

TRANSPORTE COLETIVO E EXTERNALIDADES AMBIENTAIS: O IMPACTO DE NOVAS INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE NA QUALIDADE DO AR DO RIO DE JANEIRO

Mateus Bandeira da Cunha

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em Economia

Sabino da Silva Porto Júnior

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em Economia

RESUMO

Nas principais grandes cidades latino-americanas, as crescentes taxas de motorização e um histórico de planejamento urbano focado em atender as necessidades dos usuários de automóvel deram origem a diversas externalidades negativas do seu uso desordenado, como poluição do ar, congestionamentos e acidentes de trânsito. A fim de mitigar estas externalidades, muitas cidades investiram em transporte coletivo partindo do pressuposto de que isso atrairia os usuários de transporte individual. Foi o caso do Rio de Janeiro durante sua preparação para sediar os Jogos Olímpicos de 2016 e a Copa do Mundo FIFA 2014. Nos anos anteriores à realização dos mega-eventos esportivos, a cidade construiu três corredores de BRT, uma linha de Metrô e uma linha de Veículo leve sobre trilhos (VLTs). Com objetivo de verificar a hipótese da migração de usuários do transporte individual, este trabalho se propõe a estimar os impactos dessas obras de infraestrutura nas concentrações anuais de NO₂, um poluente altamente correlacionado com o uso do automóvel. Utilizando o método de controle sintético, foi possível verificar uma redução de 8,5% nas concentrações do poluente dois anos após a inauguração das obras. Estas conclusões nos levam a crer de que a provisão de transporte coletivo pode ser uma estratégia eficiente de redução das externalidades negativas do uso do automóvel.

ABSTRACT

In many latin american cities, the increasing rates of motorization and a history of urban planning focused in satisfying the needs of automobile users lead to several negative externalities, such as air pollution, congestion and traffic accidents. Aiming to mitigate these externalities, policymakers often invest in mass transit infrastructure, arguing that this could attract car users. This was the case of Rio de Janeiro in its preparation to host the Olympic Games of 2016 and the FIFA World Cup 2014. To receive these mega-events, the city built three BRT corridors, one underground rail line and two light rail transit lines. In order to verify the user migration hypothesis, our paper estimates the impact of this new transport infrastructure in the annual concentrations of NO₂, a pollutant mainly derived from automobile traffic. Using the synthetic control method, common in the causal inference literature, we estimated a 8,5% reduction in the air concentration of the pollutant two years after the projects were finished. These conclusions made us believe that the provision of mass transit can be an adequate strategy to reduce the environmental externalities of automobile use.

1. INTRODUÇÃO

Desde a inserção do automóvel como opção de deslocamento nas cidades, o uso deste modal tem crescido aceleradamente tanto em função de sua praticidade, como do aumento da renda das populações urbanas. No Brasil, de 2002 a 2014, o número de automóveis por cem habitantes pulou de 21 para 34, representando um aumento na taxa de motorização de 63% só neste período (Pinheiro, Fontes e Azevedo, 2015).

Com esse crescimento da demanda pelo transporte individual, concomitante ao aumento das taxas de urbanização, grande parte das cidades foram desenvolvidas de forma a facilitar seu uso. Por mais que esta lógica de planejamento urbano tenha apresentado resultados satisfatórios em termos de mobilidade durante um certo período, cada vez mais tem se observado a saturação deste modelo de desenvolvimento urbano. Esta saturação se materializa nas externalidades negativas do uso do automóvel, como emissões de poluentes, congestionamentos e acidentes de trânsito (Pinheiro, Fontes e Azevedo, 2015).

Com base na crença de que a provisão de transporte coletivo de qualidade poderia atrair usuário do automóvel e reduzir as externalidades negativas de seu uso que, muitas vezes, grandes obras de infraestrutura de transporte urbano são justificadas por gestores em várias cidades do mundo. Uma situação em que esta argumentação costuma ser bastante utilizada é na preparação de cidades para sediar grandes eventos esportivos (Pereira, 2018).

Foi o caso da cidade do Rio de Janeiro, onde ocorreram os Jogos Olímpicos de 2016 e a Copa do Mundo FIFA de 2014. Na preparação para receber estes mega eventos, a cidade se propôs a reestruturar seu sistema de transporte urbano, considerado um dos fatores que impediram que sua candidatura de sediar os jogos olímpicos fosse aceita em ocasiões anteriores. Entre os anos de 2012 e 2016, a cidade recebeu uma quantidade considerável de investimentos em mobilidade urbana sob a justificativa de que estas obras deixariam um legado que a beneficiaria por anos após as competições (COI, 2008).

O plano proposto para reestruturar a rede de mobilidade urbana do município do Rio de Janeiro se fundamentava na construção de quatro linhas de *Bus Rapid Transit* (BRT) que uniriam as quatro principais zonas da cidade. Também foram construídas uma linha adicional de metrô, unindo a zona sul à Barra da Tijuca, duas das regiões mais ricas da cidade. Além disso, foi realizado um projeto de revitalização da região portuária, denominado porto maravilha, onde foram construídos dois ramais de um sistema de veículo leve sobre trilho (VLT) (Lindau *et al*, 2016).

