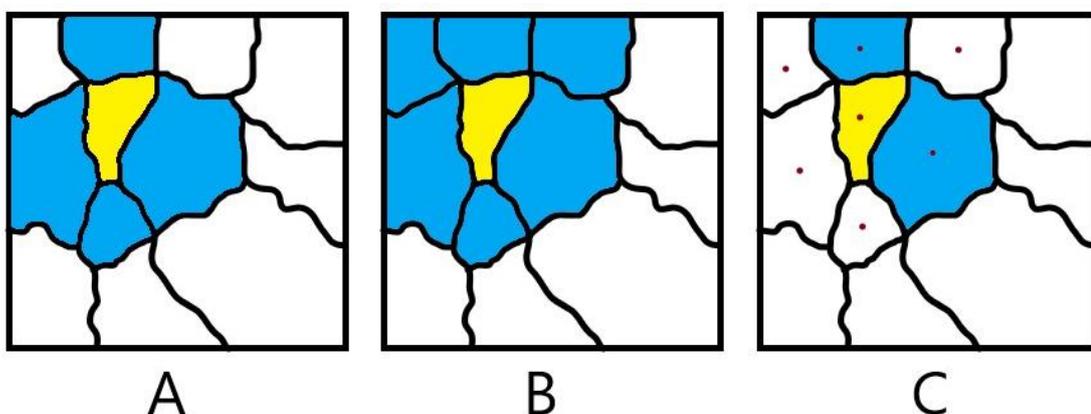


Figura 5: Contiguidades do tipo *Rook* (A), *Queen* (B) e 2-vizinhos-mais-próximos

Além desses três tipos, Kerkman *et al.* (2017) sugerem uma matriz de pesos espaciais da rede de transporte, que reflete a estrutura de dependência entre os fluxos. Essa matriz descreve quais pares OD estão conectados entre si e, portanto, podem influenciar um ao outro. A matriz utilizada é definida como a soma de Kronecker das matrizes de dependência espacial baseadas na origem e no destino, como descrito por Chun *et al.*, (2012). Ela segue a formulação:

$$W_{O+D} = W^2 \oplus W^2 = I_n \otimes W^2 + W^2 \otimes I_n$$

Equação 2.8

Onde I_n é uma matriz identidade $N \times N$.

Nesta definição, as ligações são consideradas vizinhas na rede se tiverem o mesmo destino e origens vizinhas, ou a mesma origem e destinos vizinhos. No caso específico desse estudo isso equivale a dizer que estão na mesma linha de trem. É aplicada a padronização das linhas para controlar a variação no número de vizinhos na rede entre os pares OD.

Comparativamente, os três primeiros tipos de contiguidade são bastante locais, enquanto a contiguidade com base na rede de transporte considera como vizinhas estações que podem estar em extremos opostos da região. Kerkman *et al.* (2017) sugerem a utilização das duas em um modelo de interação espacial (MIE) multiníveis. MIEs buscam medir a influência de características espaciais e características da rede de transporte simultaneamente, considerando a autocorrelação espacial em ambas. O modelo proposto pelos autores tem dois níveis:

- a. Modelo do nível inferior: embarques e desembarques:

No nível inferior, adota-se a abordagem tradicional para os modelos SAR, onde se busca modelar a demanda baseando-se em características socioeconômicas e de transporte. A fim de capturar a dependência espacial do número de embarques e desembarques entre bairros contíguos, Kerkman *et al.* (2017) usam um modelo *lag* e uma matriz de contiguidade do tipo *queen*.

- b. Modelo do nível superior com autocorrelação espacial:

No nível superior, são modeladas as interações espaciais entre zonas usando características espaciais e de rede, adotando-se para isso a matriz de contiguidade da rede de transporte. É utilizado um modelo SAC para levar em conta tanto a autocorrelação espacial quanto a de rede.

Os referidos autores empregaram os modelos em uma análise de intervenções hipotéticas no sistema de transporte público na região de Arnhem-Nijmegen, na Holanda. Eles compararam o desempenho de ambos os tipos de modelos na previsão dos fluxos de passageiros para projetos alternativos de redes de trânsito. O estudo descobriu que os modelos que levaram em conta a dependência espacial superaram os modelos convencionais em quase todos os aspectos: ajuste do modelo, parâmetros de variáveis e a qualidade e estabilidade das previsões. Os resultados mostraram que levar em consideração a autocorrelação espacial é importante não apenas para a análise de interações espaciais, mas também resulta em previsões diferentes e mais precisas do impacto das intervenções. Chegaram à conclusão que os modelos de demanda de viagens devem levar em conta a dependência espacial, a fim de evitar exageros na predição do impacto das mudanças no sistema de transporte (KERKMAN *et al.*, 2018).

3 METODOLOGIA

Este capítulo trata da abordagem metodológica desse estudo, que se divide em duas partes principais, a análise da situação existente e do potencial da nova oferta de capacidade ferroviária, como mostra o diagrama metodológico (Figura 6).

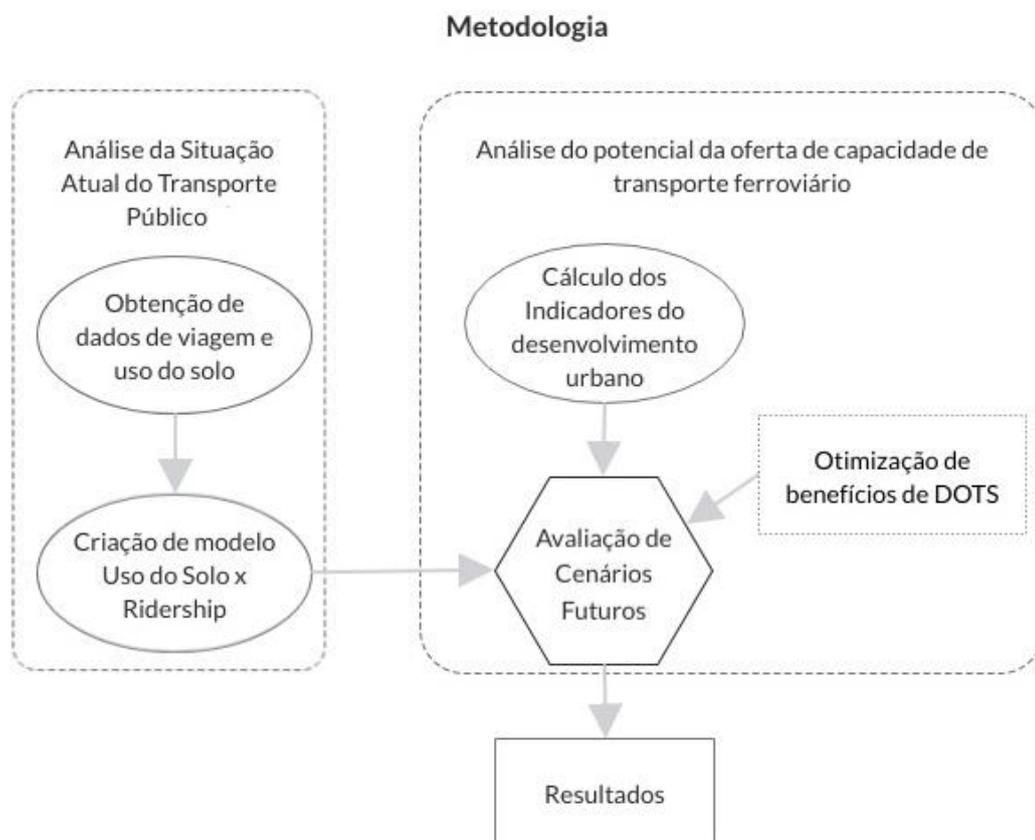


Figura 6: Diagrama metodológico

3.1 Análise da situação atual do transporte público

A análise do cenário atual do transporte constituiu-se da obtenção dos dados de viagem e uso do solo, que em seguida foram utilizados como base para a construção de um modelo de demanda que une as duas áreas interdependentes: transporte e uso do solo.

3.1.1 Obtenção de dados de viagem e uso do solo

Para a criação de um modelo de demanda foi necessária à obtenção de dados de demanda do transporte público sobre trilhos de alta capacidade, mas dados de uso de ônibus e VLT podem ser utilizados em casos onde servem como linhas alimentadoras do transporte ferroviário. Quanto mais detalhados forem os dados disponíveis melhor é a acurácia do modelo, sendo necessário o local de embarque e desembarque ou dados de entradas e saídas de estações.

Além desses, foi preciso obter dados relativos ao uso do solo, como população residente, tipo de uso – se residencial, comercial, escritório, etc. – número de empregos, dados socioeconômicos, dentre outros. Mais uma vez, quanto mais detalhados forem os dados, e quanto menores forem as áreas para as quais esses dados forem agrupados, melhor será a adequação do modelo à realidade.

Para criar um modelo de previsão de demanda por transporte público em Sydney obteve-se dados de embarques do órgão *Transport for New South Wales* para os três modos de transporte terrestre previamente existentes (trens, ônibus e VLT) para viagens pagas com o *smartcard* Opal. Os dados contemplam local e horários de embarque e desembarque, pois o sistema de cobrança em Sydney é baseado na distância e requer que o passageiro toque o cartão no leitor ao entrar e sair de uma estação, ônibus, etc. Essa base de dados contém dados de viagens coletados durante duas semanas, de 21/11/2016 a 27/11/2016 e de 26/12/2016 a 1/1/2017, separadas por estação ou código postal e em intervalos de 15 minutos. Os dados são disponibilizados também compilados em entradas e saídas das estações de trem, separados em quatro períodos do dia (6:00-10:00; 10:00-15:00; 15:00-19:00 e 19:00-6:00), para um dia de semana típico (calculado como a média de uma amostra de três dias) nos anos de 2016, 2017 e 2018. Não há dados mais recentes com esse nível de detalhe disponíveis, porém os números de viagens totais separados por modo de transporte são divulgados mensalmente, sendo possível extrapolar os dados de acordo com o crescimento observado.

Kieu (2018) analisou as viagens por transporte público em Sydney através de dados obtidos do cartão Opal, e Mucci e Erhardt (2018) utilizaram arquivos GTFS (*general transit feed*

specification) do sistema de transporte de São Francisco (EUA) como fonte de dados de operação para criar um modelo de análise de demanda. Esse tipo de arquivo contém atributos das rotas de transporte como localização de paradas, formato das rotas e quadro de horários atualizado frequentemente e também é disponibilizado para Sydney pela agência estadual de transporte, e foi utilizado para a reconstrução da rede no ArcMap através de ferramentas GTFS disponibilizadas pela ESRI (empresa proprietária do ArcMap).

Para os dados demográficos, socioeconômicos, geospaciais e urbanísticos, foram obtidos dados do Australian Bureau of Statistics (ABS) disponíveis para o Censo de 2016 e do governo de New South Wales, coincidentes com o recorte temporal dos dados detalhados de viagens disponíveis. Esses dados podem ser filtrados por localidade, com uma precisão espacial de poucos quarteirões chamados setores censitários nível 1 (*statistical areas 1*), os menores recortes espaciais para os quais há dados disponíveis. Os dados são disponibilizados no formato de tabela (.csv), com códigos que correspondem às áreas dos setores censitários, também disponibilizados no formato *shapefile* para visualização geoespacial.

Segundo Daniels e Mulley (2013) a distância média de acesso a pé até as estações de trem observada em Sydney é de 800 m, e a do 75º percentil é de 1000 m. Já para acesso aos pontos de ônibus, esses valores são de 360 m e 650 m, respectivamente. Nesse estudo optou-se por utilizar as distâncias observadas do 75º percentil para a geração de áreas de serviço a pé e de acesso aos pontos de ônibus a partir das estações, por representarem melhor a realidade local. Através da ferramenta *Service Area* da extensão *Network Analyst* do *software* ArcMap v10.4 foram criadas áreas de serviço com quebras em 650 e 1000 m a partir das estações, seguindo o alinhamento das ruas (Figura 7).

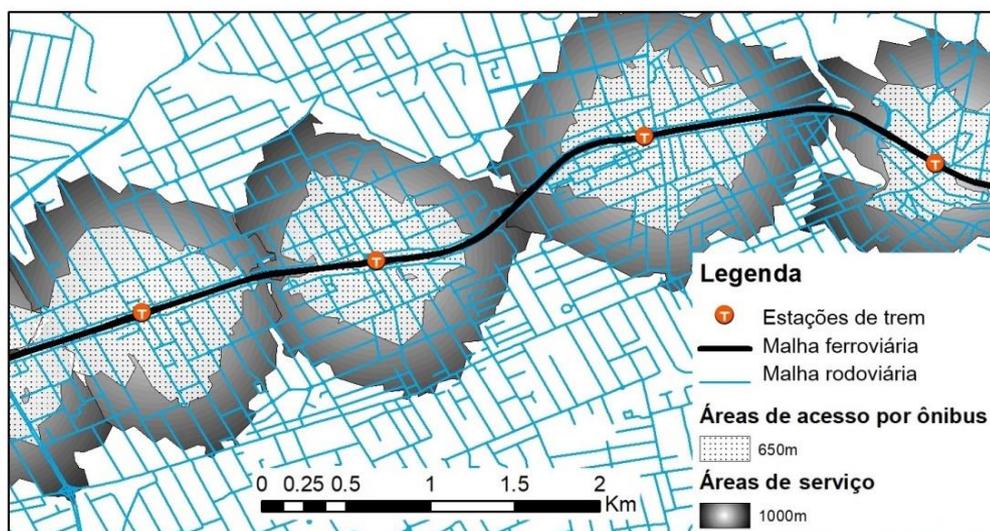


Figura 7: Áreas de Serviço a pé e por ônibus

Para se obter a população residente em cada uma das áreas de serviço das estações, primeiramente foi utilizada a ferramenta *Tabulate Intersection* do ArcMap, que retorna uma tabela com a porcentagem da área de cada setor censitário que se sobrepõem às áreas de serviço previamente obtidas. Em seguida foi realizada uma junção dessa tabela com a tabela de atributos dos setores censitários, que contém a população de cada um. Em uma nova coluna, multiplicou-se a porcentagem de cada setor censitário que se encontra dentro da área de serviço das estações pela população desse setor no censo de 2016. Considerou-se portanto que a população está distribuída de forma homogênea dentro de cada setor. Por último, foi utilizada a ferramenta *Summary Statistics* para consolidar as populações de todas as partes de múltiplos setores censitários dentro das áreas de serviço em um número total para cada área, que representa a população residente em 2016. Também foram incluídos os dados relativos a renda para utilização no modelo de demanda.

Para os números de emprego foram obtidos dados do governo de NSW, que disponibilizou dados de 2011 e 2016 e projeções até 2056 em concordância com o ABS. Esses dados foram disponibilizados no formato de tabela e agrupados por zonas de viagem (*travel zones*), que são áreas ligeiramente maiores que os setores censitários nível 1, porém menores que os bairros (*suburbs*), portanto suficientemente desagregados para a análise dos entornos das estações. Um *shapefile* com as zonas de viagem também foi disponibilizado, e o processo de extração de dados para as áreas de serviço das estações é similar ao utilizado para a população dos setores censitários. As tabelas também incluem dados e projeções até 2056 de população e população economicamente ativa (PEA), que serão utilizados posteriormente para a análise de cenários futuros.

3.1.2 Criação de modelo Uso do Solo x *Ridership*

Para esse estudo foi construído um modelo de regressão linear de previsão de demanda cuja variável dependente é o número de viagens (entradas e saídas em cada estação em um período de 24 horas). Adotou-se uma terça-feira média (não feriado ou período de férias) como dia padrão, por não sofrer com variações de movimentação devida ao fim de semana. Considerando a importância da influência de interações espaciais na correta previsão de fluxo de passageiros, optou-se pela utilização de um modelo SAR.

Além de avaliar cada um dos modelos SAR separadamente, optou-se por também analisar se a aplicação de um MIE multiníveis como o sugerido por Kerkman *et al.* (2017) fornece um melhor ajuste.

Buscou-se um modelo que descreve o *ridership* por meio de características de uso do solo e da rede de transporte. Todos os cálculos foram realizados por meio do *package* *spatialreg* no programa R Studio versão 1.2.5033. Foram testadas inicialmente diversas combinações de variáveis independentes relacionadas aos 5 D's do ambiente urbano e fatores socioeconômicos para se obter o modelo que melhor se ajustou ao número de viagens observado. Considerou-se as variáveis estatisticamente significantes no nível 0,05. A Tabela 1 apresenta a descrição das variáveis incluídas nos modelos finais:

Tabela 1: Descrição das variáveis incluídas nos modelos

Variável dependente:	
<i>logTotEntrExi</i> ³ [x1000 usuários]	Total de entradas e saídas contadas nas estações em 24 horas de uma terça-feira média de 2016
Variáveis Independentes:	
<i>TransferSt</i> [0/1]	Variável <i>dummy</i> . 1: Se estação de transferência entre linhas; 0: caso contrário; Em casos onde há várias estações em sequência atendendo a mais de uma linha, considerou-se apenas as primeiras em cada ponta do trecho compartilhado como estações de transferência
<i>logBusLRTrips</i> ³ [x1000 viagens]	Número de total de viagens de ônibus e VLT em 24 horas de uma terça-feira média de 2016, nos pontos localizados a até 650m de caminhada de cada estação
<i>logEmploy2016</i> [x1000 empregos]	Número de empregos localizados dentro da área de serviço (1000 m) no censo de 2016
<i>Pop2016</i> [x1000 pessoas]	População residente dentro da área de serviço (1000 m) no censo de 2016
<i>sqrtNumBusLines</i> ⁴ [x1000 linhas]	Número de linhas de ônibus cujas rotas atravessam a área de serviço (650 m)
<i>logMedPersInc</i> [x1000 AU\$]	Renda pessoal média semanal da população residente dentro da área de serviço (1000 m) em AU\$
<i>Average_ho</i>	Número médio de moradores por domicílio na área de serviço (1000 m)
<i>Median_age</i>	Idade média dos residentes dentro da área de serviço (1000 m)

As variáveis *Wkf_2016* (população economicamente ativa residente dentro da área de serviço [1000m] em 2016) e *UnEmp_2016* (população desempregada residente dentro da área de serviço [1000m] em 2016) são estatisticamente significantes, porém apresentam correlação

³ “log” denota variáveis em que foi realizada transformação com o logaritmo natural.

⁴ “sqrt” denota variáveis em que foi realizada transformação com a raiz quadrada.

muito forte entre si e com a variável *Pop2016* como pode ser visto na análise dos coeficientes de Pearson (Tabela 2), por esse motivo não foram incluídas nos modelos. O mesmo é verdade para a variável *logMedHoInc* (Renda domiciliar média semanal da população residente dentro da área de serviço [1000 m] em AUD), que apresenta correlação muito forte com *logMedPersInc*, optando-se portanto por manter apenas a última, que apresenta maior significância.

Tabela 2: Coeficientes de correlação de Pearson

	$\log_{\text{BusLRTrips}}$	$\log_{\text{Employ2016}}$	<i>Pop2016</i>	$\log_{\text{Wkf_2016}}$	$\log_{\text{UnEmp_2016}}$	$\log_{\text{MedPersInc}}$	\log_{MedHoInc}	$\sqrt{\text{NumBusLines}}$	<i>Average_ho</i>	<i>Median_age</i>
<i>TransferSt</i>	0,26	0,34	0,17	0,10	0,12	-0,003	-0,02	0,36	-0,19	-0,14
$\log_{\text{BusLRTrips}}$		0,62	0,42	0,48	0,45	0,08	0,03	0,74 ⁵	-0,13	0,002
$\log_{\text{Employ2016}}$			0,52	0,49	0,50	0,17	0,05	0,69	-0,36	-0,16
<i>Pop2016</i>				0,72	0,76	0,11	0,17	0,31	0,05	-0,15
$\log_{\text{Wkf_2016}}$					0,95	0,12	0,28	0,20	0,17	-0,06
$\log_{\text{UnEmp_2016}}$						-0,004	0,15	0,19	0,21	-0,14
$\log_{\text{MedPersInc}}$							0,81	0,23	-0,32	0,36
\log_{MedHoInc}								0,04	0,18	0,45
$\sqrt{\text{NumBusLines}}$									-0,43	-0,02
<i>Average_ho</i>										0,18

A variável $\sqrt{\text{NumBusLines}}$ apresenta correlação com $\log_{\text{BusLRTrips}}$ um pouco menor porém ainda forte, contudo decidiu-se por incluí-la nos modelos, por duas razões: a sua inclusão melhora a performance geral dos modelos, e enquanto *NumBusLines* é um indicador da quantidade de destinos acessíveis por ônibus, *BusLRTrips* é um indicador da frequência dessas linhas, sendo, portanto, intrinsecamente diferentes entre si. Foram testadas também outras variáveis usualmente incluídas em modelos de demanda, relacionadas à idade dos moradores (jovens e idosos), sexo, população não economicamente ativa, tamanho da área de serviço, densidade populacional, distância até o centro, estação terminal, estação central, estação localizada no *City Circle*⁶, número de linhas de trem e número de pontos de ônibus na área de acesso, utilizando diversas combinações e transformações com logaritmo natural e raiz quadrada, porém nenhuma apresentou significância estatística relevante ($p < 0,05$).

⁵ A relação entre $\sqrt{\text{NumBusLines}}$ e $\log_{\text{BusLRTrips}}$ não é linear, portanto foi calculado o coeficiente de Pearson para as variáveis sem as transformações log e sqrt. Se consideradas as transformações, esse valor é de 0.6436.

⁶ *City Circle* é o nome dado ao loop de estações localizadas no distrito central de Sydney.

Além disso, foram consideradas duas matrizes de contiguidade diferentes, W_1 e W_2 . Para a matriz W_1 adotou-se a contiguidade tipo *queen*. Como nesse estudo considerou-se apenas as áreas de serviço, estas são esparsas em regiões com estações mais distantes umas das outras, de modo que ocorrem “ilhas” na matriz de contiguidade, o que não é permitido pelo modelo. Dessa forma, considerou-se como vizinhas também as estações adjacentes nas linhas de trem, de modo que quase todas as estações têm ao menos dois vizinhos (um vizinho no caso das estações terminais). As células da matriz, w_{ij} , são “1” se i e j forem vizinhos e “0” caso contrário. O peso normalizado de cada linha, w_{ij} , pode então ser interpretado como a fração de toda a influência espacial na zona i atribuível à zona j . Nesse caso adotou-se peso igual para todos os vizinhos, logo se uma estação tem dois vizinhos, ambos têm peso 0,5; caso tenha 3 vizinhos, todos têm peso 0,33, e assim sucessivamente. Para a geração da matriz de pesos W foi utilizada a ferramenta *Weights Manager* do software GeoDa v1.14 e em seguida foram feitas as modificações necessárias para adequá-la ao modelo proposto.

