

Utilização de Modelo Digital de Elevação (MDE) para apuração de dados de extensão dos itinerários de transporte público por ônibus.

Thiago Henrique de Oliveira Faustino ¹; Daniel Martins Nogueira ²

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG - Departamento de Engenharia de Transportes - Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça - Belo Horizonte - MG - CEP 30.421-169. Tel.: (31) 3319-7107. thfaustino@gmail.com;

² Superintendência de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte (SUMOB) - Gerência de Pesquisa e Ciência de Dados – Rua dos Goitacazes, 1.451 – Barro Preto - Belo Horizonte - MG CEP 30.190-055 - Tel.: (31) 3299-3548.; danie.mnogueira@pbh.gov.br.

RESUMO

Este artigo propõe um método para medir com precisão a extensão das rotas de ônibus, considerando variações de declividade do terreno, através da utilização do Modelo Digital de Elevação. Permitindo uma gestão mais precisa e econômica do transporte público, haja vista que tais valores estão diretamente relacionados com os custos variáveis do sistema de transportes.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Digital de Elevação (MDE), Geoprocessamento, Custos de Transporte

INTRODUÇÃO

A gestão do transporte público por ônibus apresenta uma série de desafios para os profissionais do setor e, neste aspecto, tem-se que as condições de deslocamento têm sido extensivamente estudadas na literatura, abordando diversos aspectos sociais e econômicos. Nos últimos anos, a tarifa do transporte tem sido debatida amplamente na sociedade, incluindo políticas de subsídios adotadas por parte do poder público em diversos municípios brasileiros criadas após a pandemia da COVID-19. A partir de então, considerando os escassos recursos públicos, a obtenção de parâmetros associados aos custos de operação de transporte público tornam-se fatores essenciais para uma operação eficiente e transparente.

Em discussões sobre custos de transporte público são apresentados alguns métodos para a obtenção de remuneração pelos serviços prestados pelas concessionárias, principalmente baseados na obtenção de receita através do número de passageiros transportados ou da quilometragem rodada nos serviços. Algumas brechas relacionadas aos métodos apresentados podem ocasionar consequências relacionadas à operação dos serviços, podendo incluir insuficiências na oferta na apresentação de lotação excessiva (remuneração por passageiros) ou ofertas excedentes com um sistema ocioso economicamente (modelo de remuneração por quilometragem rodada) (Pires e Néspoli, 2013).

Analisando as questões econômicas, tem-se que os custos de operação estão diretamente relacionados com as configurações dos serviços de transporte que são definidos de acordo com a demanda a ser atendida. Assim, as variáveis diretamente relacionadas aos custos vão incluir a oferta e a extensão das viagens percorridas para o atendimento adequado à demanda especificada.

No contexto atual, a obtenção de informações das extensões percorridas pelos veículos pode acontecer com equipamentos de precisão embarcados e/ou por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Tem-se que, devido ao baixo custo para obtenção das informações, a obtenção das informações por meio de SIGs tornou-se uma fonte primária de informações para os profissionais do setor em diversas definições e estudos para o dimensionamento. No entanto, é importante ressaltar que a maioria das ferramentas em SIG não considera a declividade para o cálculo e, conseqüentemente, podem apresentar

divergências em relação aos dados registrados nos odômetros dos veículos, haja vista a consideração da extensão apenas em um terreno plano diferente da realidade da operação.