A fim de verificar a hipótese de migração dos usuários de automóvel e a justificativa dos gestores de públicos para o grande volume de investimentos, a proposta deste trabalho é mensurar os impactos ambientais de alguns destes investimentos em transporte coletivo, em especial a linha de BRT TransOlímpica, a nova linha de metrô e o VLT. Isto foi feito utilizando a técnica de controle sintético proposta por Abadie e Gardeazabal (2003) e Abadie, Diamond e Hainmueller (2010) para estimar os impactos das obras de mobilidade nas concentrações de NO₂, um poluente proveniente principalmente do uso do automóvel em meio urbano (Soares *et al*, 2018).

A contribuição principal deste trabalho se refere a literatura de avaliação de impacto ambiental de infraestrutura de transporte urbano. Por mais que já exista um número significativo de trabalhos empíricos na área de avaliação ambiental de políticas de transporte, a maior parte deles visa mensurar os efeitos de políticas de gestão de demanda pelo transporte individual, como pedágios urbanos ou medidas restrição do tráfego. Além disso, poucas estimativas foram feitas em cidades de países em desenvolvimento, caso deste trabalho. Dentre os trabalhos que se propõem a realizar algo semelhante, podemos citar Chen e Whalley (2012), Beaudoin e Lawell (2016), Lallive, Luechinger e Schmutzler, (2013), Gallego, Monteiro e Salas *et al* (2013) e Yang e Tang (2018), Soares *et al* (2018).

Este trabalho é dividido em seis seções, além desta introdução. Na segunda seção é apresentado o objeto de estudo: as obras de infraestrutura de transportes que a cidade do Rio de Janeiro construiu como preparação para os Jogos Olímpicos de 2016. Na seção três é feita uma descrição da metodologia utilizada: o método do controle sintético. Na seção quatro foi detalhada base de dados utilizada. Na quinta seção são apresentados e discutidos os resultados encontrados. Por fim, na sexta e última seção, são feitas as considerações finais do trabalho.

2. OBJETO DE ESTUDO

O Rio de Janeiro é o segundo maior município do Brasil, com um número estimado de 6,8 milhões de habitantes em 2018. Localizada no estado do Rio de Janeiro e englobando uma área de 1.200,18 km², a cidade tem uma densidade populacional de 5.573,28 hab/km² (MobiliDADOS, 2019). O município funciona ainda como centro econômico da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), a segunda maior conurbação urbana do Brasil e sexta maior do mundo, com um total de aproximadamente 13 milhões de habitantes (Pinto *et al*, 2013). A partir daqui, a não ser que seja mencionado o contrário, sempre que for usado o nome “Rio de Janeiro”, se trata do município e não do estado ou da região metropolitana.

A evolução urbana da cidade foi marcada por uma série de intervenções e planos de revitalização com objetivos específicos em cada período em que eles foram elaborados. Um fator comum a maior parte deles, no entanto, foi a atenção dada ao modal rodoviário. A fisionomia atual da cidade, resultado desse conjunto de planos de reestruturação urbana, segue uma configuração radial, com as principais vias e corredores expressos orientados ao centro da cidade (Abreu, 1987). Em 2012, a cidade possuía 3.357 km de vias destinadas ao transporte rodoviário, sendo que 2.420 km suportavam transporte coletivo (SMMA, 2019).

A topografia acidentada da cidade do Rio de Janeiro, em conjunto com seu histórico de planejamento urbano, provavelmente fazem parte das explicações para o fenômeno observado na Tabela 1. Em 2010, dentre as principais regiões metropolitanas do Brasil, a do Rio de Janeiro era aquela em que mais pessoas perdiam uma hora ou mais em seus deslocamentos diários (28%) e a que tinha o segundo maior tempo médio de deslocamento casa-trabalho do Brasil (48,5 minutos) (IBGE, 2010).

Tabela 1: Características de deslocamentos diários nas principais RMs do Brasil

Região Metropolitana	População	% de pessoas que levam mais de uma hora em seu deslocamento	Tempo médio de deslocamento
AM Brasília	3.484.689	18,7	39,3
Belém	2.074.299	13,5	35,2
Belo Horizonte	4.819.866	19,9	41,5
Campinas	2.760.423	8,2	30,6
Curitiba	3.181.514	13,9	36,0
Florianópolis	865.602	7,8	29,7
Fortaleza	3.568.310	11,8	33,8
Goiânia	2.144.613	12,5	33,5
Vitória	1.665.554	14,7	36,5
Manaus	2.078.677	16,1	38,9
Porto Alegre	3.926.248	11,3	33,5
Recife	3.642.112	16,2	38,7
Rio de Janeiro	11.716.363	28,4	48,5
Salvador	3.527.067	19,4	41,5
São Paulo	19.425.653	28,3	48,8

Dada a realidade ilustrada na Tabela 1, era latente a necessidade de investimentos em mobilidade urbana no município. A oportunidade para tais investimentos surgiu com a Copa do Mundo FIFA 2014 e, principalmente, com a escolha do Rio de Janeiro para sediar dos Jogos Olímpicos de Verão 2016. A cidade finalmente foi selecionada depois de duas tentativas frustradas de receber as olimpíadas, em 2004 e 2012.