Já W_2 é uma matriz de pesos espaciais que considera a organização da rede de transporte e a influência de conexões diretas. Nesta matriz, portanto, todas as estações em uma mesma linha são consideradas vizinhas. Dessa forma as estações têm um número muito maior de vizinhos que nas demais especificações. No caso específico de Sydney, a estação Central tem conexão direta com todas as demais estações de trem exceto uma (eram sete em 2016). Assim, nesta matriz ela é considerada vizinha de quase todas as estações. As linhas dessa matriz são normalizadas como em W_1 .

Para cada modelo testou-se os dois tipos de matriz, buscando-se aquele que apresentou o melhor ajuste. A Tabela 3 apresenta as variáveis incluídas em cada modelo:

Tabela 3: Resumo das variáveis independentes incluídas em cada modelo

Modelo*	Regressão MMQ	Lag ¹	Lag ²	SLX ¹	SLX ²	SEM ¹	SEM ²	SDM ¹	SDM ²	SDEM ¹	SDEM ²	SAC ¹	SAC ²	MIE nível inferior (lag)	MIE nível superior (SAC)
logBusLRTrips	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
logEmploy2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pop2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
sqrtNumBusLines	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
logMedPersInc	X	X	X		X		X		X		X		X	X	X
Average_ho	X	X	X		X		X		X		X		X		
Median_age					X		X		X		X		X		

*Sobrescrito 1 Denota uso da matriz W_1 e sobrescrito 2 da matriz W_2

Foi utilizado o logaritmo natural da variável dependente para se obter uma distribuição normal das observações, como pode ser visto na Figura 8.

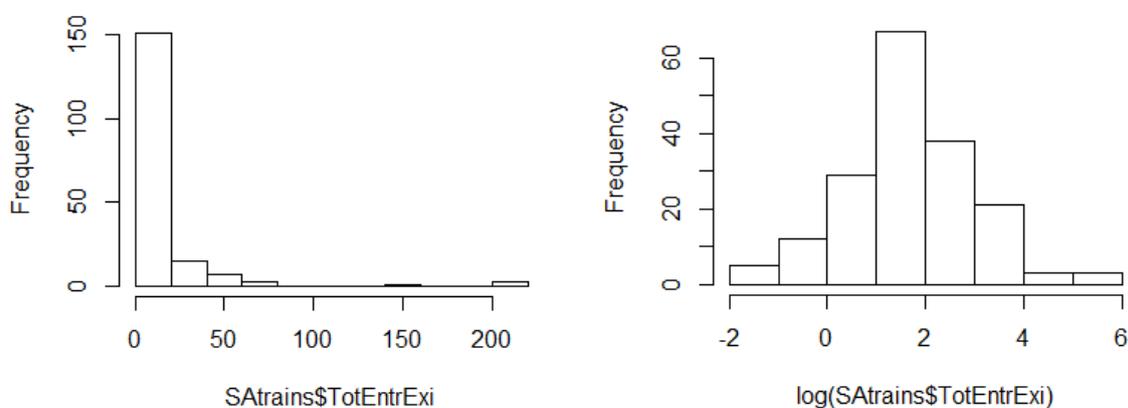


Figura 8: Histograma da distribuição das viagens por estação antes (esquerda) e depois (direita) da transformação aplicando o logaritmo natural

Calculou-se então primeiramente o modelo de regressão linear convencional MMQ. A Tabela 4 apresenta os resultados dessa regressão. Como pode se observar, o modelo mais bem ajustado apresenta um $R^2 = 0,715$ (0,70 ajustado). Isso mostra, portanto, que ele falhou em explicar cerca de 30% das observações da variável dependente, o que considerou-se inadequado.

Tabela 4: Resultados estatísticos da regressão linear do tipo MMQ

Informações do modelo:		Ajuste do modelo:		
Observações: 178		$F(7,170) = 60,93, p < 0,001$		
Variável dependente: LogTotEntrExi		$R^2 = 0,715$		
Tipo: Regressão linear MMQ		$R^2 \text{ ajustado} = 0,7033$		
		Erro padrão residual: 0,7065		
	Estimado	Erro padrão	Teste t	Valor-p
(Intercepto)	-0,02500	0,42655	-0,059	0,953337
TransferSt	0,71015	0,16646	4,266	3,29e-05 ***
logBusLRTrips	0,12541	0,04162	3,013	0,002981 **
logEmploy2016	0,18886	0,05616	3,363	0,000953 ***
Pop2016	0,08541	0,01841	4,640	6,92e-06 ***
logMedPersInc	0,14361	0,03509	4,093	6,57e-05 ***
sqrtNumBusLines	0,74165	0,18020	4,116	6,01e-05 ***
Average_ho	0,36924	0,14545	2,539	0,012026 *

Observação: *** $p < 0,001$ ** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Para testar a existência de autocorrelação espacial foi calculado o índice global de Moran para a variável dependente. O resultado altamente significativo de $i=0,59$ (Tabela 5) indica a existência de autocorrelação espacial, rejeitando portanto a hipótese nula de termos de erro não correlacionados.

Tabela 5: Índice global de Moran para os resíduos da regressão MMQ

Valor observado	Valor esperado	Valor-p
0,59503	-0,01820	$< 2,2e-16$

Além desse teste foi realizado o diagnóstico descrito por Anselin *et al.* (1996) com base nos resíduos da regressão, aplicando a estes o multiplicador de Lagrange (ML) modificado. Esse diagnóstico permitiu verificar a probabilidade de modelos espaciais melhorarem o ajuste do modelo de regressão. Os resultados obtidos (Tabela 6) indicam que tanto o modelo de defasagem espacial (*lag*) quanto o de erro espacial (SEM) apresentaram alta significância estatística e são apropriados para esse conjunto de dados, porém com clara vantagem para o modelo de erro. Portanto, tanto o índice de Moran quanto o ML apontaram para autocorrelação espacial.

Tabela 6: Diagnóstico do multiplicador de Lagrange para autocorrelação espacial

Teste	Resultado	Valor-p
ML _{err}	66,378	3,331e-16
ML _{lag}	45,446	1,569e-11

Na sequência, prosseguiu-se para o cálculo dos modelos SAR. A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados obtidos com os modelos lag e SLX e SEM, e a Tabela 8 apresenta os

resultados dos modelos SAC, SDM e SDEM. Os resultados dos modelos com defasagem da variável independente – modelos lag, SAC e SDM – apresentam o cálculo dos impactos em lugar dos resultados iniciais do modelo. Isso é necessário para interpretar corretamente os coeficientes de regressão, devido aos transbordamentos entre os termos no processo de geração de dados. Dada a natureza desses modelos, em que os resultados de um local impactam o seu vizinho, e por consequência o vizinho do seu vizinho (incluindo a si próprio), e assim sucessivamente, tornou-se necessário rodar simulações para a obtenção de um valor médio dos coeficientes, que puderam então serem avaliados como o efeito que cada variável independente exerceu no valor da variável dependente, assim como nos demais modelos e na regressão linear. Foram rodadas 999 simulações para cada um.

Todas as variáveis incluídas nos modelos são estatisticamente significativas no nível 0,05, sendo que a maior parte também o é nos níveis 0,01 e 0,001. As exceções foram algumas das variáveis independentes defasadas (impactos indiretos), nos modelos que contém esse tipo de variável. No entanto, nesses casos as variáveis relacionadas à própria área (impactos diretos) são estatisticamente significativas, assim como os impactos totais. Tais casos estão claramente sinalizados nas tabelas. Os resultados também incluem os valores do AIC (*Akaike Information Criterion*).

Como pôde ser observado, ao se comparar o R^2 , todos os modelos SAR (com exceção do SLX) apresentaram uma grande melhoria no ajuste comparados à regressão linear MMQ, que não considera o componente espacial. O modelo com maior R^2 foi o SDEM² com $R^2=0,84$, substancialmente mais alto que os 0,70 da regressão MMQ. Os modelos com Y defasado não apresentam naturalmente um coeficiente de determinação R^2 como nos demais, mas o programa retorna um pseudo- R^2 Nagelkerke calculado com o log-probabilidade. Ao se analisar os resultados dos coeficientes espaciais ρ e λ , notou-se que à exceção do modelo SAC, todos tiveram um efeito de forte magnitude, e foram estatisticamente significativos ($p<0,01$) excetuando-se o modelo SDM² cujo ρ tem $p=0.059$. Notou-se que no modelo SDEM² o coeficiente λ é negativo e altamente significativo, o que, segundo Kopczewska *et al.*, (2017) sugere um padrão de competição entre regiões ao invés de agrupamento de padrões semelhantes. Além disso, houve uma similaridade nos valores do AIC para os modelos, com destaque para o modelo SDEM² que apresentou o menor valor, mostrando-se como o modelo mais bem ajustado dentre os analisados. A Tabela 9 apresenta o resultado dos impactos para esse modelo.

Tabela 7: Resultados estatísticos dos modelos *lag*, SLX e SEM

Modelo	Lag ¹			Lag ²			SLX ¹			SLX ²			SEM ¹			SEM ²		
	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z
(Intercepto)	-0.265	0.359	-0.739	-1.091	0.369	-2.962	0.354	0.240	1.472	10.833	8.83630	1.226	0.666	0.170	3.907	0.790	0.611	1.293
TransferSt	0.758	0.139	5.169	0.773	0.1347	5.624	0.681	0.174	3.907	0.575	0.15227	3.778	0.543	0.106	5.141	0.672	0.121	5.542
logBusLRTrips	0.184	0.035	4.959	0.153	0.034	4.426	0.167	0.045	3.756	0.191	0.03545	5.390	0.131	0.028	4.635	0.156	0.032	4.885
logEmploy2016	0.126	0.048	2.479	0.200	0.045	4.321				0.153	0.04542	3.370	0.149	0.045	3.318	0.211	0.043	4.927
Pop2016	0.069	0.016	4.152	0.076	0.015	4.939	0.088	0.021	4.204	0.083	0.01545	5.339	0.0756	0.014	5.370	0.0685	0.015	4.657
sqrtNumBusLines	0.110	0.030	3.462	0.140	0.028	4.828	0.198	0.042	4.655	0.140	0.02813	4.986	0.162	0.031	5.266	0.121	0.027	4.528
logMedPersInc	0.431	0.154	2.649	0.574	0.146	3.855				0.693	0.16915	4.096				0.629	0.162	3.875
Average_ho	0.335	0.121	2.613	0.273	0.118	2.260				0.466	0.12685	3.670				0.398	0.117	3.390
Median_age										-0.039	0.01218	-3.202				-0.029	0.0103	-2.807
Variáveis Defasadas																		
lag.TransferSt							<u>0.241</u>	<u>0.230</u>	<u>1.047</u>	-6.448	2.51809	-2.561						
lag.logBusLRTrips							<u>0.003</u>	<u>0.064</u>	<u>0.047</u>	1.575	0.55348	2.846						
lag.logEmploy2016										-2.004	0.34235	-5.854						
lag.Pop2016							0.071	0.027	2.623	0.314	0.09991	3.142						
lag.sqrtNumBusLines							<u>-0.033</u>	<u>0.054</u>	<u>-0.606</u>	1.076	0.19993	5.382						
lag.logMedPersInc										<u>3.076</u>	<u>1.95270</u>	<u>1.575</u>						
lag.Average_ho										1.855	0.73889	2.510						
lag.Median_age										<u>-0.418</u>	<u>0.22400</u>	<u>-1.865</u>						
ρ (Rho)		0.33055			0.65171													
λ (Lambda)														0.64015			0.90211	
R ²		0.78064			0.80199			0.6835 (0.6685)			0.8379 (0.8218)			0.81527			0.82162	
AIC		341.09			322.86									306.51			306.27	

Coef. = Coeficientes E.P.=Erro padrão Val. Z = Valor Z Todas as variáveis são estatisticamente significativas no nível 0.05 ou menor, exceto as sublinhadas.

Sobrescrito1 indica utilização da matriz de pesos espaciais W1 e sobrescrito 2 da matriz W2 N = 178

Tabela 8: Resultados estatísticos dos modelos SAC, SDM e SDEM

Modelo	SAC ¹			SAC ²			SDM ¹			SDM ²			SDEM ¹			SDEM ²		
	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z	Coef.	E.P.	Val. Z
(Intercepto)	0.626	0.207	3.026	0.869	1.254	0.693	0.247	0.176	1.405	13.236	8.287	1.597	0.923	0.309	2.986	2.314	8.662	0.267
TransferSt	0.553	0.111	4.977	0.639	0.129	4.956	0.607	0.116	5.243	0.524	0.143	3.669	0.721	0.142	5.092	0.617	0.136	4.533
logBusLRTrips	0.135	0.031	4.404	0.157	0.032	4.956	0.139	0.030	4.619	0.182	0.033	5.472	0.158	0.037	4.248	0.200	0.033	6.131
logEmploy2016	0.150	0.045	3.306	0.214	0.043	5.007	0.122	0.046	2.664	0.174	0.043	4.055	0.122	0.048	2.543	0.157	0.042	3.695
Pop2016	0.076	0.014	5.298	0.067	0.015	4.528	0.073	0.014	5.209	0.078	0.015	5.354	0.079	0.015	5.407	0.079	0.015	5.390
sqrtNumBusLines	0.162	0.031	5.189	0.1161	0.027	4.237	0.176	0.032	5.486	0.127	0.027	4.769	0.158	0.031	5.150	0.140	0.026	5.309
logMedPersInc				0.621	0.161	3.843				0.667	0.159	4.200				0.675	0.160	4.227
Average_ho				0.395	0.116	3.392				0.429	0.119	3.597				0.479	0.119	4.045
Median_age				-0.029	0.010	-2.850				-0.039	0.011	-3.425				-0.034	0.011	-3.011
Variáveis Defasadas																		
lag.TransferSt							<u>-0.179</u>	<u>0.157</u>	<u>-1.141</u>	-6.765	2.365	-2.861	<u>0.349</u>	<u>0.188</u>	<u>1.854</u>	-4.668	2.120	-2.203
lag.logBusLRTrips							<u>-0.068</u>	<u>0.043</u>	<u>-1.575</u>	1.091	0.532	2.050	<u>0.052</u>	<u>0.052</u>	<u>1.018</u>	1.892	0.466	4.062
lag.logEmploy2016							<u>-0.088</u>	<u>0.063</u>	<u>-1.402</u>	-1.318	0.363	-3.627	<u>0.025</u>	<u>0.074</u>	<u>0.337</u>	-2.141	0.246	-8.705
lag.Pop2016							<u>-0.018</u>	<u>0.020</u>	<u>-0.874</u>	<u>0.195</u>	<u>0.101</u>	<u>1.929</u>	<u>0.033</u>	<u>0.023</u>	<u>1.412</u>	0.294	0.070	4.185
lag.sqrtNumBusLines							-0.149	0.044	-3.372	0.601	0.236	2.542	-0.108	0.049	-2.181	1.105	0.150	7.356
lag.logMedPersInc										<u>2.119</u>	<u>1.857</u>	<u>1.141</u>				2.246	1.876	1.197
lag.Average_ho										<u>0.741</u>	<u>0.748</u>	<u>0.989</u>				2.412	0.564	4.275
lag.Median_age										<u>-0.393</u>	<u>0.211</u>	<u>-1.866</u>				-0.233	0.216	-1.079
ρ (Rho)		<u>0.022643</u>			<u>-0.15534</u>				0.63025		<u>0.51711</u>							
λ (Lambda)		0.62556			<u>0.95445</u>									0.64235				-1
R ²		0.81474			0.82276				0.82147		0.84111			0.82316				0.84421
AIC		309.01			307.13				310.43		301.69			308.74				298.17

Coef. = Coeficientes E.P.=Erro padrão Val. Z = Valor Z Todas as variáveis são estatisticamente significativas no nível 0.05 ou menor, exceto as sublinhadas.

Sobrescrito1 indica utilização da matriz de pesos espaciais W1 e sobrescrito 2 da matriz W2 N = 178

Tabela 9: Resultados dos impactos do modelo SDEM²

Medidas de Impacto (defasagem, exata):			
	Direto	Indireto	Total
TransferSt	0.61680966	-4.6684506	-4.0516409
log_BusLRTrips	0.20004635	1.8916238	2.0916702
log_Employ2016	0.15702147	-2.1405747	-1.9835532
Pop2016	0.07908361	0.2938631	0.3729467
log_MedPersInc	0.13960117	1.1052524	1.2448536
sqrt_NumBusLines	0.67485684	2.2456347	2.9204916
Median_age	0.47946806	2.4119954	2.8914635

Erros padrão simulados:			
	Direto	Indireto	Total
TransferSt	0.13606058	2.11954036	2.17382787
log_BusLRTrips	0.03262816	0.46571894	0.47413196
log_Employ2016	0.04249525	0.24591133	0.24648717
Pop2016	0.01467315	0.07021486	0.07023777
log_MedPersInc	0.02629327	0.15025741	0.14657044
sqrt_NumBusLines	0.15963862	1.87622497	1.87999534
Median_age	0.11854055	0.56416881	0.57362782

Valores-z simulados:			
	Direto	Indireto	Total
TransferSt	4.533346	-2.202577	-1.863828
log_BusLRTrips	6.131094	4.061728	4.411578
log_Employ2016	3.695035	-8.704661	-8.047288
Pop2016	5.389683	4.185198	5.309774
log_MedPersInc	5.309389	7.355727	8.493211
sqrt_NumBusLines	4.227403	1.196890	1.553457
Median_age	4.044760	4.275308	5.040661

Valores-p simulados:			
	Direto	Indireto	Total
TransferSt	5.8057e-06	0.027625	0.062346
log_BusLRTrips	8.7277e-10	4.8711e-05	1.0262e-05
log_Employ2016	0.00021986	< 2.22e-16	8.8818e-16
Pop2016	7.0582e-08	2.8492e-05	1.0976e-07
log_MedPersInc	1.0999e-07	1.8985e-13	< 2.22e-16
sqrt_NumBusLines	2.3640e-05	0.231349	0.120314
Median_age	5.2377e-05	1.9087e-05	4.6393e-07

Na Tabela 9, as medidas **diretas** apontam para a parte das observações que são explicadas pelas características próprias da área, enquanto as **indiretas** são a parte influenciada pelas áreas vizinhas e a coluna **total** indica o efeito geral. Na prática, isso significa, por exemplo, que para a variável Pop2016, 21,2% do impacto (0.079÷0.373) é relativo ao número de moradores ao redor da própria estação, enquanto que 78,8% do impacto (0.294÷0.373) se deve à população ao redor das estações vizinhas – nesse caso, ao longo da linha. Todas as

variáveis são estatisticamente significativas no nível de confiança 0.001, mas ao se contabilizar os efeitos indiretos, *TransferSt* ($p=0.06$) e *NumBusLines* ($p=0.12$) deixam de ser.

A variável que apresenta maior impacto direto no *ridership* segundo o modelo é o número de linhas de ônibus e VLT com pontos até 650 m das estações, sugerindo a forte presença de integração entre os modos. Por outro lado, a variável com maior impacto indireto (e total) é a *dummy TransferSt*, que denota estação de transferência, com um coeficiente negativo. Isto condiz com o esperado, pois as estações mais importantes das linhas são também estações de transferência, logo para as estações que não se encontram nesse grupo, essa variável tem um impacto negativo no *ridership*. Esse fato, aliado ao desempenho superior de todos os modelos do tipo “2” em comparação com os do tipo “1” confirma a importância da inclusão da estrutura da rede de transporte na análise através da matriz de pesos W_2 .

Na sequência, calculou-se o modelo de interação espacial multiníveis a fim de verificar seu potencial de melhoria em comparação aos demais. Primeiramente calculou-se um modelo *lag* usando a matriz de pesos espaciais W_1 , cujos resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados do MIE nível inferior (*lag*)

Tipo: lag				
Coeficientes: (erros padrão assintóticos)				
	Estimado	Erro Padrão	Valor-z	Valor-p
(Intercepto)	0,55671	0,17286	3,22060	0,001279
TransferSt	0,73525	0,14861	4,97790	8,412e-07
\log_{10} BusLRTrips	0,20140	0,03706	5,47313	6,402e-08
\log_{10} Employ2016	0,09160	0,04943	1,82442	0,067206
Pop2016	0,08082	0,01533	5,27395	6,025e-07
\log_{10} MedPersInc	0,31466	0,16384	1,91416	0,049898
$\sqrt{\text{NumBusLines}}$	0,08878	0,03085	2,86374	0,004575
Rho (ρ): 0,33481	R ² : 0,77224			N=178

Vê-se que o coeficiente autoregressivo espacial ρ tem um efeito positivo (0,33) e, além disso, é altamente significativo ($p<0,001$). O R^2 desse modelo foi igual a 0,77. Os valores mostrados são os impactos diretos do modelo após 999 iterações.

Seguindo para o modelo do nível superior, foi necessário em primeiro lugar calcular a matriz de custos Origem-Destino. Para isso foi utilizado a ferramenta *Origin-Destination Cost Matrix* do *software* ArcGIS Pro 2.4, com capacidade de leitura de arquivos GTFS. Desse modo, não foi necessário inferir tempos de espera, transferências ou tempo de viagem, pois o cronograma real da rede de trens de Sydney foi utilizado, o que resultou em tempos de viagem

reais. Como a análise se baseou nas áreas de serviço das estações, isso as torna, por definição, os centroides das áreas analisadas. Com isso tampouco houve a necessidade de se calcular o tempo de caminhada até as estações, pois elas são os pontos de partida das viagens. Mantendo o padrão, o dia selecionado para a análise foi novamente uma terça feira média, e os tempos de viagem totais utilizados representam a média de três viagens iniciadas as 8:00, 8:08 e 8:17 da manhã, para evitar distorções devidas ao cronograma dos trens.

Em seguida, utilizando esta matriz de custos e os resultados do modelo inferior para entradas e saídas das estações, calculou-se a tabela de fluxos Origem-Destino através do modelo gravitacional simples, como descrito por Chun *et al.* (2012), apresentado na $T_{ij} = k \cdot O_i \cdot D_j \cdot F(C_{ij})$

Equação 3.1:

$$T_{ij} = k \cdot O_i \cdot D_j \cdot F(C_{ij}) \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que T_{ij} é uma matriz de fluxos OD, k é uma constante a ser estimada, O_i e D_j são as viagens geradas por cada origem e recebida por cada destino, nesse caso as entradas e saídas das estações, e por último $F(C_{ij})$ é uma função de impedância onde se considera os custos de viajar de i para j , nesse caso a matriz de tempos de viagem. Inicialmente foi utilizada uma função de decaimento exponencial para $F(C_{ij})$ do tipo $F(C_{ij}) = e^{-(\beta \cdot C_{ij})}$ em que β é um parâmetro a ser estimado. Após cálculo do modelo, no entanto, observou-se que o parâmetro β ótimo seria positivo, o que na prática significaria que destinos mais distantes exerceriam maior atração sobre as origens, contrariando a premissa do modelo gravitacional. Além disso, para $\beta > 3$ a equação não teve solução, e quanto maior sua magnitude quase todos os fluxos se tornaram menores que 1. Dessa forma, descartou-se a função de decaimento ($\beta=0$), e a matriz de fluxos foi resolvida pelo processo iterativo de balanceamento de linhas e colunas. Fluxos com mesma origem e destino ($i = j$) foram considerados iguais a zero.