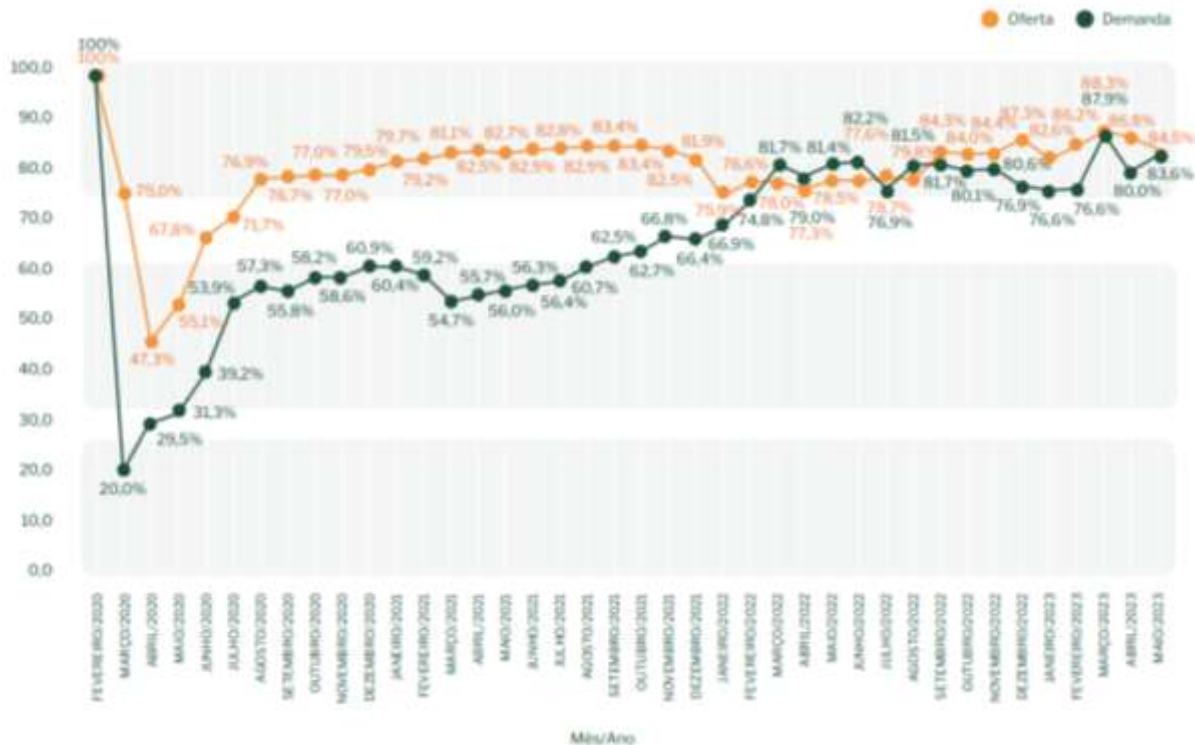
Diante desse contexto, este trabalho propõe a adoção de um método para obter dados de extensão de itinerários utilizando informações de um SIG, combinando os métodos amplamente utilizados com fatores de expansão das extensões, relacionando-as com a declividade ao longo do itinerário. Essa abordagem utiliza informações obtidas por meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta precisão, com aplicação específica no município de Belo Horizonte-MG.

DO CONTEXTO

A queda dos números relacionados à demanda por transporte público no ambiente urbano têm sido amplamente discutida nas últimas décadas. Nos anos 2000, a maior queda da demanda estava diretamente associada à ampliação do uso de modos individuais (Vasconcelos, 2005) e às políticas de aumento do acesso a veículos particulares pelos cidadãos. Na década de 2010, com a expansão do uso da tecnologia móvel e o subsequente surgimento dos aplicativos de *ridesourcing*, o transporte público passou a enfrentar mais um concorrente (Rayle *et al.*, 2016), ocasionando reduções na demanda associada ao uso deste novo método de deslocamento.