Com a experiência obtida nas propostas anteriores, o Rio de Janeiro conseguiu montar um plano de investimentos em infraestrutura de transportes que o Comitê Olímpico Internacional (COI) considerou factível. A principal característica da proposta da prefeitura do Rio de Janeiro, que a diferia das anteriores, foi a escolha por priorizar o sistema *Bus Rapid Transit* (BRT), considerado mais barato e de fácil implementação do que outros modais de alta capacidade (Kassens-Noor, 2018; Lindau et al, 2016). A rede completa proposta pela prefeitura do Rio de Janeiro, está detalhada na Figura 1.

Também foram propostas as construções de uma linha adicional de metrô ligando o bairro de Copacabana à Barra da Tijuca e duas linhas de Veículo Leve sobre Trilhos (VLT) no centro da cidade, essas últimas em conjunto com um projeto de revitalização urbanística de região portuária, denominado Porto Maravilha. Além disso, foram planejadas a construção de um novo sistema de operação dos ônibus urbanos, denominado *Bus Rapid Service* (BRS), e a reforma de diversas estações e terminais da SuperVia, o sistema de trens metropolitanos, para permitir a integração com as novas infraestruturas. Quando finalizado o planejado, esses sistemas de transporte deveriam funcionar como uma rede única de mobilidade, possibilitando a integração tarifária e operacional entre modais (Lindau *et al*, 2016).

Das obras construídas ao longo de 2012 a 2016, serão analisadas e detalhadas neste trabalho aquelas que entraram em operação no ano de 2016: o BRT TransOlímpica, a linha 1 do VLT e o a Linha 4 do metrô. O BRT TransOlímpica, inaugurado no início do segundo semestre de 2016, às vésperas das Olimpíadas, foi projetado para interligar dois locais de competição dos jogos: o bairro de Deodoro e o Recreio, próximo a Barra da Tijuca. No ano de sua inauguração, o sistema de 25 km atendeu a uma média de 40.000 passageiros por dia enquanto oferecia a integração com outros sistemas da cidade (BRTRio, 2019). Este foi o terceiro corredor BRT planejado a ser inaugurado até a conclusão deste trabalho, sendo os outros o o BRT TransCarioca, em 2014, e o BRT TransOeste, em 2012.

Com relação às outras propostas de infraestrutura de transporte de massa não baseadas no BRT e que também entram no escopo deste trabalho, destacam-se o VLT do Porto Maravilha e a linha 4 do metrô. A primeira linha do sistema VLT foi inaugurada em junho de 2016, sendo expandida naquele mesmo ano, em julho. O sistema faz parte do projeto de revitalização da região portuária, denominado Porto Maravilha. Atualmente possui duas linhas que se distribuem pela região central, passando por pontos como o terminal rodoviário Central do Brasil e pelo aeroporto Santos Dumont (Rio de Janeiro, 2019).

Por fim, o sistema de metrô antes possuía duas linhas que partiam do centro da cidade, transportando uma média de 800.000 passageiros por dia, sendo a Linha 2 a única ligação por transporte de massa entre a região central e a zona sul. A construção da chamada Linha 4 funciona como uma extensão da Linha 2, unindo a estação Copacabana, na Zona Sul, à Barra da Tijuca. O projeto foi inaugurado às vésperas dos jogos e funcionou em regime especial durante sua realização, somente transportando atletas e o público com ingressos para os jogos. Em setembro sua utilização foi liberada para os demais usuários e o sistema passou oferecer possibilidade de integração com os BRTs TransOeste e TransCarioca (MetroRio, 2019).

3. METODOLOGIA

A estratégia empírica do trabalho é baseada no método de controle sintético proposto por Abadie e Gardeazabal (2003) e Abadie, Diamond e Hainmueller (2010). A técnica é útil em

contextos em que o efeito de uma intervenção ocorre de forma agregada numa região ou grupo demográfico. A metodologia permite construir um contrafactual para a situação observada por meio de um *data-driven procedure*, o que reduz a discricionariedade da escolha de unidades controle (Zhang *et al*, 2016).

A ideia geral do método de controle sintético é construir um “Rio de Janeiro sintético” por meio da combinação linear de um conjunto de cidades não afetadas pela intervenção a qual se deseja mensurar o efeito. Esta combinação tem por objetivo replicar da melhor forma possível as características relevantes que explicariam a trajetória da variável de interesse na ausência da intervenção, ou seja, as concentrações de NO₂ no Rio de Janeiro. A intervenção em questão se refere ao início da operação das novas infraestruturas de transporte inauguradas no ano de 2016 na cidade do Rio de Janeiro. Especificamente, o corredor de BRT TransOlimpica, a Linha 4 do metrô e o primeiro ramal do VLT.