Para a matriz de pesos utilizou-se W_2 . Esperou-se que o resultado combinado da adoção de matrizes que levam em consideração diferentes aspectos espaciais nos dois níveis resultasse em um modelo mais bem ajustado. Calculou-se então o modelo do nível superior, cujo resultado é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do MIE nível superior (SAC)

Tipo: lag				
Coeficientes: (erros padrão assintóticos)				
	Estimado	Erro padrão	Valor-z	Valor-p
(Intercepto)	0,556709	0,172859	3,2206	0.001279
TransferSt	0,695783	0,141260	4,9256	8.412e-07
log_BusLRTrips	0,190590	0,035247	5,4072	6.402e-08
log_Employ2016	0,086684	0,047361	1,8303	0.067206
Pop2016	0,076483	0,015326	4,9904	6.025e-07
log_MedPersInc	0,297772	0,151860	1,9608	0.049898
sqrt_NumBusLines	0,084017	0,029630	2,8356	0.004575
Rho (ρ): -0,08058127	Lambda (λ): 0,8398899		R ² : 0,7408976	N=31648

O resultado mostra que a adoção do MIE multiníveis não resultou em um melhor ajuste do modelo, e que até mesmo o enfraqueceu, como pode ser observado pelo R² menor do que no nível inferior. Além disso, tem-se um λ de grande magnitude mas um ρ muito próximo de zero. Uma última análise mostrou que esse modelo subestimou o número de usuários em grande parte das estações, como pode ser observado na qualidade do ajuste do modelo (resultado do modelo / n° real de entradas e saídas) em cada estação de Sydney (Figura 9).

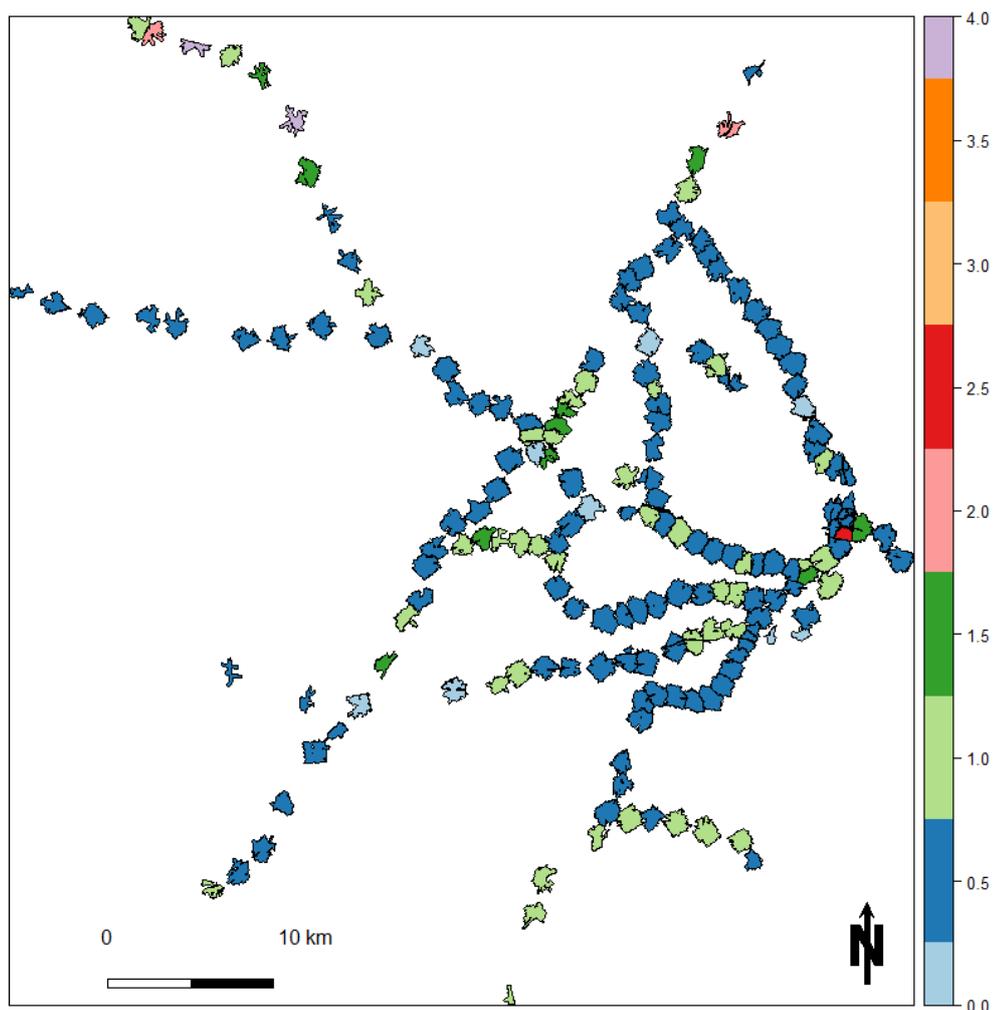


Figura 9: Qualidade do ajuste do MIE multiníveis

Como pode ser observado, a estimativa do modelo do número de entradas e saídas na maioria das estações está muito subestimada (azul escuro) estando entre 25 a 75% do número real observado, e houve nove estações em que o número foi ainda menor que 25% (azul claro). O ajuste geral médio do modelo, considerando todas as estações foi de 64,0% do valor real. O ajuste médio do modelo SDEM² foi consideravelmente melhor, estimando uma movimentação igual a 91,9% da real. A Figura 10 apresenta o ajuste dos resultados do modelo SDEM² para todas as estações.

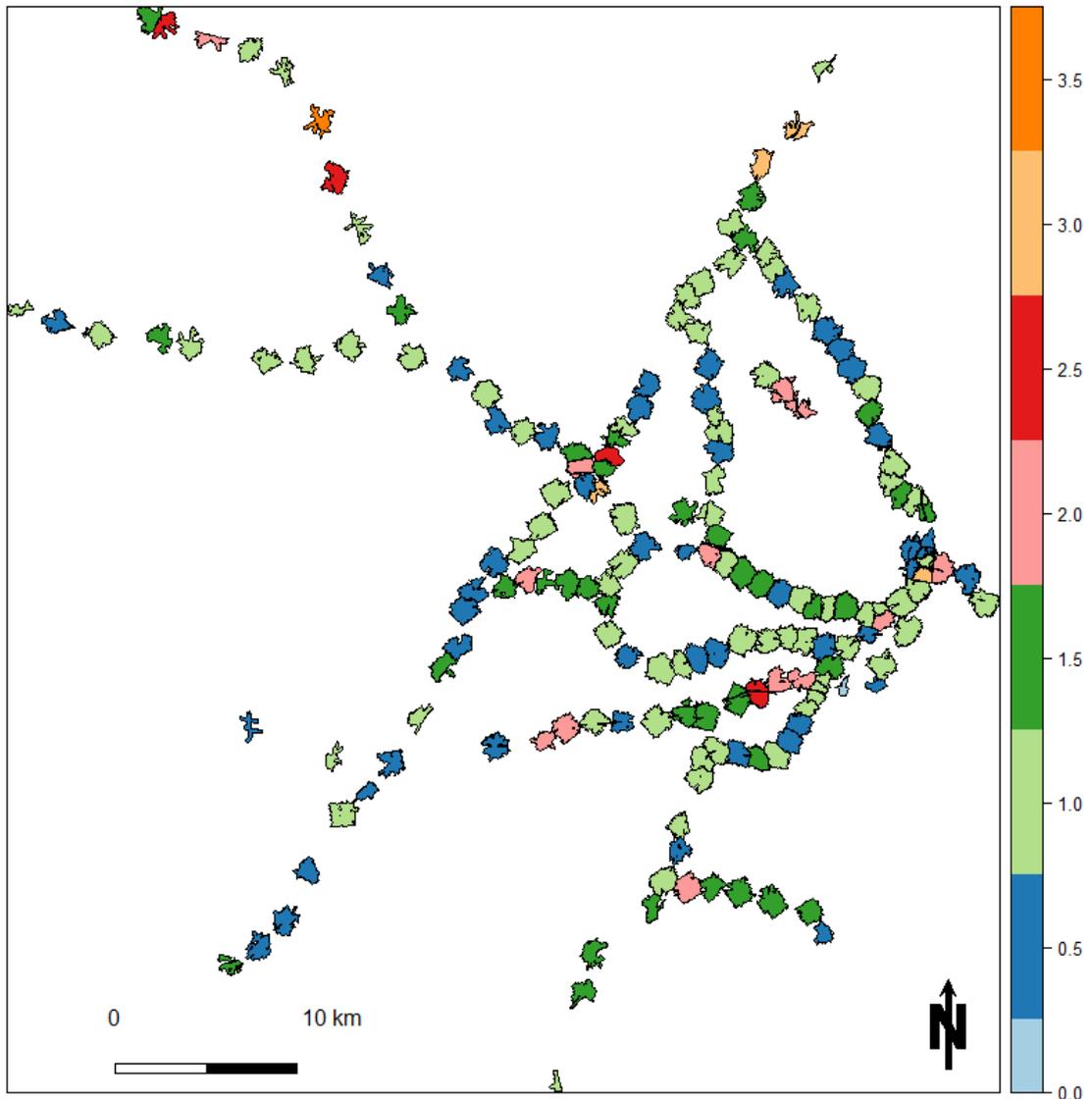


Figura 10: Qualidade do ajuste para o modelo SDEM²

Para esse modelo vê-se um resultado completamente diferente, em que a maioria das estações apresentou um ajuste próximo de um (verde claro), ou seja, muito próximo do valor real observado. Houve também um número considerável de estações em que a movimentação foi subdimensionada (azul escuro) ou superdimensionada (verde escuro), mas houve apenas um

caso de subdimensionamento extremo (azul claro, <25%). As estações com os maiores superdimensionamentos tiveram redução desse fator, e em geral são estações com movimentos menores. Em vista dos resultados observados, descartou-se a utilização do MIE multiníveis e decidiu-se adotar o modelo SDEM² para o cálculo do *ridership* nos cenários futuros.

3.2 Análise do potencial da oferta de capacidade de transporte ferroviário

A análise do potencial futuro a partir da oferta de um novo modo de transporte ferroviário foi dividida em duas partes. Inicialmente calculou-se indicadores do desenvolvimento urbano que quantificam a abrangência das mudanças ocasionadas pelo modo de transporte. Em seguida avaliou-se os cenários futuros propostos para se obter um resultado generalizado que incluiu todos os indicadores propostos.

3.2.1 Cálculo dos indicadores do desenvolvimento urbano

3.2.1.1 Potencial de construção de novas habitações

Neste estudo, devido a inviabilidade de análise minuciosa dos arredores de centenas de estações, estimou-se o número adicional de habitantes multiplicando-se a densidade populacional desejada às áreas de serviço de cada estação. A densidade populacional em habitantes por hectare nas áreas de serviço (1000 m) ao redor das estações em 2016 é descrita na Tabela 12. A Figura 11 mostra um mapa das densidades médias ao redor de cada estação em 2016, incluindo também as estações do metrô de Sydney, já inauguradas e que serão inauguradas nos próximos anos, e excluindo a linha T6-*Carlingford*, que foi desativada no início de 2020 e que fará parte da rota do VLT de *Parramatta*.

Tabela 12: Resumo da densidade populacional nas áreas de serviço em 2016 [hab/ha]

Min.	1º Q.	Mediana	Média	3º Q.	Max.
0,16	20,87	38,77	52,68	71,01	254,05

Observou-se que há poucas regiões de alta densidade, localizadas nos arredores do distrito central de Sydney e em alguns outros centros regionais como *Parramatta*, *Bankstown* e *Chatswood*, e que a densidade diminui a medida que se vai em direção às zonas periféricas. Em geral, a densidade média é consideravelmente baixa, havendo espaço para um aumento populacional sem que haja saturação dessas áreas.

De fato, em regiões de novos desenvolvimentos isto já vem ocorrendo. A área de renovação urbana *Green Square* é um projeto de redesenvolvimento de antigas áreas industriais e de galpões, há apenas 3,5 km do centro de Sydney. Nesta região de 278 hectares, a população planejada para 2030 é de 61 mil habitantes (CITY OF SYDNEY, 2015). Isso representa uma densidade média de 219,42 hab/ha sobre uma grande área, com regiões de densidade muito maior, mas o que já a colocaria em segundo lugar comparada às áreas de serviço em 2016. A densidade média máxima observada ao redor das estações é de 254,05 hab/ha, na área de serviço da estação *Museum*, adjacente à estação Central. Novas áreas de desenvolvimento como o precinto de *Waterloo*, em volta da nova estação de metrô em construção prevêem uma densidade ainda maior, que pode chegar a 700 hab/ha.

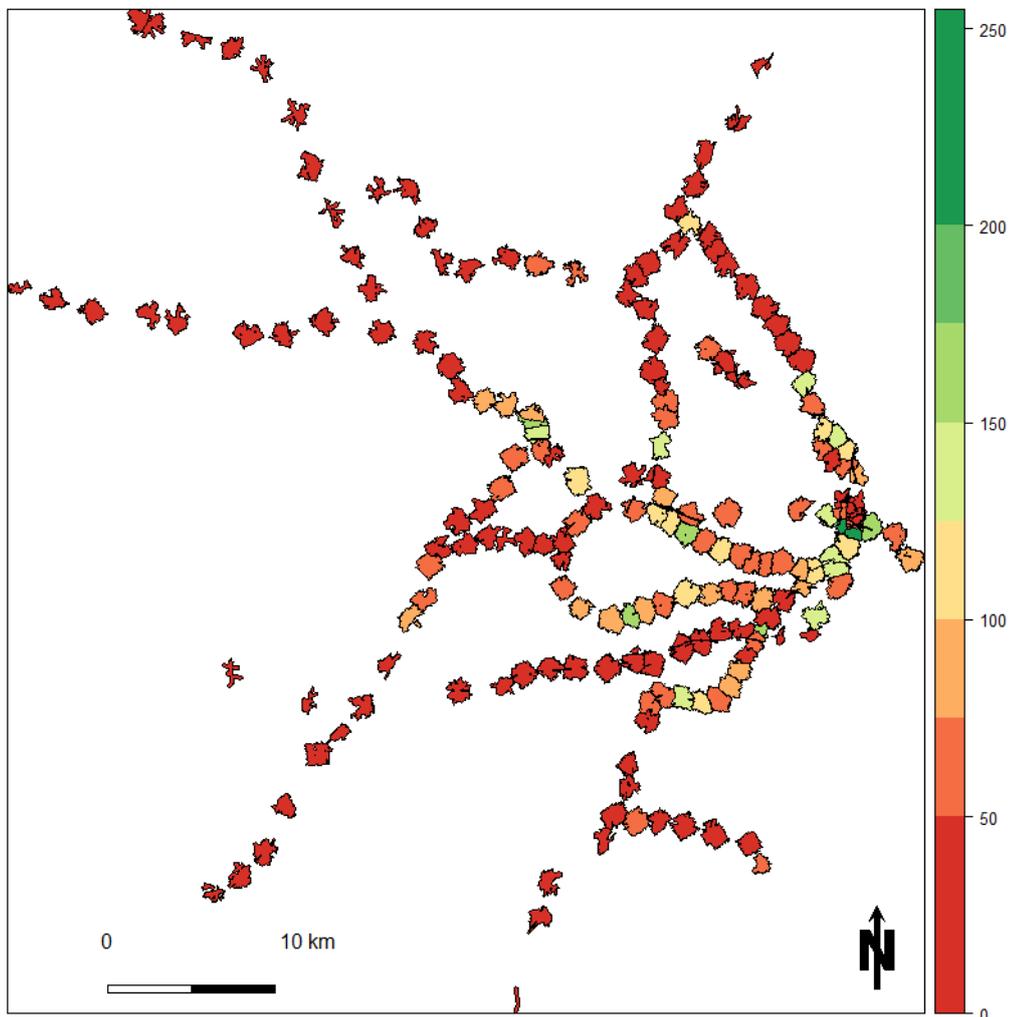


Figura 11: Densidade populacional média nas áreas de serviço em 2016 [hab/ha]

Em vista do cenário atual de baixas densidades, e assumindo um cenário realista e factível, decidiu-se utilizar a densidade média observada em *Museum* (arredondada para 255 hab/ha) como a densidade média máxima que poderia ser adotada na requalificação dos arredores das estações. Além disso, visando a maior densificação de áreas centrais, de modo a conter o

espraiamento e manter os tempos de deslocamento médios mais baixos para uma maior parcela da população, decidiu-se aplicar um gradiente de densidade. Usando a estação Central como referência, foi adotado o valor de 255 hab/ha para a densidade máxima em sua área de serviço, e uma taxa de decaimento de 1,5% a cada km a partir dela. Dessa forma, uma estação há cinco quilômetros da Central teve uma densidade máxima de 235,88 hab/ha. Há uma distancia de 20 km a densidade máxima será 30% menor, igual a 178,5 hab/ha, etc. A estação mais distante está a 52,64 km em linha reta da estação Central, e sua densidade foi de 53,65 hab/ha. O resultado da aplicação desse critério para o cálculo de densidades é apresentado na Tabela 13 que descreve as densidades médias que foram adotadas nos cenário futuros. O mapa das densidades médias em cada área de serviço é apresentado na Figura 12.

Tabela 13: Resumo de densidades populacionais propostas nas áreas de serviço [hab/ha]

Min.	1º Q.	Mediana	Média	3º Q.	Max.
53,64	160,22	190,43	185,16	221,91	255,00

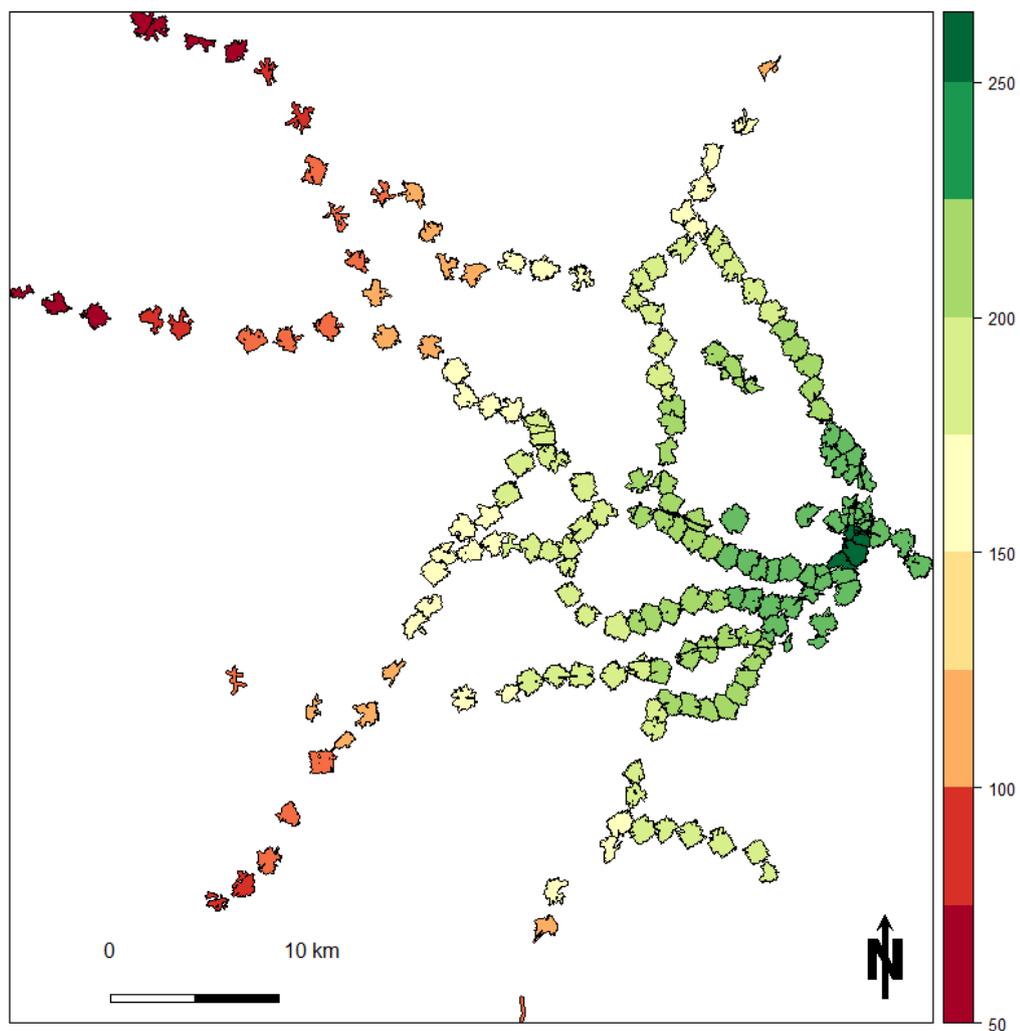


Figura 12: Densidades médias futuras adotadas nas áreas de serviço [hab/ha]

Após a determinação das novas densidades médias máximas para cada área de serviço, foram calculadas as populações máximas teóricas em cada uma delas, multiplicando-se a densidade pela área. Na sequência, subtraindo a população de 2016 dessa população máxima calculada, encontrou-se a diferença de população, que foi o potencial de novos moradores em cada área. Os resultados são apresentados na Tabela 14 e na Figura 13.