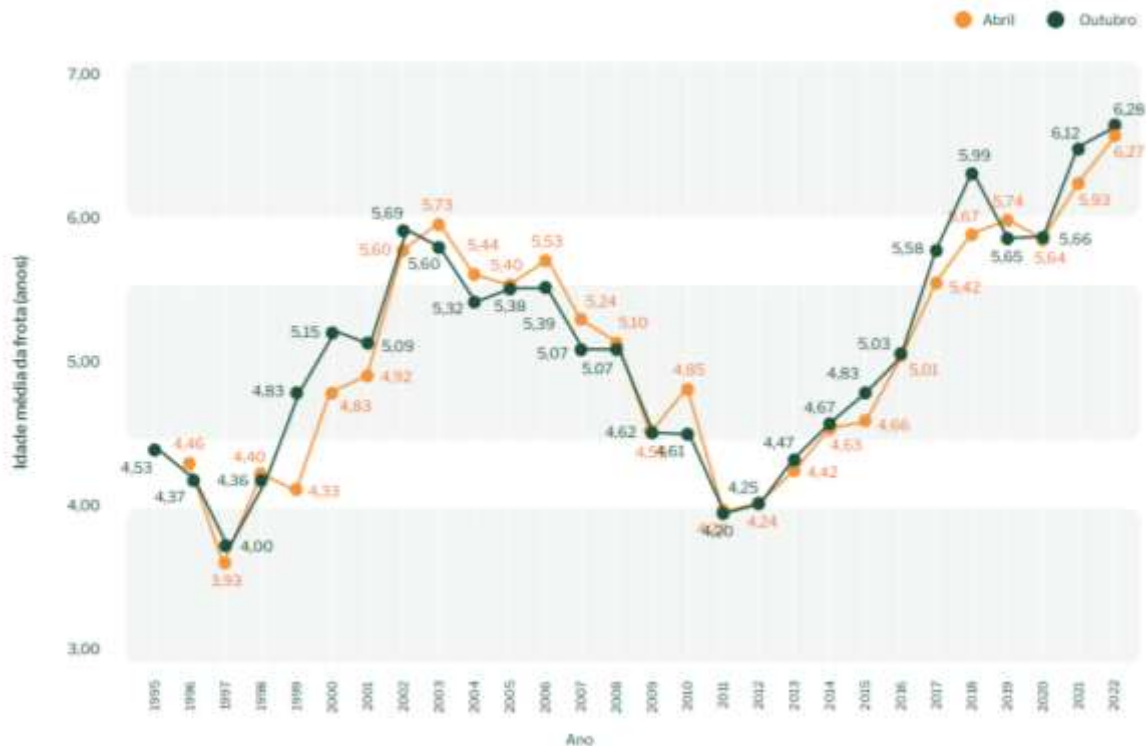
No início desta década, o surgimento da COVID-19 e as drásticas reduções na demanda por transporte público e a queda na qualidade dos serviços, trouxeram à tona questões relacionadas ao financiamento dos sistemas, que, na maioria das localidades brasileiras, são suportados pelos próprios usuários (Baiardi, 2023). Destaca-se, neste aspecto, a queda de demanda registrada que não retomou em sua totalidade em relação ao período de pré-pandemia, conforme ilustrado na Figura 1. Além disso, observa-se um aumento substancial na idade média da frota, com os piores valores registrados desde 1995, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 1: Evolução da demanda transportada entre fevereiro de 2020 (período de pré - pandemia) e maio de 2023 (pós-pandemia).



Fonte: NTU, 2023.

Figura 2: Evolução da idade média da frota dos sistemas de ônibus urbano entre 1995 e 2022



Fonte: NTU, 2023.

Diversos são os fatores associados ao não retorno da totalidade de passageiros no transporte público após o período de pandemia. Além da adoção do Teletrabalho por grande parte das organizações de modo definitivo, tem-se que “a pandemia evidenciou as vantagens da utilização do veículo motorizado individual como principal modo de deslocamento em detrimento do transporte público” (Vieira et al., 2021) piorando ainda mais os indicadores relacionados ao trânsito nas cidades com a ampliação do uso dos modos individuais que, por consequência, traz perdas diretas na operação do transporte coletivo, no enfrentamento de piores condições de congestionamento nos grandes centros urbanos.

Diante da situação exposta, considerando a necessidade de ampliação dos serviços, a operação de transporte público coletivo entrou em pauta em diversos centros urbanos. Assim, observa-se que o custo de transporte público tornou-se uma parte integrante na disputa por recursos estatais, resultando em cerca de 125 sistemas de transporte com algum tipo de subsídio, espalhados em 264 municípios brasileiros (Ferraz et al., 2022).

Diversas iniciativas para melhoria da qualidade e promoção de melhores condições de deslocamento aos cidadãos, incluindo iniciativas relacionadas ao controle dos custos e a otimização de operação das redes existentes surgiram como exigências dos cidadãos para promover recursos estatais na operação de transportes urbanos. Assim, tem-se ainda a ampliação de iniciativas de controle da operação de transporte público, sempre priorizando a melhoria da qualidade na operação por parte dos operadores.