Sejam $J+1$ cidades, sendo $J=1$ a unidade afetada pelo tratamento e as outras J cidades, o *donor pool* de possíveis controles. Um controle sintético é composto por um vetor de pesos $W=(w_2, w_3, \dots, w_{J+1})'$ sendo $0 \leq w_j \leq 1$ para qualquer $j \in \{2, \dots, J+1\}$ e $\sum_{j=2}^{J+1} w_j = 1$. Cada vetor W gera um controle sintético diferente atrelando o peso w_j para a unidade j no *donor pool*. O método proposto por Abadie e Gardeazabal (2003) gera o vetor de pesos que minimiza:

$$\|X_1 - X_0 W\|_V = \sqrt{(X_1 - X_0 W)' V (X_1 - X_0 W)} \quad (1)$$

Sendo X_1 um vetor de variáveis previsoras do comportamento da variável de interesse da unidade tratada, ou seja, o Rio de Janeiro. X_0 é uma matriz em que cada linha corresponde aos mesmos previsores de X_1 para cada unidade do *donor pool*. Estes previsores ainda podem conter combinações lineares da variável de interesse antes do início do tratamento. V é uma matriz em que os valores da diagonal principal correspondem à importância relativa de cada predictor. A escolha de V pode ser subjetiva, refletindo o conhecimento prévio do pesquisador da importância de cada variável previsor. Entretanto, Abadie e Gardezabal (2003) propõem um método de estimação de V que faz com que a trajetória da variável de interesse pré-intervenção seja a mais próxima possível no controle sintético e na unidade tratada. Isto é feito minimizando a equação (2).

$$(Z_1 - Z_0 W^*(V))' (Z_1 - Z_0 W^*(V)) \quad (2)$$

Em que Z_1 é um vetor contendo os valores da variável de interesse no período pré-intervenção na unidade tratada. Z_0 é uma matriz em que cada linha corresponde às mesmas observações da variável de interesse em cada unidade do *donor pool*. O contrafactual sintético ótimo (W^*) é estimado resolvendo o problema de otimização que minimiza a equação (2), para um $W^*(V)$ dado pela equação (1).

Finalmente, Y_1 será definido como um vetor ($T_1 \times 1$) contendo as observações de Y_{1t} para todo o período pós-intervenção. De forma análoga, Y_0 é uma matriz ($T_1 \times J$) em que a j -ésima coluna corresponde às mesmas observações pós-intervenção da variável de interesse na unidade de controle j . Abadie, Diamond e Hainmueller (2010) mostraram que, quando o número de períodos de intervenção é suficientemente grande, $W^* Y_0$ funciona como um estimador não viesado do contrafactual, ou seja, do que aconteceria com a unidade tratada na ausência da

intervenção. Portanto, um estimador não viesado do efeito agregado (α) em todo período pós-intervenção na unidade tratada é:

$$\widehat{\alpha}_1 = Y_1 - W \cdot Y_0$$

Ou ainda, período a período:

$$\widehat{\alpha}_{1t} = Y_{1t} - \sum_{j=2}^{J+1} w_j \cdot Y_{jt}$$

4. BASE DE DADOS

A base de dados utilizada é composta por um painel balanceado de 30 cidades, contendo observações dos anos de 2012 a 2018. Dentre as cidades se encontram o Rio de Janeiro, unidade tratada, e 29 potenciais controles para a utilização no método do contrafactual sintético. As cidades são localizadas nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Rio Grande do Sul.

A variável de interesse é composta pela concentração média de NO_2 em cada ano, medida em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas observações são feitas por estações de monitoramento de qualidade do ar pertencentes, geralmente, às secretarias estaduais do meio ambiente. A exceção é a cidade do Rio de Janeiro, que possui uma rede própria de monitoramento. A rede de monitoramento da cidade do Rio de Janeiro, assim como as obras de infraestrutura analisadas neste trabalho se encontram na Figura 1. Cabe pontuar que as estações de monitoramento que mediam as concentrações de NO_2 são as de Bangu, São Cristóvão e Irajá. A concentração média no ano de NO_2 é composta pela média das observações destas estações.



Figura 1: Rede de monitoramento de qualidade do ar e mobilidade urbana no Rio de Janeiro

Para a maior parte dos dados de concentração média anual dos poluentes, foi utilizada a base de dados da Plataforma da Qualidade do Ar (IEMA, 2019), um projeto do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) que visa compilar dados de qualidade do ar de vários órgãos estaduais do meio ambiente. Os valores foram calculados manualmente com os dados das secretarias estaduais nos anos em que não existem observações na Plataforma de Qualidade do

Ar.