Tabela 14: Resumo do potencial de novos moradores nas áreas de serviço

Min.	1º Q.	Mediana	Média	3º Q.	Max.
-141	11.554	16.153	16.167	21.121	31.343

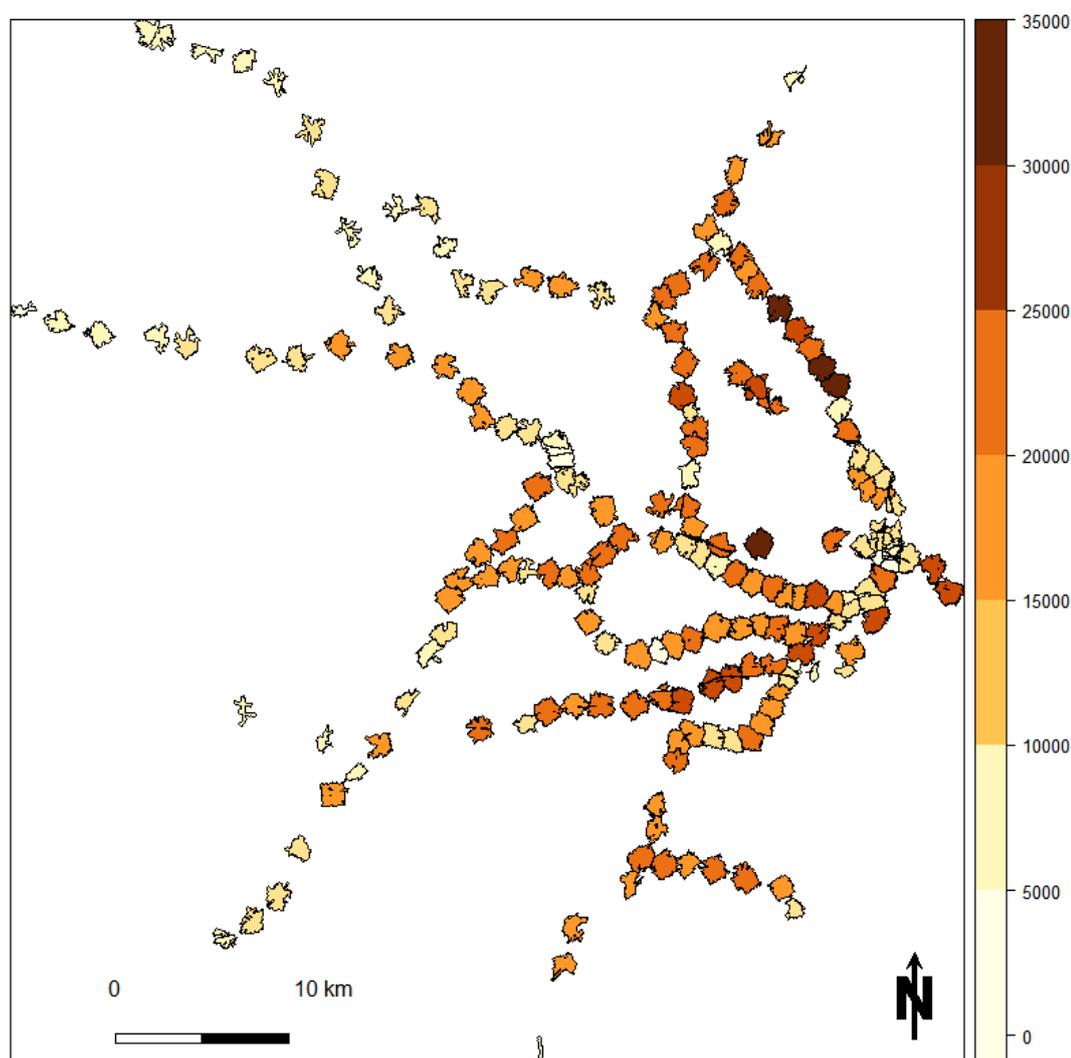


Figura 13: Potencial de novos moradores nas áreas de serviço das estações

Pelo critério de densidades adotado, apenas a estação *Museum* apresentou uma pequena diminuição no número de moradores (-141) enquanto que todas as demais tiveram aumento. Esta diferença chegou a 31.343 novos moradores na área da estação *Five Dock*, que é atualmente uma região de baixa densidade que o governo pretende requalificar e transformar

em uma nova zona de adensamento, em cujo centro estará uma estação da linha M2 do metrô (*Metro West*), que deverá ser inaugurada em 2030.

O potencial total de novos moradores nas áreas de serviço pelo critério de densidade adotado é de 3.087.824 pessoas, o que equivale a 65,86% da população da *Greater Sydney* em 2016, que era de 4.688.312 habitantes (TRANSPORT FOR NSW, 2016a). Isso quer dizer que se 100% do crescimento populacional de Sydney fosse absorvido apenas por essas áreas de hoje em diante, elas só estariam saturadas em 2051, ano em que a população de Sydney deve chegar a 7.796.519 habitantes segundo as projeções oficiais. Sem qualquer adensamento, seriam necessários 2.573 km² adicionais de área urbanizada⁷ para acomodar todos os novos habitantes, uma área equivalente a 7,8 vezes o município de Belo Horizonte (MG) com seus 330,9 km². A população estimada para 2051 representa apenas 20 mil pessoas a mais que a população máxima teórica obtida com o adensamento ao redor das estações. É plausível, portanto, usar o ano de 2051 como ano referência de análise dos cenários futuros, uma vez que terá a mesma população porém distribuída de modo diferente no território.

3.2.1.2 Potencial de atração de novos negócios e geração de empregos

A distribuição de empregos em Sydney é altamente concentrada no CBD e em alguns outros centros secundários, o que fica claro ao se analisar as estatísticas apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Resumo estatístico das taxas de emprego / P.E.A. nas áreas de serviço

	Min.	1º Q.	Mediana	Média	3º Q.	Max.
Empregos/P.E.A.	0,03	0,13	0,28	4,84	0,62	707,43
Log	-3,61	-2,04	-1,26	1,58	-0,47	6,56

Os números mostram que mesmo a área que está na mediana da distribuição tem menos de 1 emprego para cada 3 trabalhadores. A grande concentração ficou ainda mais evidente ao se considerar que a área que se encontra no terceiro quartil tem uma taxa de apenas 0,62 emprego por trabalhador, enquanto que o valor máximo chega a mais de 700. A Figura 14 mostra esta taxa de empregos / população nas áreas de serviço. A distribuição desigual tornaria a visualização das taxas menores difícil, por isso optou-se por utilizar uma escala logarítmica. Nesse mapa, tons de bege e marrom indicam locais onde há mais moradores do que empregos ($e^0 = 1$) e tons de turquesa os locais onde o número de empregos excede a população. Observou-se poucas áreas onde isso ocorre – a maioria delas em baixa magnitude, evidenciando a má distribuição de empregos, especialmente ao se considerar que as estações

⁷ Considerando a densidade média de Sydney, de 1.200 habitantes por km² na área urbanizada.

se encontram naturalmente no centro comercial dos bairros, logo apresentam médias mais altas de emprego do que regiões residenciais não atendidas pelo transporte sobre trilhos.

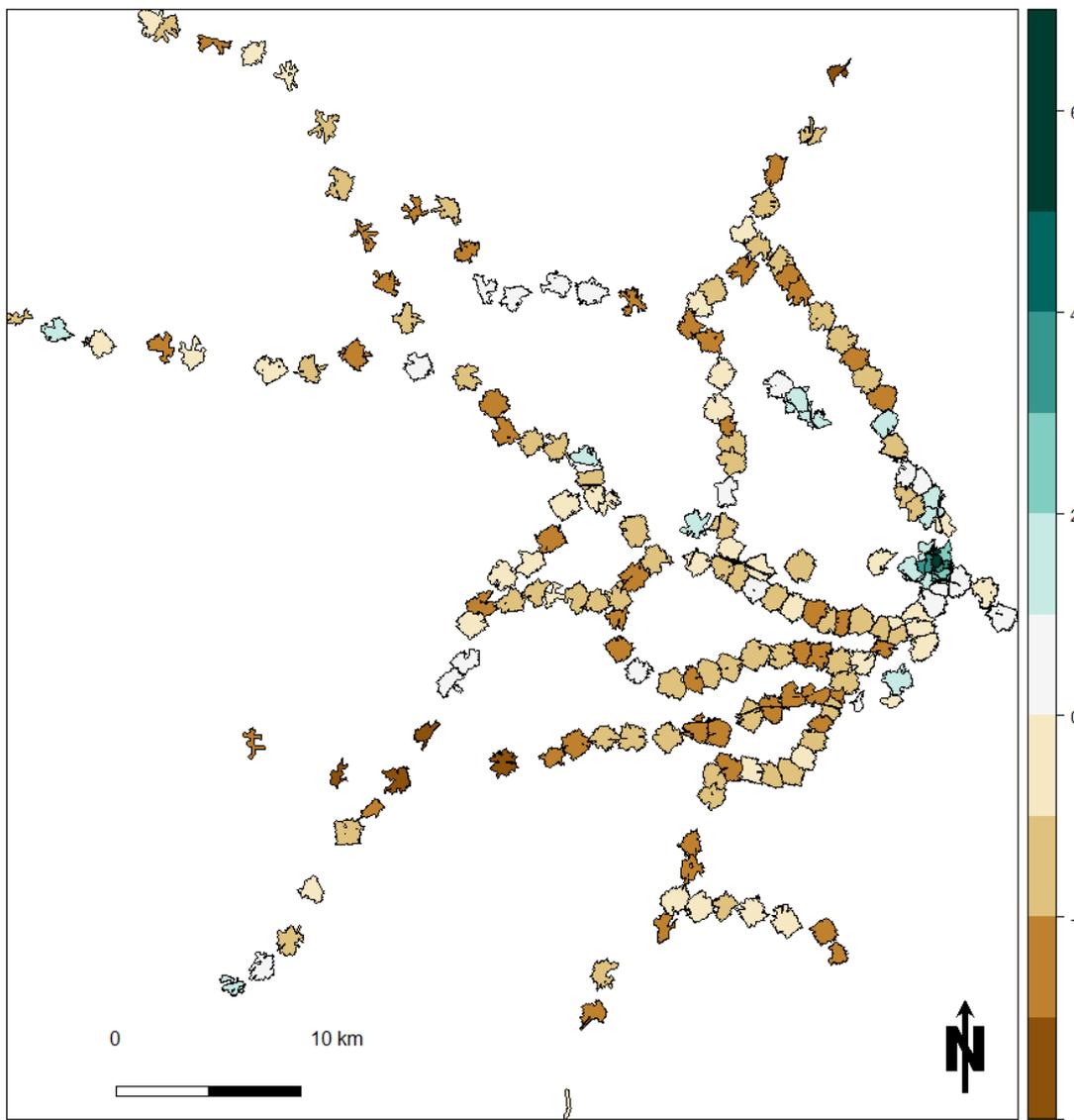


Figura 14: Taxa de empregos / P.E.A. nas áreas de serviço em 2016 (logaritmo)

O crescimento da população de Sydney entre os anos de 2016 e 2051 deverá ser de 66,30% (TRANSPORT FOR NSW, 2016a). Ao mesmo tempo projeta-se que o número de empregos, deverá crescer 63,68%, chegando a 4.078.509 postos de trabalho. No mesmo período, estima-se que a P.E.A. chegará a 3.939.424, um aumento de 68,27%. Considerando a hipótese que todo o acréscimo populacional possa ser absorvido pelo adensamento das áreas ao redor das estações e mantendo-se a proporção entre os crescimentos, aplicou-se esta lógica à população calculada no item 3.2.1.1 Potencial de construção de novas habitações. A soma do potencial de novos moradores foi igual a 3.087.824 pessoas, o equivalente a 65,86% da população da RM em 2016. Têm-se então que o número de novos empregos aumentaria 63,26%, somando

1.576.270 novos empregos, e a P.E.A. teria um crescimento de 67,55% e um acréscimo de 1.581.389 pessoas.

Além de saber o número de novos empregos e mão de obra, foi necessário saber quais áreas apresentam o maior potencial para atração desses novos negócios para que se possa distribuir o crescimento de maneira mais equalizada e ao mesmo tempo sustentável. Ao mesmo tempo que se pretende aumentar a diversidade das áreas, elas têm que ser capazes de sustentar os negócios ali estabelecidos.

Primeiramente, mediu-se o acesso de cada área de serviço ao estoque de mão de obra. O tempo médio gasto no transporte público em Sydney é de 82 minutos diários (ida e volta), sendo que 31% dos usuários gastam mais de duas horas por dia em seus deslocamentos (MOOVIT, 2019). Portanto, usando o tempo de viagem médio em Sydney, foi medida a acessibilidade por transporte público em 41 minutos até as estações. Foram criadas áreas de acessibilidade temporal através de transporte público para cada estação, utilizando os dados GTFS de Sydney. Inclui-se nesta análise não apenas os trens, mas também outros modos (rede de ônibus, linhas de VLT e balsas) e o acesso a pé. A Figura 15 apresenta esta área para a estação *Redfern*.

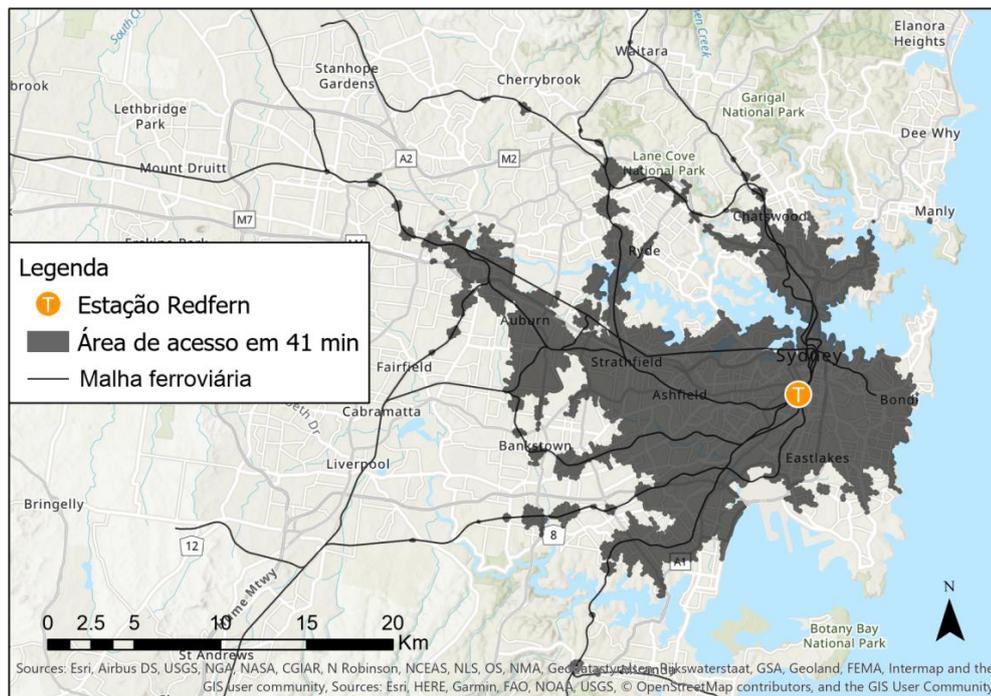


Figura 15: Mapa de acessibilidade temporal por transporte público – estação *Redfern*

Interpolando espacialmente os resultados das áreas de acesso temporal com as zonas de viagem, para as quais se conhecia o número de P.E.A., foi possível saber quantos

trabalhadores conseguiriam acessar essa área no período de 41 minutos (Figura 16). A Tabela 16 resume esse dado.

Tabela 16: Resumo da P.E.A. acessível em 41 minutos por transporte público às estações

Min.	1° Q.	Mediana	Média	3° Q.	Max.
805	142.239	257.534	297.384	436.386	890.521

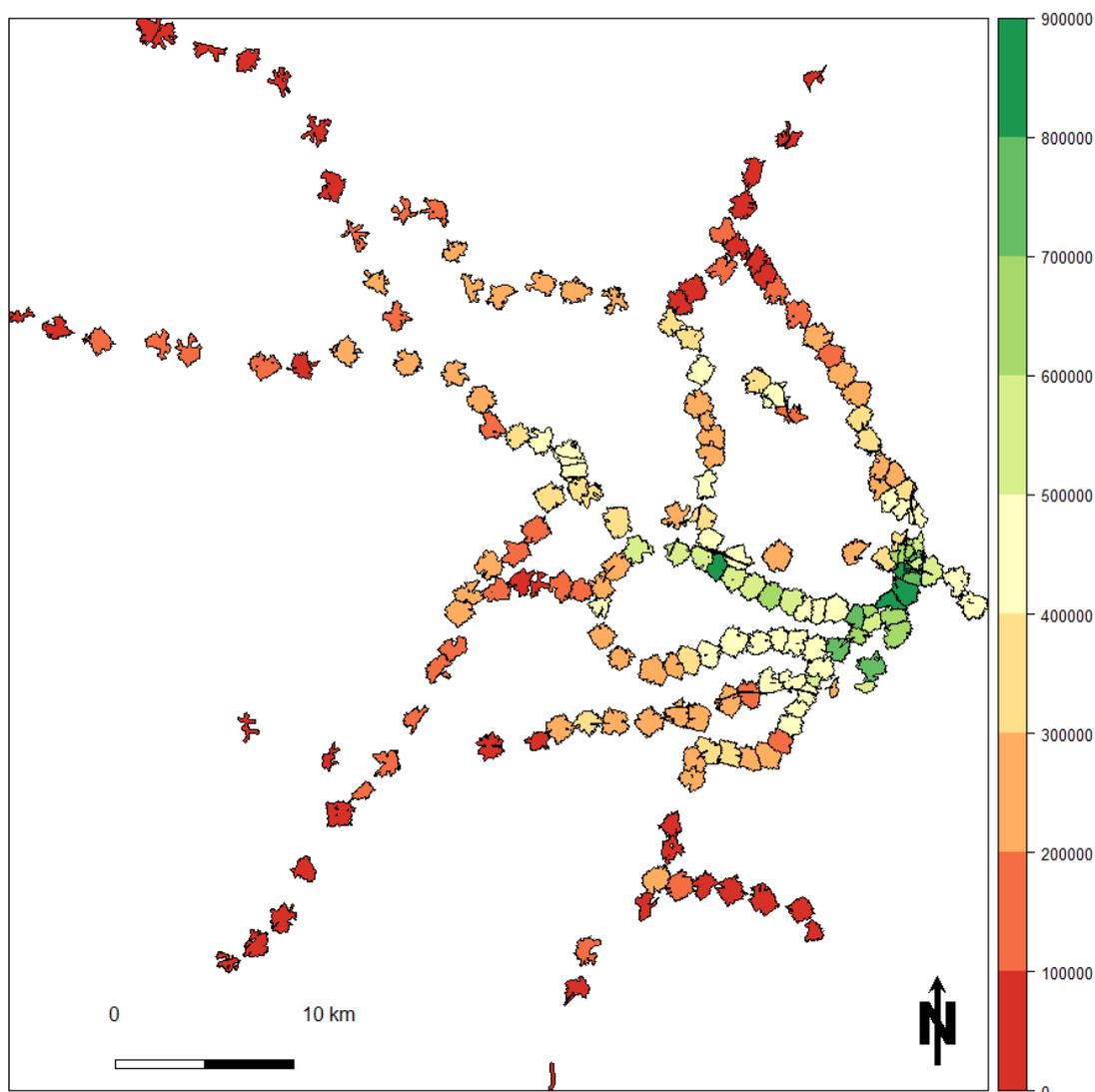


Figura 16: P.E.A. acessível em 41 minutos por transporte público em 2016 às áreas de serviço

Na sequência, calculou-se os índices de centralidade para cada uma das estações como forma de mensurar a localização ótima para o estabelecimento de novos negócios, do ponto de vista do acesso aos consumidores. A importância do acesso rodoviário nesse caso é tão importante quanto o ferroviário, pois ambos atraem diferentes tipos de consumidores. Foi calculado então um índice de centralidade rodoviário e um índice de centralidade ferroviário. Ambos são compostos pelas medidas de *betweenness*, *closeness* e *straightness* em escalas padronizadas entre 0 a 1. A soma dessas três medidas aplicadas às malhas rodoviária e ferroviária compõem

os dois índices, que apresentam, portanto, valores entre 0 e 3. Por fim, para quantificar o índice de centralidade total, somou-se os índices rodoviário e ferroviário, obtendo-se um índice que varia de 0 a 6 para cada uma das estações. Os resultados são apresentados na Figura 17.

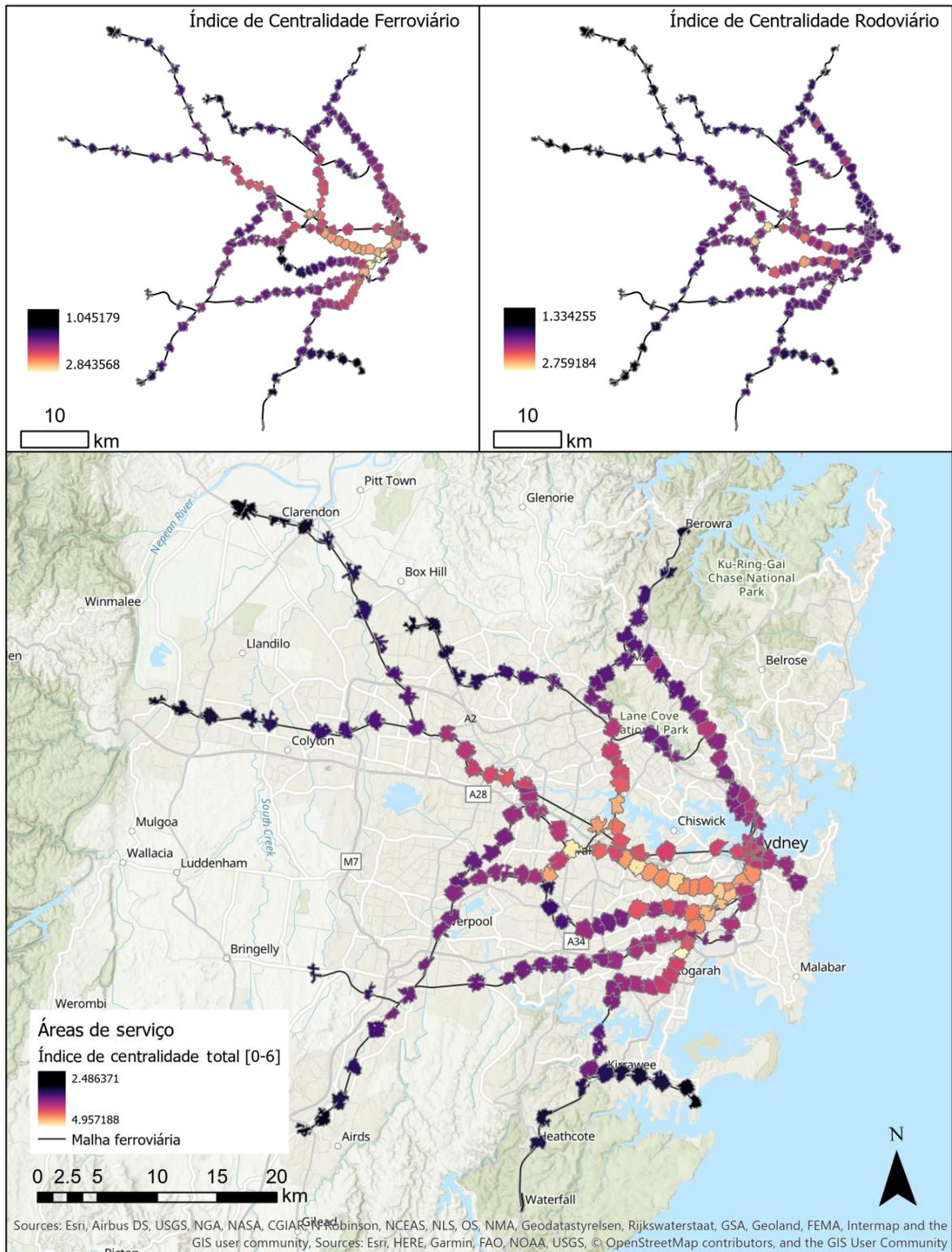


Figura 17: Mapa dos índices de centralidade das estações

Por último, foi necessário unificar os dois indicadores em um único que medisse o potencial de atração de novos negócios de cada área. Considerando-se o fato que o índice de centralidade das estações é um indicador praticamente estável ao longo dos anos, será dado a ele um peso maior, de 60%. O número da P.E.A. acessível tende a mudar conforme os locais se tornam mais densos, portanto já deverá aumentar com as maiores densidades adotadas. Por isso decidiu-se dar a esse indicador o peso menor na composição do indicador final. Desse modo, padronizou-se a medição de P.E.A. em uma escala de 0 a 4. Somando-se os dois indicadores obteve-se um único indicador de potencial de atração de novos negócios e geração de empregos, na escala de 0 a 10 (Figura 18).