Alinhada à evolução tecnológica nos últimos anos, diversos equipamentos e recursos tecnológicos foram desenvolvidos nas últimas décadas, sendo especialmente relacionados à

evolução dos sistemas de informação e do desenvolvimento tecnológico. Os Sistemas Inteligentes de Transporte (SITs) utilizam tecnologias de processamento e informação e comunicação, sensoriamento, navegação e tecnologias de controle (Silva, 2005) e possuem papel fundamental na interface de controle exigida pelos cidadãos.

Considerando o cenário apresentado, tem-se que diferentes alternativas foram consideradas pelo poder público em uma série de cenários, haja vista a particularidade de operação em cada sistema de transporte operado ao longo do país e na disponibilidade de determinados recursos tecnológicos em diversos sistemas.

PROPOSTA METODOLÓGICA

Sistema de Informação Geográfica (SIG), são sistemas computacionais aplicados a coleta, armazenamento, análise e visualização de dados espaciais, sejam eles gráficos ou alfanuméricos, possibilitando a produção de mapas temáticos, cartas topográficas, gráficos e tabelas, permitindo a unificação e cruzamentos de múltiplas informações acerca do espaço urbano, incluindo dados do sistema de transporte. Nesse contexto, a utilização do SIG desempenha um papel fundamental no planejamento e gestão do transporte público, possibilitando a obtenção de informações detalhadas do sistema, como o mapeamento dos itinerários, pontos de parada, estações e outros elementos espaciais relevantes.

No contexto específico do município de Belo Horizonte, a utilização de ferramentas SIG, tem se destacado como uma prática comum na produção e análise de dados da mobilidade urbana, através da aplicação de ferramentas *Open Source* ou Proprietárias, para o desenvolvimento de bancos de dados geoespaciais, e dados específicos como o GTFS (*General Transit Feed Especification*), que é um conjunto de arquivos contendo informações acerca do sistema de transporte em formato aberto. Entretanto ressalta-se que as maiorias das ferramentas convencionais disponíveis, incluindo aquelas atualmente utilizadas no contexto apresentado, possuem limitações na obtenção de dados de extensão, uma vez que sem a utilização de informações complementares tendem a considerar apenas a distância em terreno plano.

Em julho de 2023, foi promulgada a Lei Municipal nº 11.458/2023, que introduziu um sistema de remuneração complementar por quilômetro, como parte da estratégia de financiamento do sistema de transporte público de Belo Horizonte. Essa complementação tem como objetivo equiparar a receita proveniente da tarifa pública estabelecida, juntamente a outras receitas complementares, a fim de cobrir os custos operacionais do sistema, incluindo o ganho do prestador de serviços. Diante da necessidade de se estabelecer com certa precisão a extensão de referência para cada linha, na qual o valor da remuneração complementar será remunerada, bem como o elevado custo associado à coleta de dados de extensão em campo utilizando equipamentos de precisão, foi desenvolvida uma metodologia que combina informações dos itinerários obtidos por meio do GTFS com o Modelo Digital de Elevação (MDE) de Belo Horizonte.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação digital de um terreno ou superfície, que descreve a variação de elevação em relação a um ponto de referência geodésico, no qual é possível identificar características geográficas como montanhas, vales, rios, entre outros. Esses dados são coletados através de diferentes técnicas e equipamentos tais como, levantamento topográfico, sensoriamento por satélite, e sistemas de varredura a laser (LIDAR). Para o desenvolvimento da metodologia apresentada, utilizou-se o MDE disponibilizado pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (Prodabel), desenvolvido no ano de 2015, utilizando a técnica de processamento LIDAR, com resolução espacial de 1m para cada pixel. Essa técnica envolve o envio de pulsos a partir de uma aeronave ou drone em direção a uma superfície e a medição do tempo que esse pulso leva para retornar ao sensor, permitindo o cálculo da distância e consequentemente a variação topográfica da superfície.

Figura 3: Modelo Digital de Elevação (MDE) de Belo Horizonte



Fonte: PRODABEL, 2015.