A implementação do método de controle sintético requer um conjunto de previsores do comportamento da variável de interesse para construir a matriz X_0 e o vetor X_1 . Como um conjunto de possíveis candidatos a estes previsores, serão utilizadas variáveis socioeconômicas de cada cidade. São estas: PIB *per capita* (PIB_{pc}), densidade populacional (dens), participação da indústria no produto (part.ind), taxa de motorização (tx.auto), consumo de gasolina per capita (gas.pc), consumo de diesel per capita (diesel.pc) e preço da gasolina (p.gas).

Além de conterem as variáveis socioeconômicas previsoras, é possível ainda utilizar combinações lineares dos valores da variável de interesse pré-intervenção. Abadie, Diamond e Hainmeueller (2010) argumentam que estas combinações lineares podem ajudar a controlar características comuns não observáveis entre as unidades tratadas e controles. As combinações lineares de observações pré-intervenção (8 a 12), assim como os previsores (1 a 7) propostos também se encontram na Tabela 2.

Tabela 2: Candidatas a variáveis previsoras no controle sintético

Variável	Unidade	Fonte
1 PIB _{pc}	R\$	IBGE (2019)
2 dens	hab/km ²	IBGE (2019)
3 part.ind	%	IBGE (2019)
4 tx.auto	Frota/1000 hab	IBGE (2019)
5 gas.pc	l/hab	IBGE (2019)
6 diesel.pc	l/hab	IBGE (2019)
7 p.gas	R\$	IBGE (2019)
8 concentração anual média	µg/m ³	IBGE (2019)
9 concentração anual máxima	µg/m ³	IBGE (2019)
10 concentração anual mínima	µg/m ³	IBGE (2019)
11 concentração em 2012	µg/m ³	IBGE (2019)
12 concentração em 2015	µg/m ³	IBGE (2019)

Como *proxy* do nível de atividade econômica, o que influencia tanto a quantidade de viagens feitas quanto o nível de produção industrial, foi utilizado o PIB *per capita* (PIB_{pc}). Esta estatística foi obtida no banco de dados abertos do IBGE (2019) e consiste no PIB da cidade dividido por sua população.

Espera-se que uma maior densidade populacional (dens) diminua a necessidade de viagens de longa distância e reduza os incentivos para utilizar o automóvel. Estas estatísticas consistem da previsão populacional anual do IBGE (2010) para cada cidade dividida por sua área, que foi considerada constante em todo período.

O nível de atividade industrial é, junto com o transporte urbano, uma das principais fontes de poluição do ar. Como *proxy* desta variável, foi utilizada a contribuição percentual da indústria para o valor total adicionado (part.ind), também obtida no banco de dados do IBGE (2019).

A taxa de motorização (tx.moto) consiste no número de automóveis, caminhonetes, caminhonetas, veículos utilitários e motocicletas dividido pelo número de habitantes da cidade.

Este é um dos principais indicadores de mobilidade utilizados na literatura, já que traduz a quantidade de veículos por habitante, tendo uma relação direta com o número de viagens na cidade. Os dados utilizados foram obtidos na base de dados MobiliDADOS (2019) do Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento, uma organização internacional sem fins lucrativos cujo objetivo é desenvolver projetos referentes à mobilidade urbana sustentável (ITDP, 2019).

Também foram utilizados os consumos *per capita* de gasolina C (gas.pc), combustível da maior parte dos automóveis brasileiros, e diesel (diesel.pc), comum em ônibus e outros veículos de grande porte. Estas estatísticas funcionam como *proxy* do uso de automóveis e ônibus em meio urbano. Ainda, foi utilizado o preço médio da gasolina em cada ano (p.gas). Esta funciona como uma variável exógena ao tratamento que ainda influencia a demanda por combustível, tendo uma função semelhante ao consumo *per capita* de gasolina.

Por fim, a lógica de utilizar as concentrações médias, máximas e mínimas é capturar a amplitude da variação pré-intervenção das concentrações do poluente analisado. As concentrações no início (2012) e final (2015) do período pré-tratamento se propõem a capturar algum componente de tendência preexistente. Para não saturar o algoritmo com combinações lineares de observações pré-intervenção, optou-se por utilizar ou as variáveis 9 e 10 ou 11 e 12.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estimação do controle sintético foi feita utilizando o pacote *Synth*, provido por Abadie, Diamond e Hainmueller (2011) para o software R. O Rio de Janeiro sintético construído pelo método é composto da média ponderada de cinco unidades do *donor pool*. As cidades e seus respectivos pesos na composição do contrafactual sintético foram: Resende - RJ (15%), São Caetano do Sul - SP (11%), Osasco - SP (40%), Santos - SP (24%) e Volta Redonda -RJ (9%).

