

MODELAGEM DO RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO URBANO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Nara Gabriela de Mesquita Peixoto
Mário Angelo Nunes de Azevedo Filho

Universidade Federal do Ceará (UFC)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)

RESUMO

O tráfego rodoviário induz a poluição sonora, o que acarreta impactos negativos na saúde humana. O mapeamento de ruído urbano tem sido utilizado na compreensão do fenômeno, formulação de planos de mitigação e avaliação de intervenções. O objetivo desta revisão da literatura é apresentar as ferramentas e os parâmetros atualmente utilizados na modelagem da poluição sonora relacionada ao tráfego rodoviário urbano. Foram analisados 274 estudos, sendo destacadas contribuições relevantes, incongruências e lacunas de pesquisa. Verificou-se que os softwares comerciais são amplamente utilizados, embora estudos recentes apontem o crescimento do uso de pacotes de código aberto, incluindo suplementos para sistemas de informação geográfica (SIG). Estes sistemas possibilitam integração com diversas bases de dados e a rápida implementação de novos modelos de predição. Os atributos mais usados são volume, velocidade, porcentagem de veículos pesados, pavimento, geometria da via e forma das edificações. No caso brasileiro, ressalta-se a pouca utilização de SIGs e a falta de estudos de fatores comportamentais como, por exemplo, o uso de buzinas.

ABSTRACT

Road traffic induces noise pollution, which have negative impact on human health. To address this problem, urban noise mapping is important in order to understand the phenomenon, formulate mitigation plans and evaluate interventions. The purpose of this literature review is to present the tools and parameters currently used in noise pollution modeling related to urban road traffic. 274 studies were analyzed, highlighting relevant contributions, inconsistencies and research gaps. It was observed the extensive use of commercial software but, recent studies, indicate the use of geographic information systems (GIS) with specific developed supplements. These systems allow better integration with different databases and implementation of new prediction models. They generally use attributes such as volume, speed, percentage of heavy vehicles, pavement type, road geometry and buildings shape. In the Brazilian case, it is highlighted the still little use of GIS software and the lack of studies about behavioral factors, such as the use of car horns.

1. INTRODUÇÃO

O intenso crescimento urbano ocorrido nas últimas décadas vem resultando no aumento do fluxo de veículos, o que gera efeitos indesejáveis como a poluição sonora. O ruído do tráfego veicular é um dos mais agressivos, devido ao seu predomínio em relação aos demais, como no caso do tráfego aéreo e das indústrias. A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018) apresenta evidências que a exposição ao ruído urbano esteja relacionada a prejuízos na saúde humana, como deficiência auditiva, doenças cardiovasculares, alterações no metabolismo, dificuldades de aprendizagem, distúrbios do sono e irritabilidade.

Para minimizar os efeitos da poluição sonora sobre o bem-estar da comunidade, a modelagem de ruído tem sido utilizada para compreensão do fenômeno, formulação de planos de mitigação e avaliação de intervenções. Na Europa, a Directiva 2002/49/EC de Ruído Ambiental (END, 2002) exige o mapeamento para grandes e médias cidades. Segundo essa norma, a avaliação e gerência do ruído ambiental deve incluir mapa estratégico de ruído (MER), estimativa da população exposta, planejamento das ações de ruído e divulgação dos resultados. Para elaboração dos mapeamentos, Kurra e Dal (2012) indicam os tipos de dados a serem coletados, classificando-os em atributos das fontes, aspectos físicos do meio e informações demográficas.

Khan *et al.* (2018) realizaram uma revisão sistemática da literatura sobre métodos de avaliação conjunta da poluição sonora e atmosférica, mas nenhum dos estudos selecionados foi realizado na América Latina. Essa falta de visibilidade é acentuada pelo fato de que países como o Brasil não possuem diretrizes específicas para a modelagem de ruído, sendo necessárias adaptações de modelos e práticas provenientes de outros países. Como são distintas as características do meio urbano e do tráfego de veículos, esses modelos podem não representar de maneira adequada a realidade local. Além disso, Brasileiro *et al.* (2018) indicam que, no Brasil, poucas entidades governamentais têm realizado esse tipo de estudo, cabendo a trabalhos acadêmicos levantar a discussão sobre o tema.