Diante do exposto, o processo metodológico apresentado, tem como objetivo corrigir a extensão da projeção no plano do traçado, levando em consideração a declividade, através da manipulação das informações por meio do software QGIS.

A primeira etapa para a geração dessa informação envolveu a obtenção da geometria que representa o traçado das linhas de transporte público, utilizando o formato GTFS (General Transit Feed Specification) disponibilizado no portal de dados abertos da prefeitura de Belo Horizonte. Esses dados foram extraídos do arquivo "shapes", que inicialmente continha informações alfanuméricas. Após a manipulação, essas informações foram convertidas em um arquivo vetorial de linhas.

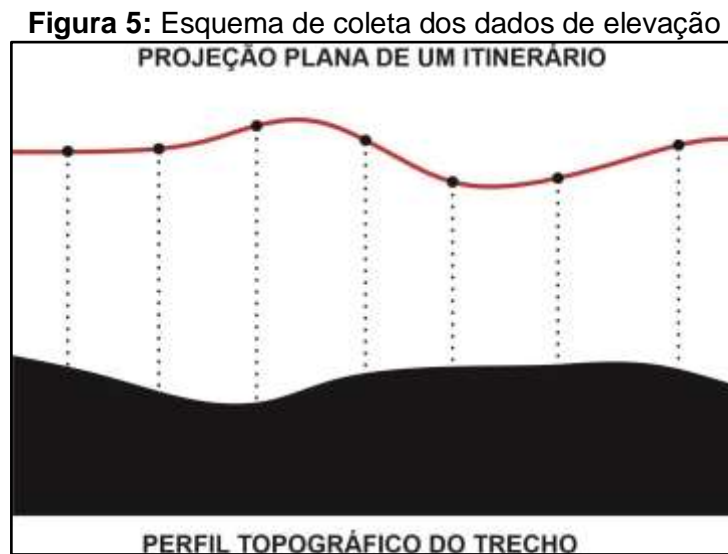
Em seguida, foram gerados nós ao longo de cada traçado, com uma equidistância de 1 metro entre eles, utilizando uma ferramenta de processamento de geometria disponível no software. Esse passo tem como objetivo permitir o cruzamento do traçado com o Modelo Digital de Elevação (MDE). A Figura 4 ilustra a distribuição dos nós gerados em um trecho de uma rota como exemplo.

Figura 4: Nós gerados com equidistância de 1 metro



Fonte: Elaboração própria

A partir da nova camada geográfica gerada, contendo os nós, obteve-se o valor da cota altimétrica para cada posição (coordenada), através da amostragem de valores do arquivo raster do MDE. A Figura 5, apresenta um esquema de como os dados de elevação são atribuídos a um nó.



Por fim, após a atribuição da cota altimétrica de cada nó que compõe o itinerário de cada rota, e considerando que os nós estão identificados e organizados de forma sequencial, os valores da extensão entre cada um dos nós foi corrigida para extensão real conforme a seguinte fórmula:

$$E = \sum_i^I \sqrt{1 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

Onde:

E é a extensão do itinerário da linha, sublinha e ponto de controle;

y_i é a cota do segmento i do itinerário da linha, sublinha e ponto de controle;

i é o segmento do itinerário da linha, sublinha e ponto de controle e;

I é o número de segmentos de um metro da projeção horizontal da extensão da linha, sublinha e ponto de controle.

RESULTADOS

Considerando a metodologia exposta e a necessidade de adequação das extensões dos itinerários no momento de início do processo de subsídio do município, foram estudados determinados trechos para verificação dos valores de extensão. Para tal, foram realizadas medições em diferentes trechos viários do município com características distintas e, comparados os dados com informações provenientes do sistema de GPS dos veículos. Ressalta-se que para o primeiro segmento do itinerário, ou seja, o trecho compreendido entre o nó sequencial 1 e 2, adotou-se a extensão de 1 metro.

A Tabela 1, apresenta um exemplo dos dados de Cota Altimétrica, Desnível, Extensão com a Projeção Plana e Extensão Real, enquanto a Tabela 2, apresenta o resultado obtido para o itinerário da linha 3050 (Estação Diamante/Hospitais via BH Shopping).