Na estimação dos efeitos das obras de infraestrutura nas concentrações de dióxido de nitrogênio (NO₂), o algoritmo gerou o Rio de Janeiro sintético descrito na Tabela 2. As variáveis previsoras que possuem pesos positivos na diagonal principal da matriz V neste caso são: densidade (dens), participação da indústria no produto (ind), consumo de diesel *per capita* (diesel.pc) e concentrações anuais médias (NO₂ med), máximas (NO₂ max) e mínimas (NO₂ min) de NO₂ no período pré-intervenção. As variáveis que obtiveram peso 0 não foram apresentadas.

Tabela 2: Variáveis previsoras pré-intervenção

Previsor	Rio de Janeiro	Controle sintético	Média <i>donor pool</i>	Peso em V
dens	5363,89	5898,83	2675,89	0,10%
ind	0,17	0,17	0,29	16,20%
diesel.pc	140,28	254,84	468,14	0,10%
NO ₂ med (2012-2015)	34,64	34,62	22,44	45,20%
NO ₂ max (2012-2015)	37,45	37,83	24,92	0,10%
NO ₂ min (2012-2015)	31,67	31,68	20,06	38,30%

A trajetória do contrafactual e do Rio de Janeiro verdadeiro pode ser observada na Figura 2. A linha tracejada delimita os períodos pré (2012-2015) e pós-intervenção (2016-2018). É possível observar que as concentrações de NO₂ do Rio de Janeiro sintético seguem uma tendência constante enquanto o Rio de Janeiro verdadeiro apresenta uma queda nas concentrações nos anos pós-intervenção.

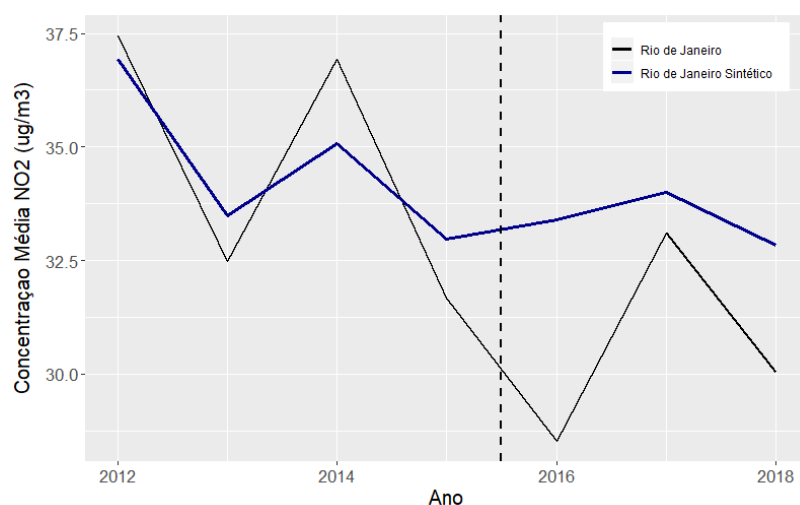


Figura 2: Concentrações de NO₂ no Rio de Janeiro sintético vs. verdadeiro

O primeiro ano de intervenção é onde ocorre a maior diferença entre o Rio de Janeiro verdadeiro e o sintético (Figura 3). No entanto, as obras de infraestrutura de transporte só entraram em operação em meados de setembro. Portanto, dificilmente é possível atribuir este resultado a uma migração dos usuários de automóvel para o transporte coletivo nos últimos meses do ano. Possíveis explicações para este comportamento são a própria ocorrência dos jogos olímpicos, que impuseram uma série de restrições ao uso do transporte individual durante sua realização. Também é possível que as obras ainda em execução no período anterior aos jogos olímpicos dificultassem o tráfego de automóveis antes de serem inauguradas.

No ano seguinte (2017), o *gap* diminui, possivelmente em função da liberação das vias antes interditadas para as obras de infraestrutura, em especial o corredor BRT TransOlímpica. Ainda assim, no último ano de estudo, o *gap* observado novamente aumenta para níveis semelhantes ao ano de início do tratamento, o que pode refletir a migração de motoristas de automóvel para o transporte coletivo.

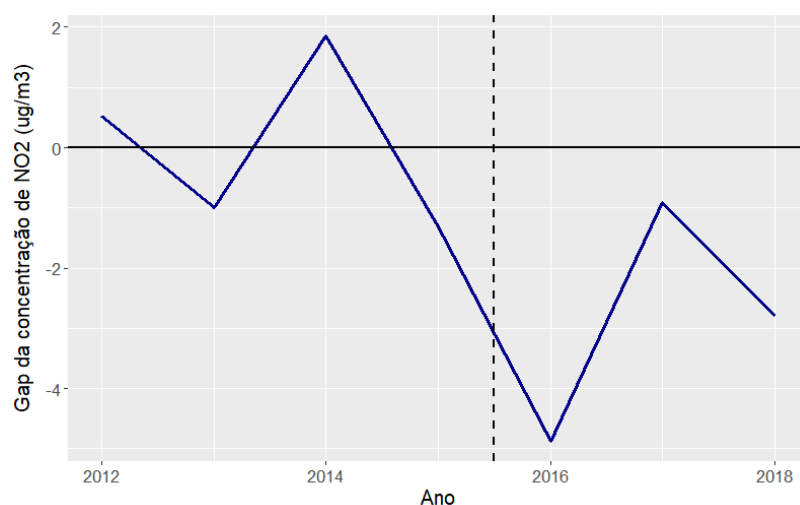


Figura 3: Gap entre concentrações de NO₂ no Rio de Janeiro real e sintético

A Tabela 3 apresenta os valores dos *gaps* estimado entre o Rio de Janeiro real e o controle sintético ano a ano. Também são apresentados os *gaps* percentuais, calculados dividindo o *gap*