O objetivo deste estudo é realizar uma revisão da literatura sobre as ferramentas e os parâmetros atualmente utilizados na modelagem da poluição sonora relacionada ao tráfego rodoviário urbano. Para isso, foram selecionados estudos que realizam mapeamento, utilizam modelos de predição de ruído ou investigam a influência dos atributos urbanos na emissão e propagação sonora. Uma análise crítica é realizada apontando as contribuições trazidas pelos estudos mais relevantes, como também incongruências, lacunas de pesquisa e desafios para o mapeamento sonoro no Brasil.

2. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura baseado no modelo PRISMA (Moher, 2015). Trata-se de uma investigação que visa identificar, selecionar, avaliar e sintetizar as evidências relevantes disponíveis. Foram selecionados artigos publicados em revistas, congressos, dissertações e teses produzidos entre janeiro de 2000 e julho de 2020. Priorizou-se o idioma inglês, sendo selecionados estudos nos idiomas português e espanhol para maior alcance de pesquisas na América Latina. No caso de dissertações e teses, somente foram selecionados estudos em português, o que representa um viés de busca para trabalhos brasileiros.

A primeira etapa consistiu na busca por títulos dos trabalhos (Figura 1). Foram definidas palavras chave e realizadas buscas nas plataformas *Science Direct*, *PubMed*, *SciELO* e *Google Scholar*. As palavras-chave se basearam nos objetivos da pesquisa, sendo identificados a população de estudo (meio urbano e transporte rodoviário), a intervenção (atributo, modelo e mapeamento) e o resultado esperado (modelagem de ruído). Foram utilizadas combinações entre os termos *Noise*, *Acoustic*, *Environmental*, *Urban*, *Transportation*, *Road*, *Traffic*, *Road characteristics*, *Pollution*, *Modelling*, *Mapping*, *Prediction*, *Simulation*, *Parameters* e *Index*. Assim como Khan *et al.* (2018), também foi investigado o uso de softwares SIG (sistema de informação geográfica), sendo este outro viés de busca.

Na segunda etapa, foi realizada a seleção pela leitura dos resumos. Foram excluídos estudos que não utilizaram modelagem ou não investigaram relações entre os atributos urbanos e os níveis de ruído. Outra seleção excluiu estudos semelhantes realizados na mesma cidade por um ou mais autores em comum. Foram analisadas informações sobre o tipo de software, modelo de cálculo, método de formulação dos modelos, atributos utilizados, critério de validação, tamanho da amostra coletada e tipo de interpolação espacial. Ao todo foram analisados 274 trabalhos, os quais 69 foram selecionados para análise com base na relevância das evidências e validações dos modelos. Esses trabalhos foram categorizados em 3 grupos:

- Estudos que realizam mapeamento acústico, sendo subdividido em estudos que utilizaram Software Comercial ou SIG.
- Estudos que não realizam mapeamento, mas utilizam algum modelo determinístico existente ou propõem um modelo estocástico.
- Estudos que não utilizam ou formulam técnicas de modelagem, mas investigam a influência dos atributos urbanos e de tráfego na emissão e propagação do ruído.