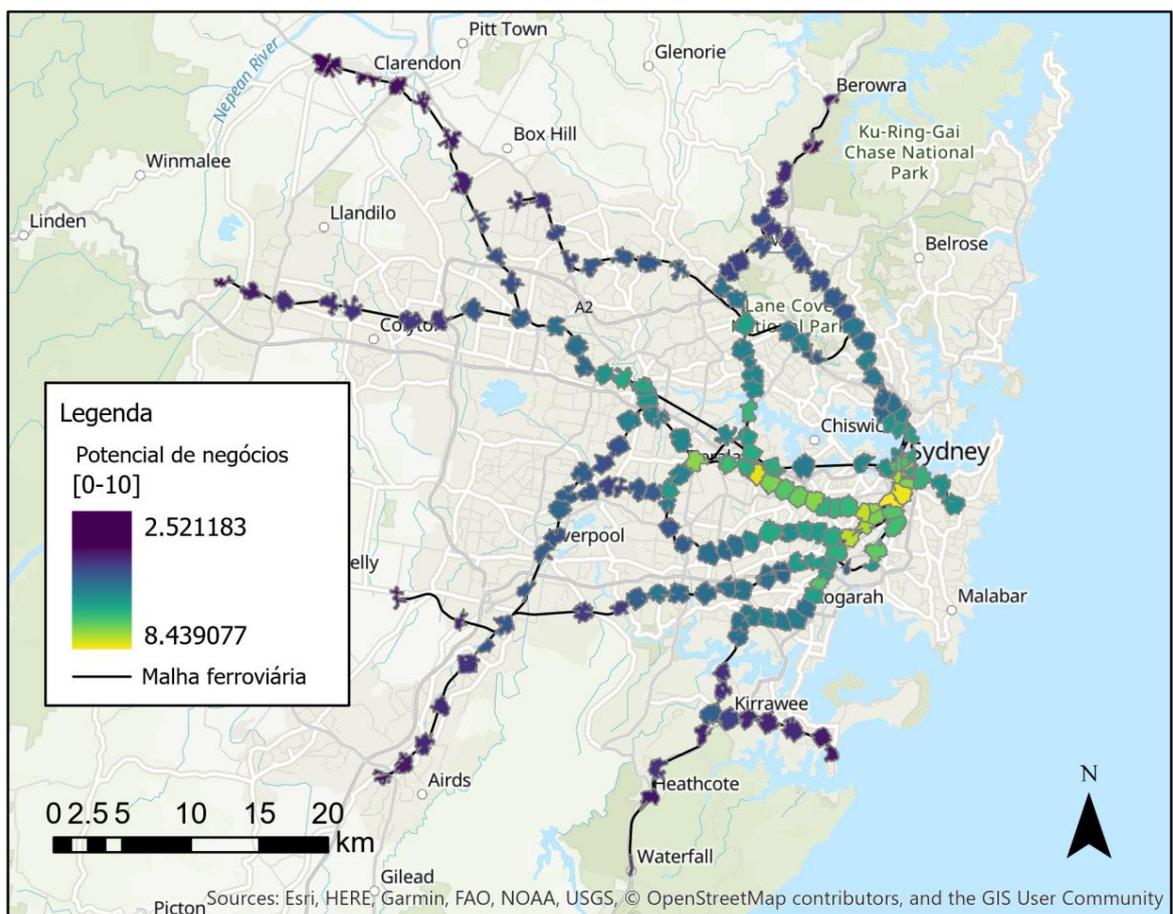


Figura 18: Mapa do potencial de atração de novos negócios e geração de empregos

Uma característica interessante do resultado obtido é que as duas áreas com maior índice correspondem a regiões onde há, de fato, propostas para o maior projeto de requalificação urbana de Sydney, com previsão de construção de dezenas de prédios comerciais. Distribuiu-se então os 1.576.270 novos empregos entre as estações proporcionalmente ao seu potencial, calculado pelo indicador. A Tabela 17 resume esta distribuição:

Tabela 17: Resumo do número de novos empregos adicionados às áreas de serviço

Min.	1º Q.	Mediana	Média	3º Q.	Max.
4.298	6.507	7.990	8.253	9.901	14.387

Notou-se que mesmo a área que recebeu o número mínimo de novos empregos teve uma participação significativa, mostrando que o critério adotado conseguiu distribuir melhor as vagas de emprego através do território, como pode ser observado na Figura 19.

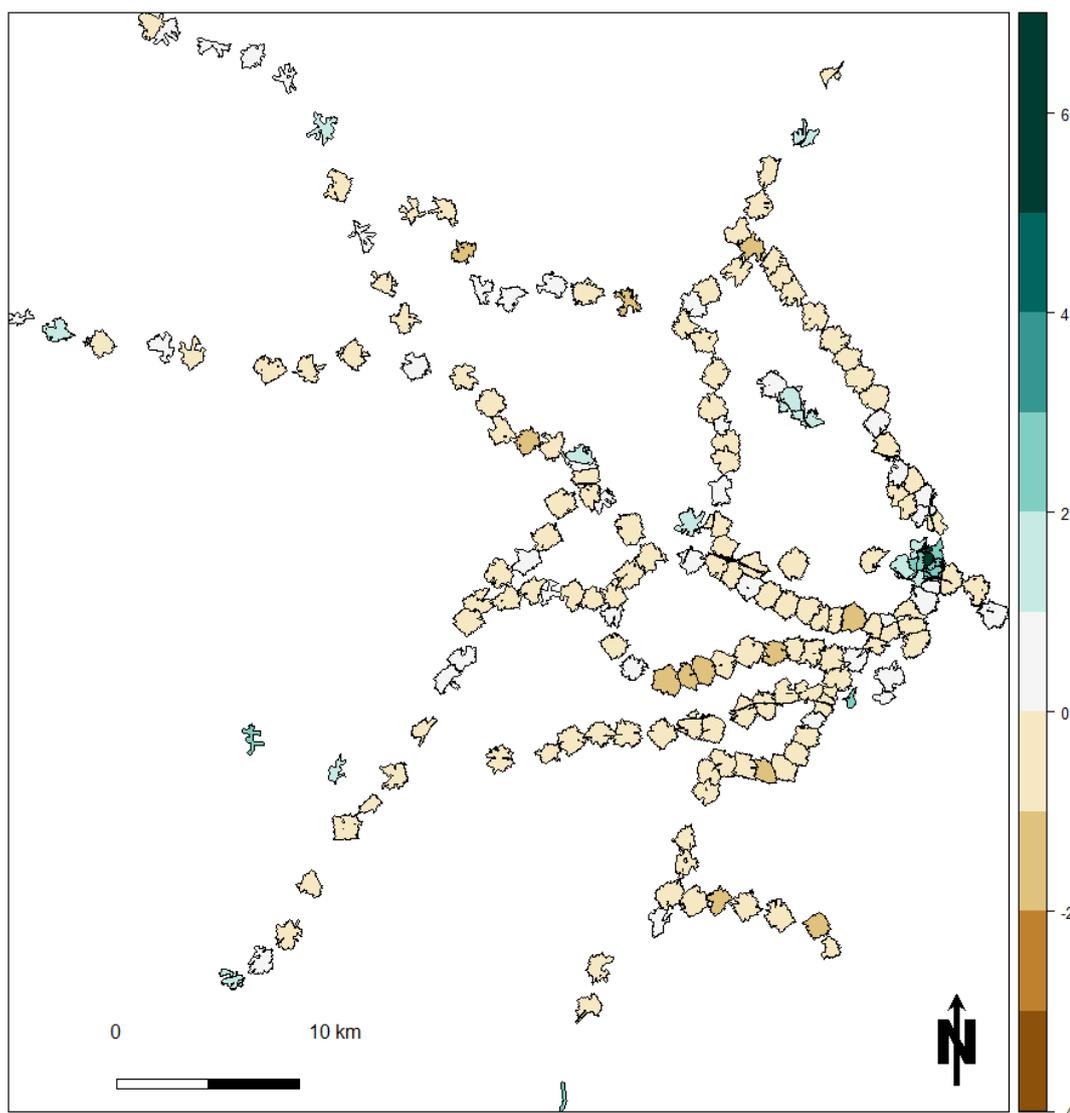


Figura 19: Projeção da taxa de empregos / P.E.A. nas áreas de serviço em 2051 (logaritmo)

Optou-se por utilizar a mesma escala da Figura 14 na legenda para facilitar a comparação direta. Enquanto as áreas com mais empregos que P.E.A. ainda são minoria, foi notável a melhor distribuição de empregos, com a cor predominante indicando uma taxa próxima da igualdade na maioria das áreas, como pode ser visto também no resumo apresentado na Tabela 18:

Tabela 18: Resumo estatístico da taxa de empregos / P.E.A. nas áreas de serviço

	Min.	1º Q.	Mediana	Média	3º Q.	Max.
Empregos/P.E.A.	0,25	0,52	0,70	3,72	1,19	421,16
Log	-1,39	-0,65	-0,35	1,31	0,18	6,04

3.2.1.3 Oportunidades sociais

Para quantificar as oportunidades sociais ocasionadas pela instalação de um novo modo de transporte optou-se por analisar os efeitos da inauguração do metrô de Sydney no mês de maio de 2019, limitando a área de estudo aos locais onde antes não havia transporte sobre trilhos, que compreende as estações entre *Tallawong* e *Cherrybrook*. Desta forma foi possível verificar os impactos diretos que a implantação do novo modo de transporte tem sobre a acessibilidade local. Para manter a uniformidade na análise, os tempos de viagem considerados foram os mesmos adotados no item 3.2.1.2 3.2.1.2 Potencial de atração de novos negócios e geração de empregos. Utilizando-se redes geradas por arquivos GTFS de antes e depois da inauguração das estações, foram calculados os polígonos de acesso em 41 minutos por T.P. para as oito estações. O resultado é apresentado na Figura 20.

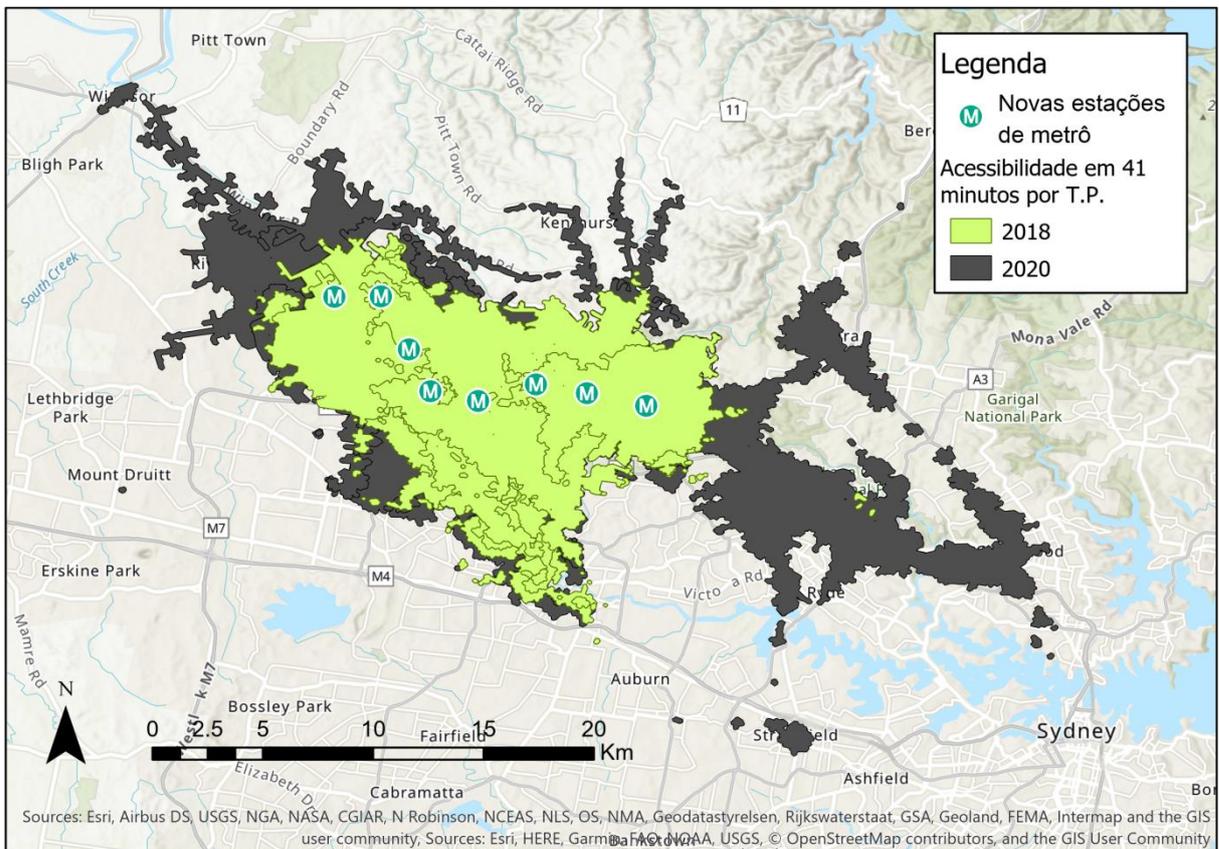


Figura 20: Polígonos de acesso temporal antes e depois da implantação da linha do metrô

Foi notória a diferença de área acessível em um mesmo período de tempo após a implantação do transporte sobre trilhos, onde antes havia apenas ônibus. Para se quantificar o ganho em oportunidades sociais, mediu-se primeiramente a acessibilidade a vagas de emprego a partir dos locais das estações em 2018 e em 2020, cujo resultado é mostrado na Tabela 19.

Tabela 19: Vagas de emprego acessíveis em 41 minutos por T.P. antes e depois do metrô

Área	2018	2020	Diferença	%
Bella Vista Station	192.745	397.846	205.101	106%
Castle Hill Station	110.604	222.346	111.742	101%
Cherrybrook Station	48.204	95.803	47.599	99%
Hills Showground Station	96.698	198.813	102.115	106%
Kellyville Station	118.458	239.729	121.271	102%
Norwest Station	103.830	208.837	105.006	101%
Rouse Hill Station	83.531	175.710	92.179	110%
Tallawong Station	10.967	38.841	27.873	254%
Total geral	765.036	1.577.923	812.887	106%

Mediu-se também o acesso geral a equipamentos de saúde e educação, classificados por tipo, utilizando o *shapefile* topográfico de Sydney (NSW GOVERNMENT, 2019), como apresentado na Tabela 20.

Tabela 20: Equipamentos públicos de saúde e educação acessíveis em 41 minutos por T.P. antes e depois do metrô

Tipo	2018	2020	Diferença	%
Biblioteca	7	24	17	243%
Centro médico comunitário	5	26	21	420%
Creche	4	8	4	100%
Escola de ensino médio	26	53	27	104%
Escola especial	12	22	10	83%
Escola primária	59	122	63	107%
Escola primária-secundária combinada	7	15	8	114%
Estação de ambulância	1	6	5	500%
Faculdade técnica	2	6	4	200%
Hospital geral	6	13	7	117%
Hospital infantil	1	1	0	0%
Hospital psiquiátrico	2	4	2	100%
Instituição de ensino	1	3	2	200%
Pré-escola	0	3	3	-
Universidade	1	2	1	100%
Total	134	308	174	130%

Fonte: NSW Spatial Catalogue, NSW GOVERNMENT, 2019.

As tabelas 19 e 20 apontam para um ganho substancial, acima de 100% para ambos os indicadores, demonstrando claramente o ganho de oportunidades sociais proporcionado pela implantação do metrô.

3.2.1.4 *Well being* e melhorias na qualidade de vida

De maneira similar ao item anterior, para se medir o ganho em *well being* proporcionado pelo novo modo de transporte, mediu-se a acessibilidade a áreas de lazer – incluindo parques, áreas verdes e equipamentos desportivos – e a espaços culturais, em um período de viagem de 41 minutos por meio de T.P. antes e depois da inauguração das estações. O resultado é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21: Equipamentos públicos de cultura e lazer acessíveis em 41 minutos por T.P. antes e depois do metrô

Tipo	2018	2020	Diferença	%
Acampamento	1	1	0	0%
Área de piquenique	2	11	9	450%
Cachoeira	0	1	1	-
Campo de esportes	14	43	29	207%
Campo de golfe	3	5	2	67%
Centro comunitário	19	45	26	137%
Centro desportivo	6	14	8	133%
Clube	11	51	40	364%
Convento / mosteiro	3	5	2	67%
Galeria de arte	0	4	4	-
Local de culto	8	33	25	313%
Local histórico	10	29	19	190%
Mirante	1	3	2	200%
Museu	2	4	2	100%
Parque	203	471	268	132%
Parque de exposições	1	1	0	0%
Piscina pública	2	6	4	200%
Quadra de esportes	5	6	1	20%
Total geral	291	733	442	152%

Fonte: NSW Spatial Catalogue, NSW GOVERNMENT, 2019.

Similarmente ao resultado obtido no item 3.2.1.3 Oportunidades sociais, houve um aumento significativo no número de locais de lazer e cultura acessíveis para a população dessas áreas dentro do mesmo limite de tempo, o que exerce um grande impacto na qualidade de vida das pessoas. Além disso foram calculados os tempos de viagem a partir dos locais das novas

estações antes e depois da chegada do metrô. A Tabela 22 apresenta as somas dos tempos de viagem (em minutos) com origem nesses locais e destino a todas as estações da rede, em 2018 e em 2020. Também é apresentada a diferença, que é o tempo total economizado considerando todos os destinos, bem como a queda percentual que isto representa. A diferença média é igual a diferença dividida pelo número total de destino (D=191), e representa quantos minutos em média são economizados em uma viagem a partir de cada uma das origens.

Tabela 22: Tempos totais de viagem antes e depois do metrô [minutos]

Origem	2018	2020	Diferença	%	Diferença Média
Bella Vista Station	13.033,59	12.284,55	-749,04	-6%	-3.92
Castle Hill Station	15.041,26	10.898,13	-4143,14	-28%	-21.69
Cherrybrook Station	17.152,84	10.999,36	-6153,48	-36%	-32.22
Hills Showground Station	17.333,72	12.266,54	-5067,18	-29%	-26.53
Kellyville Station	13.742,69	12.150,49	-1.592,2	-12%	-8.34
Norwest Station	15.594,16	12.214,47	-3.379,7	-22%	-17.69
Rouse Hill Station	15.371,37	12.955,56	-2.415,81	-16%	-12.65
Tallawong Station	19.709,04	12.946,79	-6.762,25	-34%	-35.40
Total geral	126.978,68	96.715,88	-30.262,8	-24%	-19.81

O resultado mostrou uma economia média de 20 minutos pra cada viagem a partir desses locais após a implantação do transporte sobre trilhos, chegando a mais de 35 minutos no caso da estação *Tallawong*. Isto representou que, em média, as pessoas nesta região gastaram 40 minutos a menos com seus deslocamentos diários em 2020 do que gastavam quando o ônibus era o único meio de transporte disponível.

3.2.1.5 Sustentabilidade ambiental e socioeconômica

As externalidades adotadas e os métodos e critérios empregados para o seu cálculo se encontram descritos em detalhe no ANEXO A. Um breve resumo da aplicação de cada uma nesse estudo é descrito a seguir:

a. Atraso a pedestres

A primeira externalidade considerada foi o atraso a pedestres, avaliado por meio do valor do tempo de viagem (VTT), um indicador que quantifica, em termos monetários, o valor do tempo gasto dentro do veículo. O valor adotado pelo governo de NSW foi de AU\$16,89 por hora. Também foi incluído na valoração do atraso de pedestres o tempo de espera, avaliado em 1,4 vezes o VTT, ou AU\$23,65 por hora. Pelas características particulares desse estudo

não foram incluídos os valores do tempo de acesso/egresso ou o valor de transferências, pois assume-se a origem a partir da estação, e não se incluiu outros modos de transporte além do ferroviário no modelo. Para o cálculo desse indicador foi necessário antes calcular os fluxos, portanto o resultado será apresentado na seção 3.2.2 Avaliação de cenários futuros.

O *headway* dos trens apresentou uma grande variação entre as estações, pois há vários tipos diferentes de serviços ofertados, como expressos e semi-expressos, além de serviços que se iniciam ou terminam em estações intermediárias. Isto não influenciou no cálculo do tempo total de viagem pela utilização de dados GTFS, porém torna difícil a valorização do tempo de espera. Após análise das tabelas de horários para todas as linhas, verificou-se que para grande parte delas, a maioria das estações eram servidas a cada 15 minutos em média nos horários de pico, com estações principais recebendo mais serviços (menos de 10 minutos de *headway*), e estações menores sendo servidas com menor frequência, a cada 20 minutos aproximadamente. Esse valor também foi condizente com a média geral de tempo de espera no transporte público em Sydney, que era de 13 minutos, segundo dados do Moovit (MOOVIT, 2019). Dessa forma decidiu-se utilizar o valor de 15 minutos como *headway* médio, portanto o tempo de espera médio considerado para as estações que compõem a rede da *Sydney Trains* foi de 7,5 minutos. O metrô, por sua vez, tem um *headway* regular de 4 minutos no horário de pico, o que faz seu tempo de espera médio ser de 2 minutos.

b. Qualidade do ar

O impacto da implantação do transporte sobre trilhos na qualidade do ar está relacionado à diminuição no tráfego de automóveis, e sobretudo de ônibus nas regiões onde ele é implantado. Para quantificar o valor monetário desse impacto, o governo de NSW utiliza a fórmula:

$$\text{Custos de mortalidade} = 0,001 * \text{concentração } \Delta\text{PM10} * \text{população exposta} * \text{taxa de mortalidade normal} * \text{valor da vida} \quad \text{Equação 3.2}$$

Em que: concentração ΔPM10 é a variação da concentração média em micrograma / m³ para o período analisado. A taxa de mortalidade padrão em NSW é de 5,5 / 1.000 (=0,0055), a população considerada foi a de Sydney, variando conforme o ano, e o valor da vida foi igual a AU\$6.369.128 (NSW GOVERNMENT, 2018).