estimado pela concentração encontrada no Rio de Janeiro sintético. Ao final do período de análise, foi estimado que as concentrações de NO₂ estariam cerca de 8,5% mais baixas do que um cenário sem a infraestrutura, o que indica que esta teve um efeito positivo na qualidade do ar do Rio de Janeiro no longo prazo com relação a este poluente.

Tabela 3: Gaps entre Rio de Janeiro real e sintético

Ano	Rio de Janeiro real	Controle sintético	Gap	Gap (%)
2012	37,45	36,94	0,52	1,40%
2013	32,49	33,49	-1	-3%
2014	36,93	35,07	1,86	5,30%
2015	31,67	32,98	-1,31	-4%
2016	28,52	33,40	-4,87	-14,60%
2017	33,10	34,00	-0,9	-2,60%
2018	30,04	32,84	-2,8	-8,50%

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principal objetivo estimar os impactos de novas infraestruturas de transporte nas externalidades ambientais geradas por atividades de mobilidade urbana. Consideraram-se externalidades ambientais as emissões NO₂, um poluente originado principalmente em atividades de transporte urbano. Para estabelecer uma relação de causalidade, foram utilizadas algumas obras de mobilidade promovidas no município do Rio de Janeiro para receber os jogos olímpicos de 2016 como um experimento natural do fenômeno que se deseja estudar.

Na preparação para receber o evento, a cidade teve seu sistema de mobilidade urbana da cidade reestruturado ao longo dos anos anteriores ao evento. Como não é possível separar os efeitos de todas as infraestruturas que entraram em operação no ano dos jogos olímpicos, optou-se por estimar o efeito agregado da construção do BRT TransOeste, da linha 4 do metrô e do primeiro ramal do VLT, modais que entraram em operação ano de 2016.

A metodologia utilizada consiste no método do controle sintético proposto por Abadie e Gardeazabal (2003) e Abadie, Diamond e Hainmueller (2010). Ele consiste na elaboração de um contrafactual sintético de uma unidade que sofre uma intervenção por meio da média ponderada de um conjunto de unidades que controle que não foram afetadas pelo tratamento. Foi utilizada a técnica pois ela é útil em situações em que um tratamento ocorre de forma agregada numa região, como é o caso do efeito das obras de infraestrutura no Rio de Janeiro.

Utilizando um painel contendo 30 cidades brasileiras para montar o contrafactual sintético e 8 anos de observação foi possível concluir de que as novas infraestruturas de transporte tiveram um efeito negativo nas concentrações de NO₂ na cidade do Rio de Janeiro. Estimou-se uma redução média de 8,5% no último ano de análise, 2018.

Ainda que a série utilizada seja pequena em função da precária disponibilidade de dados de qualidade do ar no Brasil, considera-se que a magnitude do efeito é suficientemente grande para inferir de que houve impacto. A prática de monitoramento de qualidade do ar no Brasil ainda é recente e espera-se que, no futuro, seja possível utilizar séries de dados maiores para melhorar as estimativas.

Como sugestões para trabalhos futuro, recomenda-se que seja investigada a influência da realização dos jogos olímpicos na qualidade do ar do ano de 2016. O efeito encontrado neste ano é considerável em comparação aos seguintes mas as infraestruturas de transporte só entraram em operação em meados de agosto. O motivo para este fenômeno pode ser a própria realização dos jogos, quando foram promovidas medidas de restrição do tráfego de veículos que podem ter afetado o comportamento das concentrações de NO₂ naquele ano.