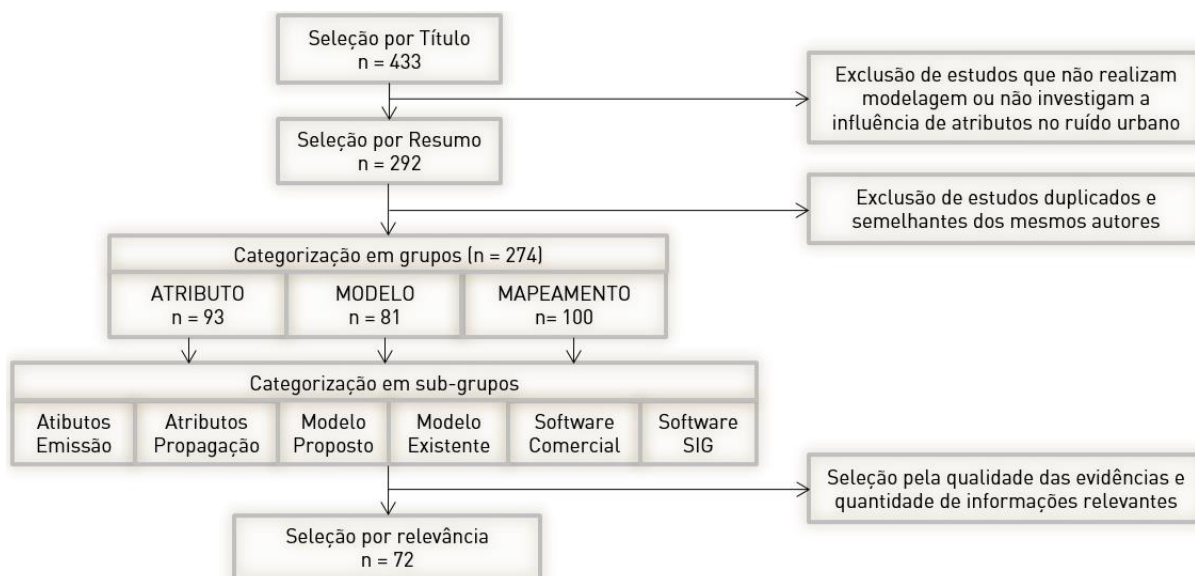


Figura 1: Critérios de busca, exclusão e categorização dos estudos

3. RESULTADOS

3.1 Características gerais dos estudos selecionados

Dos 274 estudos selecionados na penúltima etapa, 46 são brasileiros, 16 são dissertações/teses e 60% estão no idioma português. Na América latina se destacam Brasil, Chile e Colômbia. Países europeus lideram em quantidade e qualidade das pesquisas. Destacam-se também estudos da China que utilizam SIG, microsimulação e dados de aplicativos móveis. Já Índia, Iran e Turquia se destacam em estudos que formulam modelos ou buscam compreender a influência de diferentes tipos de veículos no ruído, com o uso de motocicletas e buzinas.

Para a formulação dos MER, a Diretiva Europeia (END, 2002) indica o uso do índice Lden. Esse índice se baseia em medições durante o período do dia (07:00 às 19:00) e aplica penalidade de 10 dB(A) para período do entardecer (19:00 às 23:00) e 5 dB(A) para o período da noite (23:00 às 7:00). Utiliza-se a escala de ponderação A, que aplica correções dos espectros de frequência de acordo com a percepção do ouvido humano. Nas medições sonoras, utiliza-se o índice LAeq, que representa a média de ruído equivalente ao tempo de medição. Também são utilizados os níveis estatísticos L10 (ruído de pico) e L90 (ruído de fundo), que representam os valores em dB(A) que foram extrapolados durante 10% e 90% do tempo, respectivamente. O índice TNI (*traffic noise index*) se baseia nesses índices estatísticos e é utilizado para caracterizar o incômodo gerado pelo tráfego de veículos (Agarwal e Swami, 2010).

O número de coletas e o tempo de medição das amostras usadas para validação dependem das características do tráfego local. No meio urbano, vários fatores podem influenciar o tráfego de veículos, sendo indicado o tempo mínimo de medição de 10 minutos (CETESB, 2009). Embora

alguns dos estudos analisados adotem 3 ou 5 min, a maioria adota tempos de 1h ou 2hs por local, divididas em períodos de 10 ou 15min. Quanto à altura de medição, a NBR 10151 (ABNT, 2019) recomenda 1,2 e 1,5m do solo.

Para validação da modelagem, os indicadores mais utilizados são o Índice de Pearson (R^2), a diferença entre valores modelados e medidos (erro), o erro quadrático médio (MSE) e o formato da distribuição dos erros. Debnath e Singh, (2018) indicam R^2 acima de 0,7 como aceitáveis, enquanto Paz e Zannin (2010) consideram correlações acima de 0,6 como fortes e acima de 0,9 como muito fortes. O erro crítico para uma porcentagem de 90% ou 95% dos dados variou bastante entre os estudos. Kephelopoulos, *et al.* (2014) recomendam erros de até 2.0 dB(A). Já a Comissão Européia, que avalia a exposição ao ruído (WG-AEN, 2007), admite acurácia de 4 dB(A) quando não são realizadas medições, mas utiliza-se dados oficiais do fluxo de tráfego para vias típicas. Muitos estudos brasileiros admitem erro de até 4,6 dB(A) (Fiedler e Zannin, 2015; Guedes *et al.*, 2011), o que é considerado um valor muito alto já que, a cada 3dB(A) de acréscimo, a potência sonora é duplicada.