O governo de NSW disponibiliza medições do ar para várias localidades com uma frequência horária. Para avaliar o impacto da redução de cada viagem de trem na qualidade do ar, foi tomado como referência a medição de *Macquarie Park*. Esta é a localização de uma estação de metrô dentre três que eram previamente parte da rede de trens e foram convertidas para a operação metroviária e incorporadas à linha *Metro Northwest*. Para isso, foi necessário fechar o ramal *Epping-Chatswood* durante pouco mais de oito meses, entre setembro de 2018 e maio de 2019. Durante esse período, linhas de ônibus de alta frequência circularam como substituição à linha ferroviária. A Figura 21 mostra a concentração de PM10 para a área de *Macquarie Park* para os meses inteiros em que a estação ficou fechada, entre outubro de 2018 e abril de 2019, e também para o mesmo período um ano antes.

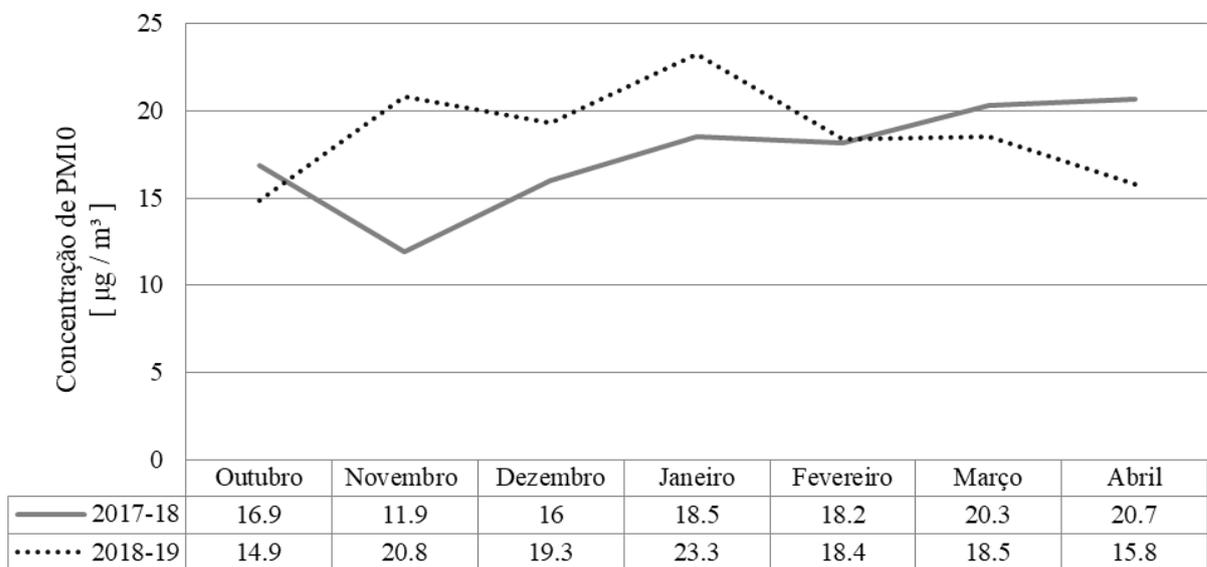


Figura 21: Concentração de PM10 em *Macquarie Park* antes e durante o fechamento do ramal ferroviário *Epping-Chatswood*. Fonte: NSW Government, 2020.

Em 2017-18 a média mensal foi de $17,5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ e em 2018-19 foi de $18,7 \mu\text{g} / \text{m}^3$ no mesmo período, um aumento de $1,2 \mu\text{g} / \text{m}^3$, ou 6,9%. Para se estimar a variação total em Sydney, foi utilizada a média observada em *Macquarie Park*, aplicada ao resto da cidade de acordo com a variação esperada no volume de tráfego.

As três estações no trecho fechado movimentaram uma média de 1.150 passageiros por dia útil em 2018 antes do fechamento. Observa-se, portanto, que o impacto local da variação na concentração de PM10 foi de $1,043 \times 10^{-3} \mu\text{g} / \text{m}^3$ para cada viagem extra por modo rodoviário. Utilizou-se aqui o número de viagens no lugar do número de veículos pois não se tem dados da proporção de passageiros que migraram para diferentes modos durante o

fechamento do ramal ferroviário. Levando em conta a característica local de emissões, foi adotado esse valor como referência para cada estação nos cenários futuros, para os quais também era conhecido o número de movimentações. A variação geral adotada foi portanto a média dos valores obtidos para cada estação, usada no cálculo do indicador custo de mortalidade no capítulo 4 Resultados e Discussão.

3.2.2 Avaliação de cenários futuros

Usando o modelo proposto (SDEM²) foram avaliados comparativamente dois cenários futuros possíveis após a conclusão do sistema de metrô de Sydney, de modo a mensurar o impacto de políticas públicas integradas de planejamento territorial e de transporte:

- 1) Implantação do metrô sem mudanças no uso do solo;
- 2) Implantação do metrô com reconfiguração urbana;

O primeiro cenário considerou apenas as estimativas oficiais de aumento de população e emprego, sem que houvesse outras alterações na distribuição destas características. O segundo cenário incluiu as mudanças propostas para maximizar os potenciais de novas habitações e novos negócios.

Para cada um dos cenários é calculado o modelo de demanda e são avaliados os indicadores da seção 3.2.1 Cálculo dos indicadores do desenvolvimento urbano, de modo a quantificar a interação do transporte como articulador de mudança territorial. A reconfiguração urbana proposta foi baseada no conceito de DOA ao longo dos corredores ferroviários, priorizando a acessibilidade, com a aplicação de DOTS nas áreas ao redor das estações. Para isso, adotou-se densidades e diversidade de uso maiores nas áreas de influência das estações seguindo as tendências de urbanismo compacto. Foi utilizado o ano de 2051 como ano de estudo dos cenários futuros, 35 anos após o censo de 2016. Foi escolhido esse ano após o cálculo da população máxima teórica nas áreas de serviço que equivale à estimativa da população de 2051 pelas projeções oficiais do ABS, possibilitando a comparação direta das demais características urbanas.

Destaca-se que a metodologia proposta atende a todos os critérios listados por Li et al. (2010), ao menos parcialmente, com exceção da maximização do valor da terra e equidade social, que não são abordados diretamente. São, no entanto, afetados indiretamente por outros fatores. O valor da terra não foi inserido no modelo de demanda, porém está diretamente relacionado à renda, que é uma das variáveis explicativas do modelo. A equidade social da maneira

proposta não se enquadrava no escopo desse estudo, porém ela faz parte da política habitacional adotada pelo governo de NSW para novos bairros.

Para cada cenário foram calculados os indicadores previamente estabelecidos, além dos carregamentos esperados e foram indicados os ganhos observados frente à situação atual. Esses incluem os ganhos de tempo coletivos e sua avaliação monetária segundo o critério recomendado pelo governo de NSW para avaliação de projetos.

Para a avaliação dos cenários futuros, primeiramente foi calculada a movimentação diária das estações no cenário 1. Nesse cenário, considerou-se as estimativas oficiais de população e emprego do ABS, aplicados ao modelo SDEM². Destaca-se que as projeções oficiais não seguem uma média geral, isto é, o ABS realiza estimativas com base em políticas anunciadas pelos governos. Dessa forma, elas tentam prever a situação futura, incluindo as zonas que devem sofrer maior adensamento nos próximos anos. O resultado do modelo para esses dados é apresentado na Figura 22.

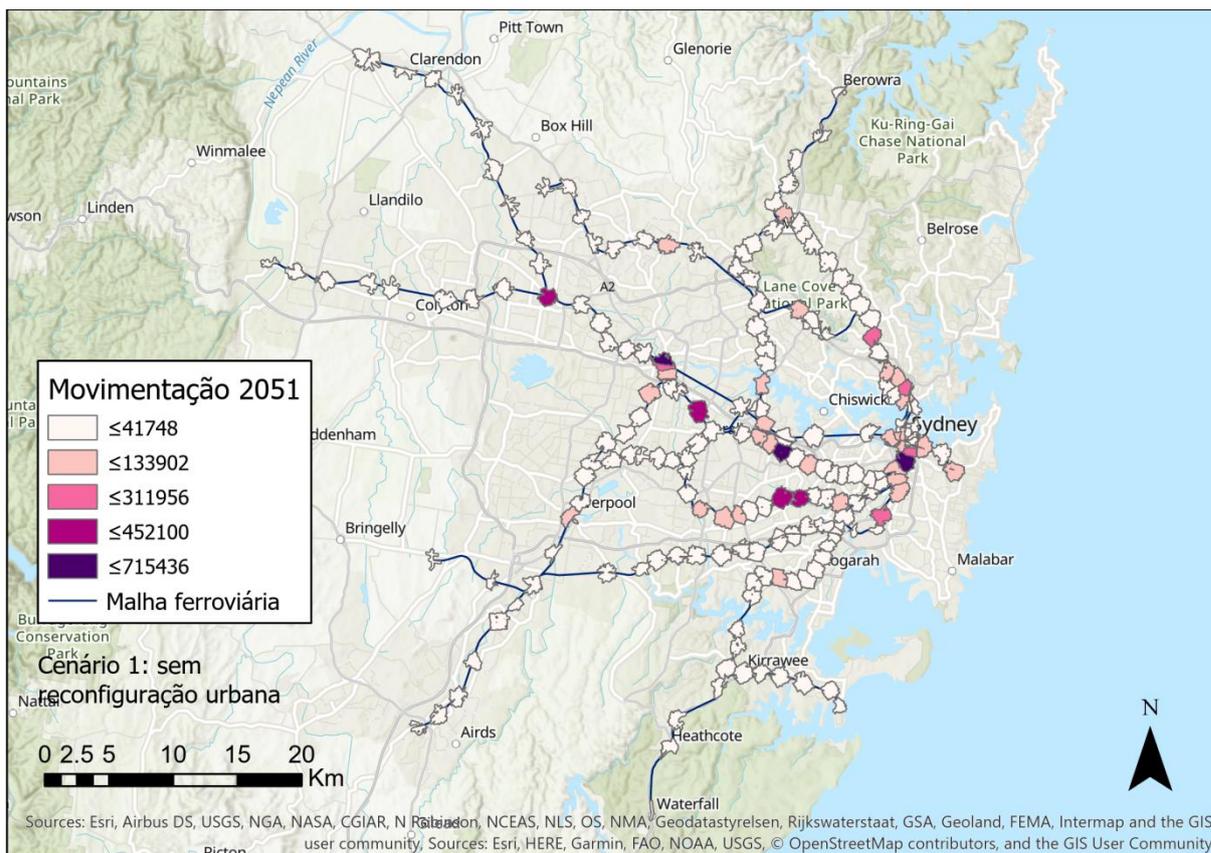


Figura 22: Resultado do modelo SDEM² para o cenário futuro 1

Notou-se um cenário de extrema concentração de demanda em poucas estações, semelhante ao observado em 2016, apenas mostrando maior participação de centralidades secundárias, em

especial *Parramatta Metro* e *Burwood*, ambas com demanda similar a da estação Central, acima de 715 mil passageiros por dia.

Na sequência calculou-se a movimentação diária das estações para o cenário 2, em que se considerou uma reconfiguração urbana, adotando-se as distribuições de população e emprego sugeridas nas seções 3.2.1.1 Potencial de construção de novas habitações, e 3.2.1.2 Potencial de atração de novos negócios e geração de empregos. Ressalta-se que a população total de Sydney foi considerada a mesma nos dois cenários, porém com maior proporção residindo nas proximidades das estações nesse segundo cenário. A Figura 23 apresenta os resultados do cenário futuro 2.

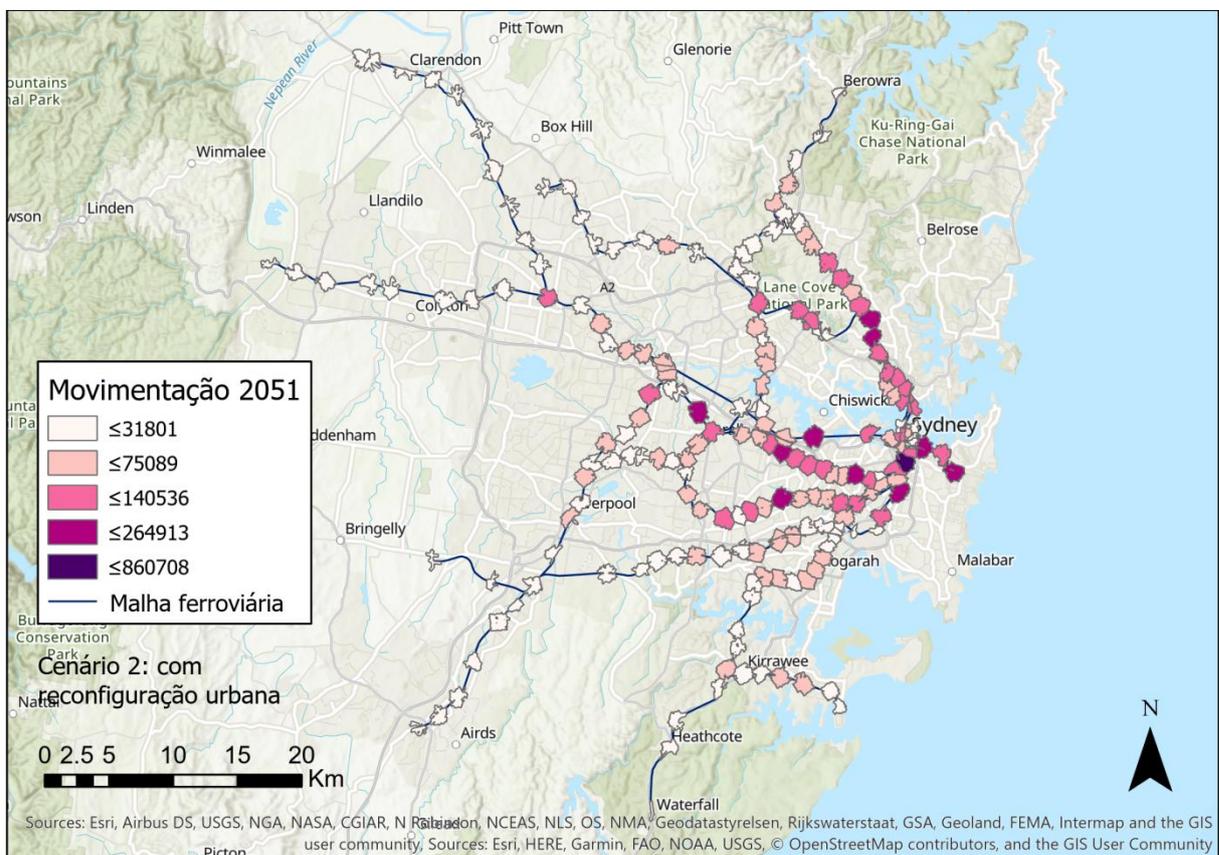


Figura 23: Resultado do modelo SDEM² para o cenário futuro 2

Observou-se claramente o efeito da distribuição populacional mais homogeneizada, com um maior número de estações apresentando demandas intermediárias e altas, e uma quantidade visivelmente menor de estações com baixas demandas. Nesse cenário apenas a estação Central apresentou uma movimentação que pode ser considerada extremamente alta em comparação com as outras, de mais de 860 mil passageiros por dia. Para uma comparação

numérica mais clara, a Tabela 23 apresenta os resumos das movimentações nas estações para os dois cenários futuros analisados.

Tabela 23: Resumo estatístico das movimentações nas estações para os cenários futuros

	Min.	1º Q.	Mediana	Média	3º Q.	Max.
Cenário 1	735	4637	10352	45777	27293	715436
Cenário 2	1494	18309	33308	53372	62323	860708

De modo generalizado, o cenário 2 apresentou maiores movimentações de passageiros em quase todas as estações, com uma distribuição mais equilibrada. Houveram algumas estações que apresentaram movimentação menor que no cenário 1, justamente aquelas onde há maior concentração. A Figura 24 apresenta as diferenças observadas entre os cenários 2 e 1.

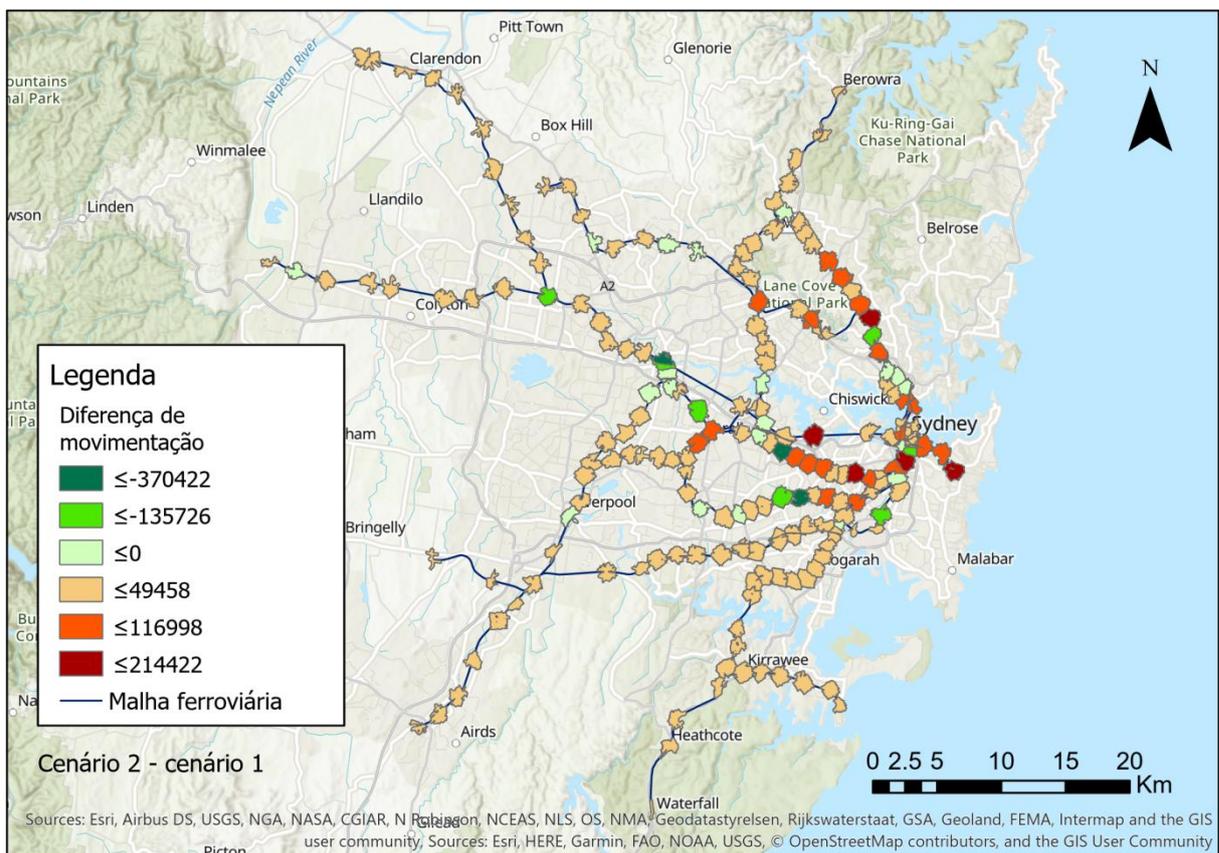


Figura 24: Diferenças de movimentação entre os cenários 2 e 1

Observou-se novamente a concentração existente no cenário 1, pois mesmo com poucos casos de movimentação maior que o cenário 2, as diferenças são as mais extremas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Potencial de construção de novas moradias descrito na seção 3.2.1.1 Potencial de construção de novas habitações, levou em conta as densidades médias observadas em 2016 como referência, porém notou-se que ele subestimou as populações em algumas áreas. Isto mostrou que apesar da preferência australiana por zonas residenciais de baixa densidade, é esperado um substancial aumento na densidade no futuro, para lidar com a crescente demanda por moradia. No entanto, de um modo geral, o cenário 2 prevê uma população total de 4.325.405 pessoas nas áreas de serviço das estações, enquanto que as estatísticas oficiais (cenário 1) preveem 2.539.813 habitantes na mesma área. A diferença observada foi, portanto de 1.785.592 pessoas, 41,3% a menos. Em comparação, em 2016 eram 1.237.581 moradores, logo o cenário 2 prevê um potencial total de 3.087.824 novos habitantes, e o cenário 1 prevê 1.302.232. Proporcionalmente, o cenário 2 teria 55,5% dos habitantes da *Greater Sydney* morando em áreas em até 1.000 m de acesso de estações ferroviárias, enquanto que no cenário 1 esse percentual foi de 32,6%. Em 2016 esse número era de 26,3%. Considerando-se o período de 35 anos, e a inclusão de novas estações das linhas M1 e M2 do metrô em áreas previamente não servidas, a melhoria prevista para o cenário 1 mostrou pouco aumento na participação destas áreas sobre a população geral.

Em termos de densidade, a média de 2016 nas áreas de serviço era de 55,57 hab/ha (a área total das áreas de serviço era de 22.266,81 ha). Com a adição de novas estações a área total chegará a 23.436,82 ha, portanto a densidade em 2051 para o cenário 1 é de 108,37 hab/ha, e no cenário 2 esse valor é de 184,56 hab/ha, respectivamente 232% e 70% maior que 2016 e o cenário 1.

Quanto aos números totais de movimentações diárias (entradas e saídas das estações), em 2016 eram 2.339.120, número que deve chegar a 8.743.334 em 2051 no cenário 1 e 10.193.965 no cenário 2, de acordo com a previsão do modelo SDEM². Proporcionalmente, isso significa um aumento esperado de 273,8% e 335,8% para os cenários 1 e 2, bem acima do crescimento populacional previsto de 65,8%. Previu-se, portanto, que em ambos os cenários o *share* modal do transporte ferroviário apresentaria um expressivo aumento. Esse aumento no cenário 2 foi 62% maior, no entanto.

O segundo indicador foi o potencial de atração de novos negócios. A soma total das vagas de emprego nas áreas de serviço em 2051 projetada pelo ABS foi de 2.607.941 vagas. Comparativamente, esse número esperado para o cenário 2 foi de 3.173.323 vagas, uma diferença de 565.382 vagas. Em relação a 2016, quando o número de empregos era de 1.597.053, os crescimentos previstos foram de 63,3% e 98,7% nos cenários 1 e 2, respectivamente.

Quanto aos indicadores de oportunidade social e *well being*, por estarem relacionados à acessibilidade temporal, foram iguais para os dois cenários analisados pois considerou-se apenas as áreas de serviço. No entanto, se a análise fosse expandida para toda a *Greater Sydney*, a maior acessibilidade proporcionada pelo transporte sobre trilhos estaria aplicada a uma parcela muito maior da população vivendo nas áreas de serviço das estações. Com isso, os níveis médios de acessibilidade temporal da população em geral seriam maiores, o que por sua vez significaria um aumento nos dois indicadores.