Tabela 1: Exemplo de aplicação do cálculo para correção da extensão

Identificador do trecho	Linha	Cota altimétrica (m)	Desnível (m)	Extensão plana (m)	Extensão calculada (m)
1	3050-01I	971,5446777	0,000	1	1,000000
2	3050-01I	971,5480957	0,003	1	1,000006
3	3050-01I	971,5490112	0,001	1	1,000000
4	3050-01I	971,5490112	0,000	1	1,000000
5	3050-01I	971,5407104	-0,008	1	1,000034
6	3050-01I	971,5037842	-0,037	1	1,000682
7	3050-01I	971,5172119	0,013	1	1,000090
8	3050-01I	971,4921265	-0,025	1	1,000315
9	3050-01I	971,4800415	-0,012	1	1,000073
10	3050-01I	971,4937744	0,014	1	1,000094
11	3050-01I	971,4818726	-0,012	1	1,000071
12	3050-01I	971,4650879	-0,017	1	1,000141
13	3050-01I	971,4650879	0,000	1	1,000000
14	3050-01I	971,4281006	-0,037	1	1,000684
15	3050-01I	971,4169922	-0,011	1	1,000062
TOTAL				20	15,002251

Tabela 2: Resultados do método para a Linha 3050

Linha	Extensão Plana (m)	Extensão calculada (m)
3050	41.916	42.025

Para validar os dados obtidos com base na metodologia proposta, foram conduzidos dois testes de campo empregando um ônibus do modelo Padron, que percorreu as rotas especificadas das linhas 3050 - Estação Diamante/Hospitais via BH Shopping e 3055 - Estação Barreiro/Savassi via BHShopping. Durante essas avaliações, o veículo completou todo o itinerário de cada rota, simulando o processo de embarque e desembarque em todos os pontos de parada ao longo do percurso, possibilitando a medição precisa da distância percorrida utilizando o Tacógrafo Digital do veículo. A Tabela 3, apresenta os dados coletados pelo teste em campo, comparando com o valor encontrado a partir da aplicação da metodologia proposta.

Tabela 3: Resultados do teste de Validação

Linha	Metodologia (m)	Tacógrafo (m)	Variação percentual
3055	41.398	42.200	1,90%
3050	42.025	43.000	2,27%

Com base nos dados apresentados e considerando o contexto do trajeto, envolvendo a simulação da operação de embarque e desembarque em todos os pontos de parada, resultando em um aumento na extensão final percorrida devido às mudanças frequentes de faixa de circulação, a precisão do método implementado mostrou-se adequada para a utilização da como extensão referencial das linhas. Possibilitando a incorporação desses dados na definição das ordens de serviço das linhas que compõem o sistema de transporte de Belo Horizonte.

A definição das extensões referenciais, desempenha um papel crucial no processo de cálculo da remuneração complementar, sendo fundamental para validar as viagens a serem remuneradas e determinar o valor a ser efetivamente pago. Um exemplo é apresentado na Tabela 4, que demonstra a apuração de um conjunto de viagens realizadas em 30/08/2023. Para que uma viagem seja considerada efetivamente realizada, a extensão apurada com base nos dados do sistema inteligente de transporte (SITBUS) e do mapa de controle operacional (MCO) deve representar no mínimo 90% da extensão referencial da respectiva linha, conforme estipulado na Portaria SUMOB 024/2023. Essa validação é essencial para garantir a precisão e a equidade no processo de remuneração.