3.2 Mapeamento de ruído

A maioria dos mapeamentos sonoros utiliza softwares comerciais especializados na predição de ruído ambiental. Com interface simples, podem trazer módulos de simulação de ruído (por exemplo, Cnossos, RLS90, NMPB) e poluição atmosférica (por exemplo, MluS-92). Os mais utilizados são Soundplan (Gomez *et al.*, 2015), Cadna-A (Suárez e Barros, 2014) e Predictor (Fiedler e Zannin, 2015), havendo pesquisas que demonstram a equivalência de desempenho entre eles (Arana *et al.*, 2010). Como desvantagem, pode-se destacar o custo de aquisição, o alto tempo de processamento e o fato de não permitirem a incorporação de modelos estocásticos, o que limita o desenvolvimento de adaptações às condições de cada localidade. No Brasil, mapeamentos foram realizados nas cidades de Natal (Florencio, 2018), na Figura 2b, Fortaleza (Ary Junior, 2018), Florianópolis (Nardi, 2008), Curitiba (Fiedler e Zannin, 2015), Rio de Janeiro (Pinto e Mardones, 2009) e São Paulo (Poizzer e Holtz, 2018).

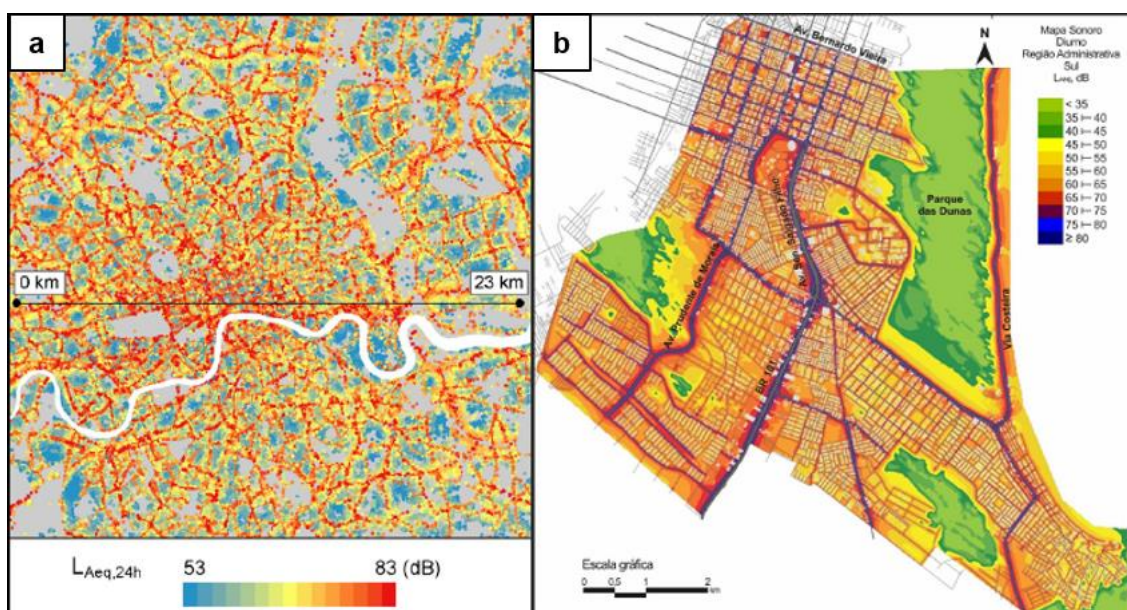


Figura 2: Exemplo de mapas realizados com software (a) GIS na escala da cidade em Londres (Fecht *et al.*, 2016) e (b) SoundPlan na escala do bairro em Natal (Florencio, 2018).