Em seguida, foram calculadas as externalidades. Para o cálculo do atraso a pedestres foi considerada a diferença entre os dois cenários como o atraso que poderia ser evitado com uma política de planejamento urbano que priorize a acessibilidade. Inicialmente, de posse das movimentações nas estações, calculadas através do modelo SDEM², e da matriz de custos OD, foi feito o cálculo do fluxo de viagens entre cada par OD nos dois cenários pelo modelo gravitacional, como descrito na seção 3.1.2 Criação de modelo uso do solo x *ridership*. Em seguida, somou-se o tempo total de todas as viagens para cada cenário e subtraiu-se os tempos de espera total (número de viagens total x tempo médio de espera) para se obter o tempo total dentro do veículo para os dois cenários. Por fim, multiplicou-se os dois valores pelos respectivos custos adotados pelo governo de NSW para tempo dentro do veículo e tempo de espera, obtendo assim o valor monetário total diário do atraso a pedestres. Os resultados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Custos do tempo de viagens para os cenários futuros analisados

Cenário	TotV	TVT	TET	TTDV	\$TET	\$TTDV	TOTAL (mi AU\$)
1	4.371.667	92.806.293	21.955.460	70.850.832	8,7	19,9	28,6
2	5.096.982	120.020.768	29.031.793	90.988.974	11,4	25,6	37,1

TotV = n° total de viagens; **TVT**= Tempo de viagem total; **TET**= Tempo de espera total; **TTDV**= Tempo total dentro do veículo; **\$TE**= valor do TET em milhões de \$AU; **\$TTDV**= valor do TTDV em milhões de \$AU.

Valores de tempo apresentados em minutos para as viagens em um período de 24h

Pôde-se obter outras informações interessantes desta tabela, como por exemplo o tempo médio de viagem, que para o cenário 1 foi de 22,2 minutos, e para o cenário 2 foi de 23,5 minutos. Os tempos médios de espera, por sua vez foram 5,0 minutos e 5,7 minutos, respectivamente. Já os tempos médios gasto dentro do veículo foram 16,2 e 17,8 minutos. Dividindo-se o valor de viagem total pelo número de viagens, obteve-se que para o cenário 1 cada viagem teve um “custo de tempo” de AU\$6,54, e para o cenário 2, AU\$7,27, uma diferença de AU\$0,73. Os resultados, apesar de diferentes do esperado, fazem sentido ao se considerar que a maior densidade populacional no cenário 2 em áreas mais distantes, se traduzem em viagens mais longas em média, e também em mais usuários da rede de trens, que tem tempo de espera maior. Deve-se levar em conta, porém que esta análise incluiu apenas as viagens por modo ferroviário, e que na realidade, a média total de todos os usuários tende a ser maior no cenário 1, pois uma maior proporção dos habitantes estaria localizada em áreas não atendidas pelo transporte sobre trilhos. Uma análise mais aprofundada de toda a zona urbana, e a inclusão de outros modos de transporte se faz necessária para se obter um diagnóstico mais preciso a respeito desse indicador. Um aspecto positivo a ser destacado foi a maior quantidade de viagens sobre trilhos, mesmo considerando-se uma população urbana equivalente nos dois cenários. A diferença de viagens do cenário 2 chegou a 725.315 viagens diárias a mais do que no cenário 1, o que representa uma substancial diminuição de viagens por modos rodoviários e se traduz em impactos positivos para a cidade.

Para tentar obter uma aproximação do impacto geral, buscou-se os dados de viagens para toda a região metropolitana. Segundo a pesquisa Origem e Destino realizada pelo governo de NSW, em 2017 as viagens na região da *Greater Sydney* apresentavam a divisão modal apresentada na Tabela 25:

Tabela 25: Divisão modal das viagens na *Greater Sydney* em 2017

Modo	Viagens	% Viagens	Distância Total (km)	% Dist. Total	Distância Média (km)
Outro	347.279	1.8%	2.470.696	1.6%	7.1
Ônibus	993.017	5.2%	71.80.645	4.8%	7.2
Trem	1.189.876	6.3%	20.136.920	13.4%	16.9
Automóvel (Motorista)	9.130.239	48.1%	85.925.315	57.2%	9.4
Automóvel (Passageiro)	4.026.167	21.2%	31.862.626	21.2%	7.9
A pé	3.295.469	17.4%	2.626.211	1.7%	0.8
Total	18.982.047	100%	150.202.413	100.0%	8,22

Fonte: Household Travel Survey 2007/08 – 2017/18. NSW Government.

Considerando-se que os níveis de viagens por habitante permanecerão razoavelmente constantes ao longo do tempo, isto é, as pessoas não vão realizar um número maior ou menor de viagens por dia em média, é possível afirmar que o número de viagens totais em 2051 deve crescer 65,8%, assim como a população, chegando a 31.472.234 por dia. Se a proporção de viagens a pé permanecer inalterada, pode-se subtrair 17,4% desse valor, chegando a um total de 25.996.065 viagens motorizadas. O número de viagens por modo ferroviário calculado no cenário 1 foi de 4.371.667, o que responderia a 13,9% do total em 2051. Para o cenário 2, esses valores seriam 5.096.982 e 16,2% respectivamente. Se forem subtraídas as viagens de trem do total de viagens motorizadas, o resultado será de 21.624.398 viagens por outros modos motorizados no cenário 1, e 20.899.083 no cenário 2.

As viagens motorizadas, excetuando-se o trem, apresentaram uma distância média de 7,9 km em Sydney, e a velocidade média de viagem no pico da manhã foi de 37,9 km/h nas principais rotas (NSW BUREAU OF TRANSPORT STATISTICS, 2016). Com isso, o tempo médio das viagens rodoviárias foi de 12,5 minutos. Há de se notar, no entanto, que sem a premissa de adensamento do cenário 2, o espraiamento urbano tende a continuar, aumentando as distâncias médias de viagem. Levando isso em consideração, foi adotado um valor 20% maior no tempo de viagem do cenário 1, fixado em 15 minutos. Multiplicando-se esses tempos pelo número de viagens, obteve-se 324.365.970 minutos no cenário 1 e 261.238.537 minutos no cenário 2. Esses números multiplicados pelo valor do tempo de viagem de AU\$16,89/hora, resultam em um total de AU\$91,3 milhões para o cenário 1 e AU\$73,5 milhões para o cenário 2. Além disso, considerou-se o tempo de espera do ônibus e outros modais, cujo *headway* é em média 20 a 30 minutos. Adotando-se o número conservador (20 min), o tempo médio de espera foi de 10 minutos. Considerando-se a manutenção do *share* desses modos igual a 7% do total em ambos os cenários, obteve-se 2.203.056 viagens diárias por ônibus e outros modos. Isso significou um total de 22.030.560 minutos de espera, avaliados em AU\$8,7 milhões (AU\$23,65/hora).

Considerando-se, portanto os valores totais de tempo de atraso têm-se:

- Cenário 1: $28,6 + 91,3 + 8,7 = \text{AU}\$128,6$ milhões.
- Cenário 2: $37,1 + 73,5 + 8,7 = \text{AU}\$119,3$ milhões.

Observou-se que ao se considerar toda a região, o cenário 2 passou a apresentar um ganho de 9,3 milhões de dólares diários sobre o cenário 1 nesse indicador. Entendeu-se que para uma mensuração mais precisa ser necessário aplicar modelos para todos os modos, o que

aumentaria o escopo das análises desse estudo em muitas vezes, tornando-se inviável. No entanto, como uma estimativa e um indicador geral, percebe-se que é bastante plausível que o cenário de maior adensamento e menor espraiamento urbano apresente ganhos de tempo, pelo seu urbanismo de natureza mais compacta.

Calculou-se então a externalidade qualidade do ar, por meio do indicador de custo de mortalidade. Considerou-se a diferença encontrada no número de viagens entre os cenários 1 e 2 como a variação de viagens realizadas por meio rodoviário, que aumentavam a concentração de PM10. Adotando-se o critério apresentado no item 3.2.1.5 Sustentabilidade ambiental e socioeconômica, tomou-se a diferença de movimentação de cada estação nos dois cenários e multiplicou-se esse valor por $1,043 \times 10^{-3}$, encontrando a variação para cada estação, e em seguida calculou-se a média dos resultados, obtendo-se a variação geral esperada da concentração de PM10 em Sydney, igual a 7,92 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ adicionais. A população exposta em 2051 deverá chegar a 7,8 milhões, e considera-se a taxa de mortalidade e o valor da vida descritos no manual, iguais a 0,0055 e AU\$6.369.128, respectivamente.

Dessa forma, o custo de mortalidade, em valores de 2018, foi igual a:

- $0,001 * 7,92 * 7.800.000 * 0,0055 * 6.369.128 = \text{AU}\$2.164.025.882,30$

Ou seja, de acordo com os critérios oficiais usados para a apreciação de projetos, apenas esta externalidade causaria um impacto estimado em mais de dois bilhões de dólares australianos em 2051, na hipótese do cenário 1 se tornar realidade em detrimento do cenário 2. A taxa de mortalidade seria de 339,8 mortes naquele ano, devido ao impacto da poluição do ar. Esses são certamente valores muito significativos, e acrescidos das demais externalidades não mensuradas nesse estudo, demonstram o poder do impacto da adoção de uma política pública voltada para o urbanismo compacto e a priorização da acessibilidade sobre a mobilidade. Como exemplo cita-se o *business case* do metrô de Sydney para a linha *City and Southwest* que aponta para um benefício total entre AU\$1,47 a AU\$1,60 para cada AU\$1 gasto (TRANSPORT FOR NSW, 2016b).

Os resultados apontaram, de modo geral, para uma melhoria dos indicadores no cenário 2, quando comparado aos resultados alcançados no cenário 1. Observou-se uma melhoria substancial devido ao maior potencial de construção de novas moradias e ao potencial de atração de novos negócios, além de claros indícios de aumento geral nas oportunidades sociais e no *well being* da população, considerando o efeito que a inauguração do primeiro trecho do

metrô teve sobre as populações diretamente afetadas. Já a sustentabilidade ambiental, no entanto, apresentou resultados que devem ser analisados com maior cuidado. Foi observada uma grande vantagem econômica e ambiental no indicador de qualidade do ar para o cenário 2, com um impacto positivo total de mais de 2 bilhões de dólares australianos na comparação com o cenário 1, e uma taxa de mortalidade de quase 340 menos mortes devido à poluição em 2051. No entanto, os resultados do indicador de tempo de atraso a pedestres foram inconclusivos, pois mudam de acordo com a área de estudo, mostrando um resultado marginalmente melhor para o cenário 1 ao se comparar apenas as áreas de serviço e as viagens por modo ferroviário. Atestou-se que é necessário um escopo de análise maior que inclua toda a área da *Greater Sydney* e que considere todos os modos de transporte para se calcular com maior precisão as diferenças entre os cenários. Realizou-se então uma estimativa utilizando os resultados gerais da pesquisa O-D, que sob premissas conservadoras, demonstrou uma leve vantagem para o cenário 2. Para uma análise mais aprofundada mostrou-se necessária a aplicação de modelos de demanda para toda a região e para todos os modos de viagem disponíveis.

Ficou evidente, porém, a capacidade de transformação que políticas de planejamento urbano e de transporte bem coordenadas têm sobre aspectos essenciais da vida da população. O nível de viagens necessário de modo a garantir o deslocamento eficiente da população em rápido crescimento não seria possível unicamente por meio de modos de transporte de baixa e média capacidade como ônibus e BRT, uma vez que resultados do modelo para o cenário 2 apontam para mais de 5 milhões de viagens de trem e metrô por dia em Sydney em 2051, ano em que a população deve alcançar 7,8 milhões de habitantes. Além disso, o tempo médio de viagem aliado às longas distâncias gerariam grandes perdas de eficiência, que impactariam fortemente os indicadores.

As diferenças nos resultados para os dois cenários, por sua vez, demonstraram a interdependência existente entre o transporte sobre trilhos e as características urbanas. A organização espacial impacta diretamente na demanda, e a existência da infraestrutura de transporte sobre trilhos se mostrou essencial para o bom funcionamento da cidade. As perdas de eficiência e aumento de externalidades indesejadas tornam inviáveis as outras duas únicas alternativas para o aumento populacional esperado, que seriam a constante expansão urbana em direção às periferias ou o adensamento de áreas não servidas por um meio de transporte adequado.

Apesar das evidências fortes a favor do cenário 2, o problema apresenta também uma dimensão cultural e política que não pode ser desconsiderada: se por um lado observa-se benefícios em escala regional do adensamento e uso compacto da terra, por outro lado há impactos locais negativos como aumento no tráfego local, saturação de equipamentos e serviços públicos, e pressão sobre a infraestrutura que nem sempre são viáveis de se adequar para o aumento populacional estimado. Há também a intangível preferência da população australiana por residências unifamiliares e o custo político que leva os governos locais a se oporem a medidas de adensamento, criando barreiras para um planejamento regional integrado. Por estas razões muitas vezes projetos dessa natureza são abandonados, e adota-se em seu lugar projetos pontuais, como vem ocorrendo em Sydney. Tais projetos são benéficiais, porém as estimativas futuras apontam para um cenário onde será necessário avaliar os problemas em escala regional e criar soluções inteligentes para tais problemas, sob risco de uma piora substancial na qualidade de vida da população se nada for feito. É impossível ignorar os efeitos que o atual padrão de urbanismo apresenta sobre todos os indicadores avaliados, frente à real possibilidade de mudá-los com medidas bem direcionadas, como mostraram os resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo se propôs a analisar a interdependência entre o transporte ferroviário urbano e os padrões de urbanismo e seu efeito na viabilização de projetos de transporte de alta capacidade a longo prazo. Foi apresentada uma metodologia para a quantificação do potencial de uso do solo urbano a partir do investimento em transporte urbano sobre trilhos, que pode ser aplicada a outros locais. A metodologia proposta não apenas analisa a demanda baseada em condições urbanas existentes, que é o comumente observado no planejamento de transporte, mas incorpora as interações entre transporte e meio urbano na análise.

Acredita-se que o objetivo geral do trabalho foi alcançado, uma vez que os números apontam claramente os efeitos do padrão de ocupação na demanda de transporte, e a necessidade dessa infraestrutura de transporte para suprir a demanda e promover melhor qualidade de vida. A parcela maior da população vivendo nos arredores das estações se traduziu em um número de passageiros no transporte ferroviário cerca de 70% maior em comparação ao cenário sem densificação nessas áreas. O *share* do transporte ferroviário em relação aos outros modos de transporte também aumentou 62% nesse cenário, assim como um substancial aumento no acesso a empregos nessas áreas.

Além disso, atendeu-se a hipótese secundária ao se demonstrar que mesmo adotando uma densidade média que não ultrapasse o que já é observado atualmente em Sydney, é possível suprir a demanda por moradia a longo prazo, adensando-se apenas as áreas ao redor das estações, e dessa forma conter o espraiamento urbano. Observou-se também uma melhoria de mais de 100% no número de equipamentos de saúde, educação e desportivos a qual a população residente nas áreas de serviço do metrô de Sydney tem acesso, comparado ao período antes da sua inauguração.

Os ganhos monetários totais para todo o período considerado (2016-2051) não foram calculados, pois necessitam de dados não disponíveis e muitas suposições a respeito de diversas externalidades, o que tornaria o valor encontrado apenas uma estimativa aproximada, na melhor das hipóteses. No entanto, os ganhos observados em todos os indicadores avaliados, e o valor do custo de mortalidade pela qualidade do ar apontaram para uma grande vantagem econômica advinda da implantação dos modos ferroviários, da ordem de mais de 2 bilhões de dólares apenas em custos de mortalidade evitados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Dentre as limitações desse estudo está um cálculo mais aprofundado de um maior número de externalidades, necessário para se responder com exatidão a segunda hipótese secundária, de que os ganhos coletivos de acessibilidade e a redução das externalidades negativas compensam os custos de construção e operação no longo prazo. Além disso, mostrou-se necessário uma ampliação do escopo do estudo, com a inclusão de áreas não atendidas pelo transporte sobre trilhos e dos demais modos de transporte.

Com essas duas adições seria possível realizar uma análise mais robusta das vantagens ou desvantagens econômicas da implantação de novas linhas ferroviárias e da adoção de políticas urbanas voltadas à cidade compacta e ao desenvolvimento orientado à acessibilidade. No entanto, o volume de análises seria proporcionalmente maior ao número de modos considerados, tornando-se incompatível com a proposta desse estudo.

REFERÊNCIAS

ANAS, Alex; LINDSEY, Robin. Reducing urban road transportation externalities: Road pricing in theory and in practice. *Review of Environmental Economics and Policy*, v. 5, n. 1, p. 66–88, 2011.

ANSELIN, Luc *et al.* Simple diagnostic tests for spatial dependence. *Regional Science and Urban Economics*, v. 26, n. 1, p. 77–104, 1996.

AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS. *Greater Sydney*. Disponível em: <https://quickstats.censusdata.abs.gov.au/census_services/getproduct/census/2016/quickstat/1GSYD?opendocument>. Acesso em: 13 ago. 2019.

AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS. *New South Wales*. Disponível em: <[https://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/Latestproducts/3222.0Main Features62017 \(base\) - 2066?opendocument&tabname=Summary&prodno=3222.0&issue=2017 \(base\) - 2066&num=&view=>](https://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/Latestproducts/3222.0MainFeatures62017(base)-2066?opendocument&tabname=Summary&prodno=3222.0&issue=2017(base)-2066&num=&view=>)>.

BATHMANABHAN, Srimuruganandam; SARAGUR MADANAYAK, Shiva Nagendra. Analysis and interpretation of particulate matter - PM10, PM2.5 and PM1 emissions from the heterogeneous traffic near an urban roadway. *Atmospheric Pollution Research*, v. 1, n. 3, p. 184–194, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5094/APR.2010.024>>.

BECKER, Udo J; BECKER, Thilo; GERLACH, Julia. *The True Costs of Automobility: External Costs of Cars Overview on existing estimates in EU-27*. . [S.l: s.n.], 2012. Disponível em: <https://stopclimatechange.net/fileadmin/content/documents/move-green/The_true_costs_of_cars_EN.pdf>.

BOISJOLY, Geneviève *et al.* Invest in the ride: A 14 year longitudinal analysis of the determinants of public transport ridership in 25 North American cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 116, p. 434–445, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.07.005>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

BOISJOLY, Geneviève; EL-GENEIDY, Ahmed M. How to get there? A critical assessment of accessibility objectives and indicators in metropolitan transportation plans. *Transport Policy*, v. 55, p. 38–50, 1 abr. 2017a. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0967070X1630436X>>. Acesso

em: 15 ago. 2018.

BOISJOLY, Geneviève; EL-GENEIDY, Ahmed M. The insider: A planners' perspective on accessibility. *Journal of Transport Geography*, v. 64, p. 33–43, 1 out. 2017b. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0966692316304240>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

BOISJOLY, Geneviève; MORENO-MONROY, Ana Isabel; EL-GENEIDY, Ahmed. Informality and accessibility to jobs by public transit: Evidence from the São Paulo Metropolitan Region. *Journal of Transport Geography*, v. 64, p. 89–96, 1 out. 2017.

BORREGO, C. *et al.* Urban scale air quality modelling using detailed traffic emissions estimates. *Atmospheric Environment*, v. 131, p. 341–351, 2016.

BOTHE, Kristian; HANSEN, Høgni Kalsø; WINTHER, Lars. Spatial restructuring and uneven intra-urban employment growth in metro- and non-metro-served areas in Copenhagen. *Journal of Transport Geography*, v. 70, p. 21–30, 1 jun. 2018. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0966692317305410>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

BURNHAM, Kenneth P.; ANDERSON, David R. Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods and Research*, v. 33, n. 2, p. 261–304, 2004.

CALTHORPE, Peter. The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream. *Princeton Architectural Press*, 1993.

CAO, Xinyu; MOKHTARIAN, Patricia L.; HANDY, Susan L. Examining the impacts of residential self-selection on travel behaviour: A focus on empirical findings. *Transport Reviews*, v. 29, n. 3, p. 359–395, 2009.

CARRUTHERS, John I. The impacts of state growth management programmes: A comparative analysis. *Urban Studies*, v. 39, n. 11, p. 1959–1982, 2002.

CERVERO, R.; KOCKELMAN, K. Travel Ridership and the 3Ds: Density, Diversity and Design. *Transportation Research D*, v. 2, n. 3, p. 199–219, 1997.

CERVERO, Robert. Public Transport and Sustainable Urbanism: Global Lessons. *University of California Transportation Center*, p. 1–10, 2006. Disponível em: <<https://cloudfront.escholarship.org/dist/prd/content/qt4fp6x44f/qt4fp6x44f.pdf?t=lc5ll0>>.

Acesso em: 31 ago. 2018.

CERVERO, Robert. Sustainable new towns. Stockholm's rail-served satellites. *Cities*, v. 12, n. 1, p. 41–51, 1995.

CERVERO, Robert. Transit-oriented development's ridership bonus: A product of self-selection and public policies. *Environment and Planning A*, v. 39, n. 9, p. 2068–2085, 2007.

CHNG, Samuel *et al.* Commuting and wellbeing in London: The roles of commute mode and local public transport connectivity. *Preventive Medicine*, v. 88, p. 182–188, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ypmed.2016.04.014>>.

CHUN, Yongwan; KIM, Hyun; KIM, Changjoo. Modeling interregional commodity flows with incorporating network autocorrelation in spatial interaction models: An application of the US interstate commodity flows. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 36, n. 6, p. 583–591, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.04.002>>.

CITY OF SYDNEY. *Green Square*. Disponível em: <<https://www.cityofsydney.nsw.gov.au/vision/green-square>>. Acesso em: 1 fev. 2020.

COX, Dianne *et al.* Developing and using local community wellbeing indicators: Learning from the experience of Community Indicators Victoria. *Australian Journal of Social Issues*, v. 45, n. 1, p. 71–88, 2010.

CRUCITTI, Paolo; LATORA, Vito; PORTA, Sergio. Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, v. 73, n. 3, p. 1–4, 2006.

DALE, Simon *et al.* Evaluating the impact of a workplace parking levy on local traffic congestion: The case of Nottingham UK. *Transport Policy*, v. 59, n. September 2016, p. 153–164, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.07.015>>.

DANIELS, Rhonda; MULLEY, Corinne. Explaining walking distance to public transport: The dominance of public transport supply. *Journal of Transport and Land Use*, v. 6, n. 2, p. 5–20, 2013.

DE OÑA, Juan *et al.* An ordered regression model to predict transit passengers' behavioural intentions. *Case Studies on Transport Policy*, v. 6, n. 4, p. 449–455, 19 maio 2018. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2213624X17301372>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

DEBOOSERE, Robbin; EL-GENEIDY, Ahmed M.; LEVINSON, David. Accessibility-oriented development. *Journal of Transport Geography*, v. 70, p. 11–20, 1 jun. 2018. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0966692317307056>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

DEBREZION, Ghebreegziabihir; PELS, Eric; RIETVELD, Piet. The impact of railway stations on residential and commercial property value: A meta-analysis. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, v. 35, n. 2, p. 161–180, 2007.