Conclui-se que a provisão de transporte coletivo pode ser uma estratégia eficiente na mitigação de externalidades ambientais do transporte urbano. A análise dos impactos destes tipos de investimentos se faz especialmente importante em cidades de países em desenvolvimento em função da necessidade priorizar recursos públicos para os fins que geram os maiores ganhos sociais. Espera-se que este trabalho tenha colaborado para subsidiar o debate em torno do tema e para tornar nossas cidades cada vez mais humanas, democráticas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abadie, A.; A. Diamond e J. Hainmueller (2010) *Synthetic control methods for comparative case studies: Estimating the effect of california's tobacco control program*. Journal of the American statistical Association, Taylor & Francis, v. 105, n. 490, p. 493–505.
- Abadie, A.; A. Diamond e J. Hainmueller (2011) *Synth: An r package for synthetic control methods in comparative case studies*. Journal of Statistical Software, v. 42, n. 13.
- Abadie, A. e J. Gardeazabal (2003) *The economic costs of conflict: A case study of the basque country*. American economic review, v. 93, n. 1, p. 113–132.
- Abreu, M. d. A. *Evolução urbana do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, 1987
- ANP (2019) *Anp - dados abertos*. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-abertos-anp>>. Acesso em: 26 Dec 2019.
- Beaudoin, J. e C. L. Lawell (2016) Is public transit's "green" reputation deserved?: Evaluating the effects of transit supply on air quality. In: *University of California at Davis Working Paper*.
- BRTRIO (2019) Conheça o BRT - BRTRio. Disponível em: <<http://brtrio.com/conheca>>. Acesso em: 07 Jul 2019.
- Chen, Y. e A. Whalley (2012) Green infrastructure: The effects of urban rail transit on air quality. *American Economic Journal: Economic Policy*, v. 4, n. 1, p. 58–97.
- Gallego, F. e J.-P. Montero e C. Salas (2013) The effect of transport policies on car use: Evidence from latin american cities. *Journal of Public Economics*, Elsevier, v. 107, p. 47–62.
- IBGE (2019) *Estimativas de pib dos municípios*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?t=o-que-e&c=3301900>>. Acesso em: 26 Dec 2019.
- IBGE (2010) *Censo demográfico 2010*. IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IEMA (2019) *Iniciativas: Plataforma de qualidade do ar*. Disponível em: <<http://www.energiaambiente.org.br/iniciativas-qualidade-do-ar>>. Acesso em: 07 Jul 2019.
- ITDP (2019) *Mobilidados - taxa de motorização*. Disponível em: <<https://plataforma.mobilidados.org.br/database>>. Acesso em: 26 Dec 2019.
- Kassens-Noor, E. e C. Gaffney and J. Messina e E. Phillips (2018) Olympic transport legacies: Rio de janeiro's bus rapid transit system. *Journal of Planning Education and Research*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 38, n. 1, p. 13–24.
- Lalive, R. e S. Luechinger e A. Schmutzler (2013) Does supporting passenger railways reduce road traffic externalities? *CEPR Discussion Paper No. DP9335*.
- Lindau, L. A. e G. Petzhold e V. B. Tavares and D. Facchini (2016) Mega events and the transformation of rio de janeiro into a mass-transit city. *Research in Transportation Economics*, Elsevier, v. 59, p. 196–203.
- METRORIO (2019) História MetrôRio. Disponível em: <https://www.metrorio.com.br/Empresa/Historia?p_interna=1>. Acesso em: 07 Jul 2019.
- Pereira, R. H. M. (2018) Distributive justice and transportation equity: inequality in accessibility in Rio de Janeiro. Tese (Doutorado) — University of Oxford.
- Pinheiro, A. e J. Fontes e L. Azevedo (2015) Crise da mobilidade urbana no brasil: custos econômicos e soluções. In: *Mobilidade Urbana: Desafios e Perspectivas para as Cidades Brasileiras*. Rio de Janeiro: ELSEVIER, p. 37–74.

- Pinto, D. G. C. e M. A. C. Costa e M. L. d. A. C. Marques, (2013) O índice de desenvolvimento humano municipal brasileiro. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea).
- Rio de Janeiro (2017) *Plano de mobilidade sustentável do rio de janeiro - relatório síntese*. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/pmus/mapa-da-rede-de-transportes>>. Acesso em: 07 Jul 2019.
- Rio de Janeiro (2018) *Dados horários do monitoramento da qualidade do ar - monitorar*. Disponível em: <<http://www.data.rio/datasets/dados-hor%C3%A1rios-do-monitoramento-da-qualidade-do-ar-monitorar>>. Acesso em: 26 Dec 2019.
- Rio de Janeiro (2019) Mapa da Rede - VLT Carioca. Disponível em: <<https://www.vltrio.com.br/#/mapa-rede>>. Acesso em: 07 Jul 2019.
- SMMA (2012) *Qualidade do ar na cidade do rio de janeiro - relatório de monitoramento da rede qualiar - rio*. Disponível em: <<https://www.rio.rj.gov.br/web/smac/monitorar-rio1>>. Acesso em: 26 Dec 2019.
- Soares, L. M. e L. M. B. Ventura e E. M. Martins e F. de Oliveira Pinto (2018) Avaliação do impacto na qualidade do ar após implantação do brs no rio de janeiro. *Revista Internacional de Ciências*, v. 8, n. 2, p. 203–220, 2018.
- Yang, Z.; M. Tang (2018) Does the increase of public transit fares deteriorate air quality in beijing? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier, v. 63, p. 49–57.
- Zhang, J. e C. Zhong; M. Yi (2016) Did olympic games improve air quality in beijing? based on the synthetic control method. *Environmental Economics and Policy Studies*, Springer, v. 18, n. 1, p. 21–39.