Como alternativa a essas limitações, os programas SIG de código aberto estão sendo cada vez mais aplicados (Szopinska, 2017). A vantagem do SIG é permitir armazenar, analisar e manipular diferentes tipos de dados espaciais, proporcionando uma integração direta com diversos tipos de dados. Como desvantagem, os procedimentos atuais adotam premissas que podem causar erros maiores que os aceitáveis (Dídac, *et al.* 2017), como a modelagem 2D ao invés da 3D e a desconsideração de efeitos de difração e reflexão da onda sonora (Bocher, *et al.*, 2019). O programa mais utilizado é o ArcGIS que, embora seja também um software comercial, possui ferramentas de visualização espacial como o ArcView (Tang e Wang, 2007), ArcScene e ArcMap (Murphy *et al.*, 2006). Fecht *et al.* (2016) utilizou o plugin tranex (Gulliver *et al.*, 2015) para elaborar o MER de Londres (Figura 2a). Softwares livres como o QuantumGIS (QGIS) e OrbisGIS também foram utilizados, com a elaboração dos plugins Openoise (ArpaPiemonte, 2019) e o Noisemodelling (Bocher et al., 2019), respectivamente.

Apenas seis trabalhos brasileiros, encontrados nesta pesquisa, utilizam SIG e a maioria não faz menção a um modelo de predição de ruído. São feitas medições sonoras e esses valores são interpolados para gerar o mapa (Costa e Lourenço, 2011). A interpolação espacial é um processo de estimação de valores a partir de um conjunto de valores conhecidos. Esse procedimento pode exigir um grande número de coletas a depender da escala e da complexidade do local. Murphy *et al.* (2006) compararam mapas de ruído elaborados com o ArcGis utilizando 3 tipos de interpolação: Vizinheiro Mais Próximo, interpolação ponderada pela distância (IDW) e Krigagem. O primeiro método obteve melhores resultados, embora não tenham sido verificadas diferenças significativas. Zuo *et al.* (2016) e Harman *et al.* (2016) indicam uso de Krigagem quando há uma malha irregular de pontos. Já nos casos em que há um grande número de pontos uniformemente distribuídos, o IDW fornece resultados satisfatórios (Farcas e Sivertun, 2014). Entretanto, em alguns estudos realizados com IDW pode-se observar pequenos picos e poços em torno dos pontos da amostra (Harman, *et al.* 2016; Penteadó *et al.* 2018).

3.3 Modelos de predição

Alguns países decidiram regulamentar o uso de modelos, estabelecendo diretrizes para a simulação de ruído. Os modelos mais utilizados no mapeamento brasileiro são o CNOSSOS da União Européia, o RLS90 da Alemanha, o CRTN do Reino Unido e o NMPB na França (Tabela 1). A formulação desses modelos parte de uma situação padrão com veículos leves, velocidade constante, pavimento asfáltico, temperatura 20°C e outros fatores. A partir disso, são adicionadas correções de acordo com as diversas interferências dos atributos considerados. Garg e Maji (2014) fizeram uma revisão dos principais modelos de predição de ruído, ressaltando que a melhor abordagem para uso de autoridades urbanas deve ser uma metodologia harmonizada, com abordagem simples, menos demorada e com clareza quanto aos níveis de incerteza. No Brasil, Calixto *et al.* (2003) indicam o uso do RLS90 enquanto Melo *et al.* (2015) e Pozzer e Holtz (2018) indicam, respectivamente, que os modelos CRTN e CNOSSOS tem melhor adequabilidade.

A emissão de ruído nesses modelos se baseia em fatores de equivalência em veículos leves. No RLS90, a pressão sonora de um veículo pesado é equivalente a 20 vezes a pressão de um veículo leve. Já no CRTN, essa relação varia entre 4,5 e 14 vezes, a depender da velocidade (Arana *et al.*, 2010). Enquanto o CNOSSOS utiliza 5 categorias de veículos, outros modelos como RLS90, CRTN e NMPB utilizam somente 2 categorias. Nesses últimos modelos, as motocicletas são representadas como veículos leves. Apesar disso, a adaptação desse tipo de veículos nas demais categorias variou nos estudos brasileiros. Nardi (2008) e Florencio (2018)

consideram que as motocicletas equivalem a veículos pesados, enquanto Ari Junior *et al.* (2018) representam 2% da frota de motocicletas como veículos pesados. Isso indica a necessidade de estudos nacionais como o de Guedes (2018), que testa fatores de emissão para diferentes veículos.