DOBES, Leo; LEUNG, Joanne. Wider Economic Impacts in Transport Infrastructure Cost-Benefit Analysis – A Bridge Too Far? *Agenda - A Journal of Policy Analysis and Reform*, v. 22, n. 1, 2015.

EWING, Reid *et al.* Varying influences of the built environment on household travel in 15 diverse regions of the United States. *Urban Studies*, v. 52, n. 13, p. 2330–2348, 5 out. 2015. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0042098014560991>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

EWING, Reid; CERVERO, Robert. “Does Compact Development Make People Drive Less?” The Answer Is Yes. *Journal of the American Planning Association*, v. 83, n. 1, p. 19–25, 2 jan. 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01944363.2016.1245112>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

EWING, Reid; CERVERO, Robert. Travel and the Built Environment. *Journal of the American Planning Association*, v. 76, n. 3, p. 265–294, 21 jun. 2010. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01944361003766766>>. Acesso em: 1 set. 2018.

EWING, Reid; CERVERO, Robert. Travel and the Built Environment A Synthesis.

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1780, n. 01, p. 87–113, 2001.

EWING, Reid; HAMIDI, Shima. Compactness versus Sprawl. *Journal of Planning Literature*, v. 30, n. 4, p. 413–432, 22 nov. 2015. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0885412215595439>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

FERM, Martin; SJÖBERG, Karin. Concentrations and emission factors for PM_{2.5} and PM₁₀ from road traffic in Sweden. *Atmospheric Environment*, v. 119, p. 211–219, 2015.

FLOCH, JEAN-MICHEL; LE SAOUT, RONAN. Spatial econometrics - common models. *HANDBOOK OF SPATIAL ANALYSIS: Theory and practical application with R*, p. 149–177, 2018.

GIL SOLÁ, Ana; VILHELMSON, Bertil; LARSSON, Anders. Understanding sustainable accessibility in urban planning: Themes of consensus, themes of tension. *Journal of Transport Geography*, v. 70, p. 1–10, 1 jun. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0966692317300303>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

GOLGHER, André Braz; VOSS, Paul R. *How to Interpret the Coefficients of Spatial Models: Spillovers, Direct and Indirect Effects*. [S.l.: s.n.], 2016. v. 4.

GORDON, Peter; LEE, Bumsoo. Spatial structure and travel: Trends in commuting and non-commuting travels in US metropolitan areas. *Handbook on Transport and Development*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 87–103.

GÖSSLING, Stefan; CHOI, Andy S. Transport transitions in Copenhagen: Comparing the cost of cars and bicycles. *Ecological Economics*, v. 113, p. 106–113, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.03.006>>.

GREATER SYDNEY COMMISSION. *Who we are*. Disponível em: <<https://www.greater.sydney/who-we-are>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

GUZMAN, Luis A.; OVIEDO, Daniel; RIVERA, Carlos. Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region. *Journal of Transport Geography*, v. 58, p. 236–246, 1 jan. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0966692316302149>>. Acesso

em: 15 ago. 2018.

HA, Jaehyun; LEE, Sugie; KWON, Sung Moon. Revisiting the Relationship between Urban Form and Excess Commuting in US Metropolitan Areas. *Journal of Planning Education and Research*, 24 jul. 2018, p. 1–18. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0739456X18787886>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

JANDACKA, Dusan; DURCANSKA, Daniela; BUJDOS, Marek. The contribution of road traffic to particulate matter and metals in air pollution in the vicinity of an urban road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 50, n. 137, p. 397–408, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.024>>.

KAMRUZZAMAN, Md *et al.* Advance transit oriented development typology: Case study in brisbane, australia. *Journal of Transport Geography*, v. 34, p. 54–70, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.11.002>>.

KERKMAN, Kasper; MARTENS, Karel; MEURS, Henk. A multilevel spatial interaction model of transit flows incorporating spatial and network autocorrelation. *Journal of Transport Geography*, v. 60, p. 155–166, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.02.016>>.

KERKMAN, Kasper; MARTENS, Karel; MEURS, Henk. Predicting travel flows with spatially explicit aggregate models: On the benefits of including spatial dependence in travel demand modeling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 118, n. October 2017, p. 68–88, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.08.029>>.

KIEU, Le Minh. Analytical Modelling of Point Process and Application to Transportation. In: ZHOU, J.; CHEN, F. (Org.). . [S.l.]: Springer International Publishing, 2018. p. 385–408. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-90403-0_19>. Acesso em: 15 ago. 2018.

KOPCZEWSKA, K.; KUDŁA, J.; WALCZYK, K. Strategy of Spatial Panel Estimation: Spatial Spillovers Between Taxation and Economic Growth. *Applied Spatial Analysis and Policy*, v. 10, n. 1, p. 77–102, 2017.

LAIRD, James J.; VENABLES, Anthony J. Transport investment and economic performance: A framework for project appraisal. *Transport Policy*, v. 56, n. February, p. 1–11, 2017.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.02.006>>.

LEE, Jinhung; MILLER, Harvey J. Measuring the impacts of new public transit services on space-time accessibility: An analysis of transit system redesign and new bus rapid transit in Columbus, Ohio, USA. *Applied Geography*, v. 93, p. 47–63, 2018.

LESAGE, James P.; PACE, R. Kelley. Spatial econometric modeling of origin-destination flows. *Journal of Regional Science*, v. 48, n. 5, p. 941–967, 2008.

LI, Yan *et al.* Transit-oriented land planning model considering sustainability of mass rail transit. *Journal of Urban Planning and Development*, v. 136, n. 3, p. 243–248, 2010.

MANOUT, Ouassim; BONNEL, Patrick; BOUZOUINA, Louafi. Transit accessibility: A new definition of transit connectors. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 113, p. 88–100, 2018.

MARCIŃCZAK, Szymon; BARTOSIEWICZ, Bartosz. Commuting patterns and urban form: Evidence from Poland. *Journal of Transport Geography*, v. 70, p. 31–39, 1 jun. 2018. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0966692318300152>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

MERLIN, Louis A.; LEVINE, Jonathan; GRENGS, Joe. Accessibility analysis for transportation projects and plans. *Transport Policy*, v. 69, p. 35–48, 1 out. 2018. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0967070X17300239>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

METZ, David. Tackling urban traffic congestion: The experience of London, Stockholm and Singapore. *Case Studies on Transport Policy*, 15 jun. 2018. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2213624X17302912>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

MILLER, Eric J. Accessibility: measurement and application in transportation planning. *Transport Reviews*, v. 38, n. 5, p. 551–555, 3 set. 2018.

MO, Bin Owen. Mapping potential metro rail ridership in Los Angeles county. *Cartographic Perspectives*, n. 72, p. 5–25, 2012.

MOOVIT. *Facts and usage statistics about public transport in Sydney, Australia*. Disponível em: <https://moovitapp.com/insights/en-gb/Moovit_Insights_Public_Transport_Index-442>. Acesso em: 16 nov. 2019.

NERIDA CONISBEE. *Property Outlook - Australian Property Market Report*. . [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <<https://www.realestate.com.au/australian-property-market/pdf/australian-property-market-report-january-2019.pdf>>.

NEWMAN, Peter. *Transit Oriented Development: An Australian Overview*. 2009. Disponível em: <<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=727239401&Fmt=7&clientId=3505&RQT=309&VName=PQD>>.

NILSSON, Isabelle; DELMELLE, Elizabeth. Transit investments and neighborhood change: On the likelihood of change. *Journal of Transport Geography*, v. 66, p. 167–179, 1 jan. 2018. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S096669231730354X>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

NOCERA, Silvio; GALATI, Olga Irranca; CAVALLARO, Federico. On the uncertainty in the economic valuation of carbon emissions from transport. *Journal of Transport Economics and Policy*, v. 52, n. 1, p. 68–94, 2018.

NORDBAKKE, Susanne; SCHWANEN, Tim. Transport, unmet activity needs and wellbeing in later life: exploring the links. *Transportation*, v. 42, n. 6, p. 1129–1151, 2015.

NSW BUREAU OF TRANSPORT STATISTICS. *NSW and Sydney Transport Facts*. . [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <[https://www.transport.nsw.gov.au/sites/default/files/media/documents/2017/NSW and Sydney Transport Facts 2016.pdf](https://www.transport.nsw.gov.au/sites/default/files/media/documents/2017/NSW_and_Sydney_Transport_Facts_2016.pdf)>.

NSW GOVERNMENT. *NSW Spatial Catalogue*. Disponível em: <<https://sdi.nsw.gov.au/nswsdi/catalog/main/home.page>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

NSW GOVERNMENT. Principles and Guidelines for Economic Appraisal of Transport Investment and Initiatives. n. March, p. 354, 2018. Disponível em: <<https://www.transport.nsw.gov.au/sites/default/files/media/documents/2017/principles-and->

guidelines-for-economic-appraisal-of-transport-investment.pdf>.

PAPAS, Mia A. *et al.* The built environment and obesity. *Epidemiologic Reviews*, v. 29, n. 1, p. 129–143, 2007.

PÉREZ, Noemí *et al.* Variability of particle number, black carbon, and PM10, PM 2.5, and PM1 Levels and Speciation: Influence of road traffic emissions on urban air quality. *Aerosol Science and Technology*, v. 44, n. 7, p. 487–499, 2010.

PERVEEN, S. *et al.* Evaluating transport externalities of urban growth: a critical review of scenario-based planning methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 14, n. 3, p. 663–678, 8 mar. 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13762-016-1144-7>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

PIO, C. *et al.* Source apportionment of PM2.5 and PM10 by Ionic and Mass Balance (IMB) in a traffic-influenced urban atmosphere, in Portugal. *Atmospheric Environment*, n. April, p. 117217, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117217>>.

PORTA, Sergio *et al.* Street centrality and densities of retail and services in Bologna, Italy. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 36, n. 3, p. 450–465, 2009.

REINSW. *Vacancy Rate Survey Results*. . [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <[file:///C:/Users/rapha/Downloads/REINSW Vacancy Rate Result July 2019 V1.0.pdf](file:///C:/Users/rapha/Downloads/REINSW%20Vacancy%20Rate%20Result%20July%202019%20V1.0.pdf)>.

RIZZI, Luis Ignacio; DE LA MAZA, Cristobal. The external costs of private versus public road transport in the Metropolitan Area of Santiago, Chile. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 98, p. 123–140, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2017.02.002>>.

RODIER, Caroline. Review of international modeling literature: Transit, land use, and auto pricing strategies to reduce vehicle miles traveled and greenhouse gas emissions. *Transportation Research Record*, n. 2132, p. 1–12, 2009.

SAHU, Akshay. A methodology to modify land uses in a transit oriented development scenario. *Journal of Environmental Management*, v. 213, p. 467–477, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.004>>.

SALAT, Serge; OLLIVIER, Gerald. *Transforming the Urban Space through Transit-Oriented*

Development. [S.l: s.n.], 2017.

SHEN, Yu; DE ABREU E SILVA, João; MARTÍNEZ, Luis Miguel. Assessing High-Speed Rail's impacts on land cover change in large urban areas based on spatial mixed logit methods: A case study of Madrid Atocha railway station from 1990 to 2006. *Journal of Transport Geography*, v. 41, p. 184–196, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.09.007>>.

SOHN, Keemin; SHIM, Hyunjin. Factors generating boardings at Metro stations in the Seoul metropolitan area. *Cities*, v. 27, n. 5, p. 358–368, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2010.05.001>>.

SPARKS, Corey S. *Spatial Regression Models*. Disponível em: <https://rpubs.com/corey_sparks/109650>. Acesso em: 31 jan. 2020.

STARICCO, Luca; VITALE BROVARONE, Elisabetta. Promoting TOD through regional planning. A comparative analysis of two European approaches. *Journal of Transport Geography*, v. 66, p. 45–52, 1 jan. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S096669231730296X>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

STEVENSON, Mark *et al.* Land use, transport, and population health: estimating the health benefits of compact cities. *The Lancet*, v. 388, n. 10062, p. 2925–2935, 2016.

TIMILSINA, Govinda R.; DULAL, Hari B. Urban road transportation externalities: Costs and choice of policy instruments. *World Bank Research Observer*, v. 26, n. 1, p. 162–191, 2011.

TRANSDEV. *Sydney Light Rail*. Disponível em: <<https://www.transdevsydney.com.au/>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

TRANSPORT FOR NSW. *2016 Travel Zone Projections Employment in the Sydney Greater Metropolitan Area Technical Guide*. . Sydney: [s.n.], 2016a.

TRANSPORT FOR NSW. *Annual Report Sydney Trains 2017-18*. . Sydney: [s.n.], 2018. Disponível em: <[https://www.transport.nsw.gov.au/system/files/media/documents/2018/Sydney Trains Annual Report 2017-18.pdf](https://www.transport.nsw.gov.au/system/files/media/documents/2018/Sydney%20Trains%20Annual%20Report%202017-18.pdf)>.

TRANSPORT FOR NSW. *Final Business Case October 2016*. . [S.l: s.n.], 2016b. Disponível em: <<https://www.sydneymetro.info/sites/default/files/Sydney Metro CSW Business Case Summary.pdf>>.

TRANSPORT FOR NSW. *Sydney Metro*. Disponível em: <<http://sydneymetro.info/home>>. Acesso em: 13 ago. 2019a.

TRANSPORT FOR NSW. *Sydney Trains Performance Reports*. Disponível em: <<https://www.transport.nsw.gov.au/data-and-research/passenger-travel/sydney-trains-and-nsw-trainlink-intercity-performance-reports>>. Acesso em: 13 ago. 2019b.

TRANSPORT FOR NSW. *Transport for NSW - 2014-15 annual report*. . [S.l: s.n.], 2015. Disponível em: <http://www.transport.nsw.gov.au/sites/default/files/b2b/publications/annual_reports/tfnsw-annual-report-2014-15-volume-1.pdf>.

TU, Wei *et al.* Spatial variations in urban public ridership derived from GPS trajectories and smart card data. *Journal of Transport Geography*, v. 69, p. 45–57, 1 maio 2018. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez27.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0966692317304155>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

WANG, Fahui *et al.* Location analysis of retail stores in Changchun, China: A street centrality perspective. *Cities*, v. 41, n. PA, p. 54–63, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2014.05.005>>.

ANEXO A

Medição de externalidades aplicáveis a esse estudo, retirado do manual *Princípios e Diretrizes para a Avaliação Econômica do Investimento e Iniciativas em Transportes* (NSW GOVERNMENT, 2018).

I. Atraso a pedestres

O trânsito causa atraso aos pedestres que desejam atravessar uma estrada. O tráfego pesado cria mais atraso para pedestres e os fluxos de tráfego pesado podem exigir a introdução de instalações formais de travessia, por exemplo, passagens sinalizadas para facilitar os movimentos de pedestres e aumentar a segurança. O atraso de pedestres é uma função do número de pedestres atrasados e do atraso médio de todos os pedestres. Pesquisas podem ser realizadas para verificar atrasos existentes e o número de pedestres afetados. O atraso futuro pode ser estimado a partir do tempo de ciclo da travessia sinalizada proposta ou pesquisas de outras travessias semelhantes podem ser usadas. Se atraso significativo ou economia de tempo forem aparentes, um valor de tempo apropriado pode ser usado para estimar o benefício ou custo.

- Valor recomendado do tempo de viagem

O VTT é usado nos modelos de demanda de transporte e nas avaliações econômicas. A modelagem de transporte usa os valores comportamentais em que o valor do tempo de viagem pode ser diferenciado por grupos de renda (renda mais alta significa alto valor de tempo), finalidade da viagem (viagem de negócios e viagem privada) e hora do dia (pico e fora de pico). Esses parâmetros podem ser derivados de pesquisas de preferência declaradas e representam a disposição das pessoas a pagar.

Do ponto de vista da alocação estratégica de recursos, o valor do tempo de viagem usado na avaliação econômica de todos os projetos de transporte deve ser harmonizado. Se um valor mais alto de tempo for usado para avaliação econômica de projetos rodoviários em comparação com os valores usados para projetos de transporte público, a alocação de recursos será inclinada para projetos rodoviários, à custa de investimentos em transporte público. Para harmonizar a avaliação econômica dos investimentos em transporte, a TfNSW recomenda que:

- i. Valor do tempo de viagem (particular) = AU \$ 16,89 por hora, aplicável a ocupantes de carros particulares, hora de trem a bordo, hora de ônibus a bordo, viagem de balsa, tempo de bicicleta e tempo de caminhada;
- ii. Valor do tempo de viagem (negócios) = AU \$ 54,78 por hora, aplicável a todas as viagens de negócios.

A agência Transport for NSW realizou um estudo sobre o valor do tempo de viagem em 2015-2016, usando pesquisas de preferências declaradas entre modos de transporte e valores estimados de VTT para cada modo pesquisado. O VTT estimado são valores comportamentais e são considerados apropriados para modelagem de transporte e estimativas de demanda de viagens. O valor estimado do tempo de viagem de carro, ônibus, trem, trem e trem foi o seguinte:

Table 4 Value of travel time by mode – TfNSW 2015-16 survey

Mode	Mode share	Personal income (\$000 p.a.)	Value of travel time (\$/hr)	
			Non income standardised	Income standardised
Car	85.40%	\$64	\$16.07	\$15.80
Train	6.70%	\$46	\$14.01	\$15.72
Bus	7.40%	\$39	\$8.03	\$10.43
Ferry	0.40%	\$72	\$15.59	\$14.44
Light Rail	0.10%	\$65	\$21.46	\$21.01
Public transport	14.60%	\$44	\$11.06	\$13.03
All	100.00%	\$61	\$15.35	\$15.40

Source: 2015/16 TfNSW Value of Travel Time Study. Values indexed to November 2017 using Seasonally Adjusted Full Time Adult Ordinary Earnings, NSW.

A principal conclusão do estudo é que o VTT estimado ponderado por compartilhamento de modo (AU \$ 16,66 / hora) está muito próximo a AU \$ 16,89 / hora, o valor recomendado de economia de tempo de viagem (VTTS) de viagens particulares, que é um valor de patrimônio (ou recurso) para uso em avaliações econômicas de iniciativas de rodovias e transporte público. O valor patrimonial é estimado em 40% da taxa salarial para viagens particulares e 100% + custo (38%) para viagens de negócios.

- Valor de acesso, tempo de espera, transferência e atraso inesperado.

O tempo de acesso, o tempo de espera e o atraso inesperado são avaliados como multiplicadores do tempo de bordo, conforme mostrado na Tabela 5 (abaixo). Os multiplicadores convertem o tempo de acesso, o tempo de espera e o tempo de atraso em um tempo equivalente de trem a bordo. Por exemplo, 1 minuto de caminhada equivale a 1,5

minutos de trem a bordo ou um atraso de 1 minuto é convertido em 3,2 minutos de tempo de trem a bordo (usando os multiplicadores TfNSW na Tabela 5).

O valor da economia de tempo de acesso constitui uma grande proporção dos benefícios econômicos dos projetos de infraestrutura ferroviária. O compartilhamento de modo (caminhada, carro ou ônibus) do acesso ao trem depende das características socioeconômicas locais, como propriedade do carro, cobertura do serviço de ônibus, densidade residencial e de empregos e disponibilidade de estacionamento de passageiros.

O valor do tempo de espera pode ser usado para avaliar iniciativas que impactam na frequência do serviço. Um aumento na frequência de serviço reduziria o tempo de espera da plataforma e o tempo de transferência. O aumento da frequência do barramento reduziria o tempo de espera do barramento. O multiplicador de tempo de atraso inesperado é usado para avaliar a confiabilidade do serviço. O atraso da partida em espera é mais alto que a chegada do veículo em espera.

A TfNSW recomenda que o tempo de atraso inesperado seja avaliado em 3,2 vezes o tempo no veículo.

Table 5 Access, waiting, transfer and unexpected delay time multipliers

Category	NGTSM recommended	TfNSW recommended
Access / egress walking	1.5	1.5
Waiting time		
Bus stop/Rail platform waiting time	1.4	1.4
Transfer waiting time	1.5	1.5
Unexpected delay time		
Departure delay time	6.4	3.2
Arrival on vehicle delay waiting	2.9	
Non-specific delay waiting	2.3	
Average delay waiting	3.2	

Source: NGTSM values sourced from ATC Guidelines Public Transport Parameter Review Report by Douglas Economics, October 2015.

II. Qualidade do ar

- Poluentes do ar:

Os veículos emitem gases e partículas para o meio ambiente: Monóxido de carbono (CO); Óxidos de nitrogênio (NOx); Hidrocarbonetos não queimados (HC), Compostos de chumbo; Partículas como fumaça, pneus e produtos de desgaste de freio

- Avaliação da Poluição do Ar:

Uma indicação dos níveis de poluição pode ser obtida a partir de um dos vários métodos de previsão de poluição. Isso permite que a concentração de poluentes seja estimada a partir do conhecimento do volume e da velocidade do tráfego e da distância da estrada até o ponto de medição. Dado que pequenas partículas podem permanecer no ar por até duas semanas, as condições atmosféricas (vento, chuva, etc.) são importantes modificadores de concentração.

- Valor da Poluição do Ar:

Os custos de mortalidade foram estimados como um aumento de 0,101% nas taxas de mortalidade diária para um aumento de 1 micrograma / m³ de particulados (PM10). Com base nos custos do Reino Unido (assumindo taxas de mortalidade semelhantes e ajustando-se aos custos de vida em NSW), os custos anuais de mortalidade são de AU\$ 35,30 por pessoa exposta por ano por aumento de micrograma / m³ no PM10. Acredita-se que os custos de saúde no ozônio no nível do solo sejam uma ordem de magnitude menor. Assim, o custo pode ser calculado da seguinte forma:

$$\text{Custos de mortalidade} = 0,001 * \text{concentração de } \Delta\text{PM10} * \text{população exposta} * \text{taxa de mortalidade normal} * \text{valor da vida}$$

Onde: concentração ΔPM10 é a variação da concentração média para o período analisado. Esses custos são utilizados na avaliação dos efeitos negativos do tráfego gerado nas áreas urbanas. Em particular, eles são usados para estudos de grandes mudanças nas redes de tráfego urbano que aumentam o tráfego para áreas urbanas ou que reduzem o tráfego aumentando o transporte público. É provável que os efeitos particulares sejam os mais significativos na comparação de propostas alternativas de transporte urbano e na modelagem dos efeitos das rodovias onde esses aumentam o tráfego (e, portanto, o uso de combustível) nas áreas urbanas. O custo mensal anual foi calculado usando os seguintes parâmetros:

Taxa de mortalidade padrão em NSW = 5,5 / 1.000 (0,0055), população de Sydney (4,7 milhões) e valor da vida = AU\$ 6.369.128 (no WPT, 2014).