Tabela 3: Apuração da Quilometragem para a Remuneração Complementar

Data	Linha	Horário	Extensão Realizada	Extensão Referencial	Varição Extensão	Validação	Extensão Remunerada
21/08	3050	13:58	0	42,026	-100	Não Validada	0
21/08	3050	18:16	6,617	42,026	-84,25	Não Validada	0
21/08	3050	4:20	41,637	42,026	-0,93	Não Validada	42,026
21/08	3050	4:40	41,699	42,026	-0,78	Não Validada	42,026

CONCLUSÕES

A obtenção precisa de dados relacionados à extensão das rotas de transporte é fundamental para calcular os custos de operação, estabelecer tarifas justas e embasar políticas públicas eficazes. Nesse sentido, este estudo apresentou uma metodologia para a obtenção de informações precisas sobre a extensão das rotas de ônibus, levando em consideração não apenas a quilometragem percorrida, mas também a inclinação do terreno. Uma das principais vantagens desse método é a rapidez na coleta de dados, aproveitando informações de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Modelos Digitais de Elevação (MDE) para calcular as extensões das rotas, resultando em economia substancial de recursos em comparação com a coleta de campo, que pode ser demorada e dispendiosa.

Com a implementação deste método para a definição das extensões das rotas de transporte, espera-se aumentar a capacidade de realizar atualizações de dados de forma rápida e contínua, permitindo uma adaptação ágil às alterações na rede de transporte. Isso não apenas manterá as informações sempre precisas, mas também viabiliza um acompanhamento constante dos custos do sistema e da remuneração complementar paga às concessionárias. Essa agilidade na obtenção de dados proporcionará uma base sólida para a tomada de decisões de forma ágil em resposta às mudanças nas demandas dos passageiros contribuindo, assim, para a melhoria contínua do sistema de transporte urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIARDI, YARA CRISTINA LABRONICI; ZIONI, SILVANA; GOMES, THIAGO VON ZEIDLER. Os efeitos colaterais da Pandemia do Covid-19: da redução drástica de passageiros à ascensão da Tarifa Zero e da estruturação do Sistema Único da Mobilidade. Anais do XX ENANPUR. Belém, 2023.

BELO HORIZONTE. Lei nº 11.458, de 17 de março de 2023. Dispõe sobre o controle, a gestão e a transparência dos valores arrecadados para custeio da prestação de serviços de transporte público coletivo de passageiros por ônibus no Município no âmbito dos contratos de concessão e permissão vigentes. Diário Oficial do Município, Belo Horizonte, MG, 15 set. 2023.

BELO HORIZONTE. Portaria SUMOB 024, de 27 de julho de 2023. Regulamenta o disposto no Decreto nº 18.370, de 7 de julho de 2023 para definição das extensões dos itinerários do sistema de transporte coletivo convencional e suplementar de passageiros por ônibus do Município de Belo Horizonte e as implicações para a validação relacionada a remuneração complementar das viagens. Diário Oficial do Município, Belo Horizonte, MG, 15 set. 2023.

EMPRESA DE INFORMÁTICA E INFORMAÇÃO DO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE (Belo Horizonte). Modelo Digital de Elevação - LIDAR. Belo Horizonte: PRODABEL, 2015. RASTER.

FERRAS, Adriana; JORGE, Alex; SCHELLER, João. Estados e municípios ampliam subsídios para transporte. Publicado em 27/6/2022. Disponível em: <http://www.antp.org.br/noticias/clippings/estados-e-municipios-ampliam-subsidios-para-transporte.html>. Acesso em: 20/07/2023.

NTU. Anuário NTU: 2022-2023 / Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. - Brasília: NTU, 2023.

PIRES, Ailton Brasiliense; NÉSPOLI, Luiz Carlos. Transporte público: qualidade, custo e tarifa zero. Revista dos Transportes Públicos-ANTP-Ano 35, páginas 5 a 8, 2013.

RAYLE, L., DAI, D., CHAN, N., CERVERO, R., e SHAHEEN, S. (2016) Just a better taxi? A survey-based comparison of taxis, transit, and ridesourcing services in San Francisco. *Transport Policy*, v. 45, p. 168-178

SILVA, Danyela Moraes. Sistemas Inteligentes no Transporte Público Coletivo por ônibus. UFSC. Porto Alegre, 2005.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. Urban change, mobility and transport in São Paulo: three decades, three cities. *Transport Policy*, v. 12, n. 2, p. 91-104, 2005.

VIEIRA, Jéssica da Silva et al. Como a COVID-19 afetou as preferências de mobilidade urbana? Análise fatorial exploratória do perfil de deslocamento antes, durante e depois da pandemia no Brasil. Anais do 35º ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2021.