Tabela 1: Uso de atributos e correções máximas aplicadas nos modelos

Atributo	Descrição	CNOSSOS	NMPB	CRTN	RLS90	% de uso modelos estocásticos
Atributos da fonte (emissão)						
Volume	Fluxo de veículos/hora	✓	✓	✓	✓	98%
% Pesado	Proporção de veículos pesados	✓	✓	✓	✓	76%
Outros veículos	Quant. de categorias de veículos	5	2	2	2	39%
Velocidade	Velocidade máxima ou média	Média	Max	Max	Max	61%
Acelerações	Distância ao semáforo ou rotatória	✓	✓	-	✓	11%
Buzina	Uso de buzinas	-	-	-	-	11%
Atributos do meio urbano (propagação)						
Edificações	Altura ou densidade de edificações	✓	✓	-	✓	17%
Geometria da via	Largura ou Número de faixas da via	✓	✓	✓	✓	28%
Gradiente	Declividade longitudinal ou curvas na via	✓	✓	✓	✓	13%
Vegetação	Cobertura do solo ou vegetação	✓	✓	-	✓	2%
Meteorológicos	Umidade, temperatura e vel. ventos	✓	✓	-	✓	11%
Pavimento	Quant. de categorias de pavimentos	15	3	3	5	15%

Devido a esta e outras limitações, alguns estudos propõem adaptações a esses modelos. Na Colômbia, Quiñones-Bolaños *et al.* (2016) adicionaram categorias de motocicletas e adotaram distribuição de velocidades para as categorias de veículos. Na Indonésia, Hustim *et al.* (2018) propuseram uma alteração no modelo RLS90 que acrescentou o efeito de buzinas. Outros estudos desenvolveram modelos estocásticos, onde são feitas relações estatísticas entre os efeitos (níveis de ruído) e causas (velocidade, volume, etc). Ramírez e Domínguez (2013) obtiveram um RMSE próximo de 1 dB(A) com o modelo estocástico, enquanto o RMSE dos modelos determinísticos variou entre 1,7 e 3,6 dB(A). Ressalta-se que os modelos estocásticos, geralmente, são particulares a cada via e suas condições de tráfego, o que dificulta a generalização para diferentes locais.

O método mais utilizado é a Regressão Linear Múltipla (Aguilera *et al.*, 2015), onde as correlações são feitas entre os atributos e os níveis sonoros medidos. Em seguida, essas relações são extrapoladas para estimar os valores em diferentes momento e locais. Muitos modelos também são formulados através de algoritmos genéticos (AG) e Redes Neurais Artificiais (RNA). AG são procedimentos heurísticos de busca e otimização, baseados em analogias com a genética e a teoria da evolução, recomendados para aplicação em áreas mais complexas e com maior variabilidade nos padrões de tráfego (Cirianni e Leonardi, 2012; Rahmani *et al.*, 2011). Já as RNA são inspiradas na estrutura e no aspecto funcional da rede neural biológica e têm sido amplamente utilizadas na elaboração de modelos (Kumar *et al.*, 2014; Souza e Giunta, 2011). Os dados são treinados, permitindo o aprendizado de padrões de relacionamento entre variáveis de entrada e saída. Com isso, o modelo é capaz de simular novos valores de saída ao observar diferentes valores de entrada. Esse método oferece melhor desempenho do que a solução clássica baseada em regressão (Singh *et al.* 2016). Isso foi atribuído à capacidade da RNA de modelar funções não lineares e fatorar uma grande quantidade de parâmetros, o que

leva à incorporação de mais atributos (Givargis e Karimi, 2010). Por outro lado, há um aumento no custo computacional de implementar os diferentes modelos (Torija e Ruiz, 2015).

A microssimulação também é utilizada para formular, adaptar modelos e compreender a influência dos atributos no fenômeno acústico. Muitos estudos utilizam os softwares Paramics (Coensel *et al.*, 2012; Feng Li *et al.*, 2017), VISSIM (Xiaodong Lu, *et al.*, 2019) e VISUM (Hustim, *et al.* 2018). Os modelos do tipo *car-following* utilizam técnicas estocásticas para o fluxo de tráfego e funções de distribuição que alocam parâmetros de tráfego para cada veículo gerado nas entradas da rede. Entretanto, para a elaboração de MER's, os modelos macroscópicos parecem suficientes na estimação dos níveis LAeq.

3.4 Atributos utilizados na Modelagem

3.4.1 Atributos da fonte emissora

A Tabela 1 apresenta a porcentagem de estudos que utilizam os parâmetros urbanos. Os atributos de tráfego são aqueles relacionados a emissão sonora dos veículos e os mais utilizados são: volume, velocidade, acelerações, declividades da via, composição da frota e os relacionados ao comportamento do motorista. Volume e porcentagem de veículos pesados se desatacam, estando esse último altamente relacionado ($R^2 = 0,916$) com o índice L10 (Abou-Qudais e Alhiary, 2007). O aumento da proporção de caminhões em 2% gera um aumento do ruído do tráfego entre 1,1 dB(A) e 1,8 dB(A) sendo maior o impacto em vias de menor tráfego.

Nas situações de fluxo livre, o valor de LAeq aumenta conforme cresce o volume e velocidade dos veículos (Rodrigues, 2016). O máximo valor LAeq ocorre próximo ao grau de saturação da via, superando os níveis sonoros nos regimes de fluxo acelerado, fluxo livre e congestionamento saturado (Zefreh e Torok, 2018). Nas situações de tráfego saturado, há uma diminuição dos níveis LAeq devido a diminuição das velocidades (Makarewicz e Gałuszka, 2011) e as acelerações impactam mais os níveis sonoros do que as desacelerações (Feng Li *et al.*, 2017). Coensel *et al.* (2012) verificaram que o LAeq diminui em até 1 dB(A) nas proximidades da interseção, mas aumenta até 1,5 dB(A) entre os cruzamentos. Verificou-se que a intensidade do tráfego e a onda verde tiveram a maior influência nas emissões, enquanto o tempo do ciclo não teve uma influência significativa. Esses efeitos são intensificados em vias com declividades superiores a 5% ou 6%, a depender o modelo adotado (Garg e Maji, 2014).

A depender do local do estudo, essas relações não são válidas devido, entre outros aspectos, a composição da frota e ao comportamento do condutor (Jamalizadeh *et al.*, 2018). Pal e Sarkar (2012) compararam cidades no Vietnã, onde 90% da frota é composta por motocicletas, e no Japão, onde a frota é majoritariamente composta por carros. Os níveis de ruído vietnamitas foram superiores, em especial, devido ao uso de buzinas. Apesar disso, os vietnamitas demonstraram menor incômodo ao ruído que os japoneses. Estudos indianos indicam que o uso de buzinas acrescenta de 1 a 4 dB(A) no LAeq, a depender da velocidade dos veículos (Vijay *et al.*, 2018) e do grau de saturação do tráfego (Kalaiselvi e Ramachandraiah, 2016). Buzinas de veículos pesados pode causar valores ainda maiores, com variações de 3 a 6 dB(A) (Aditya e Chowdary, 2020). No Brasil, Forcetto (2016) identificou que homens jovens são os maiores usuários de motocicletas, o que está relacionado com uma direção mais agressiva. O motorista busca maiores acelerações e utiliza o motor em rotações mais altas. Adicionando a mudança do escapamento de veículos e sons impulsivos de buzinas, esse comportamento pode gerar até 15 dB(A) a mais de ruído que uma pilotagem padrão (ACEM, 2014).

3.4.2 Atributos do meio urbano

No meio urbano, a propagação da onda sonora é fortemente atenuada pelos efeitos de difração, reflexão e absorção de superfícies. A geometria da via é o fator mais utilizado por modelos estocásticos, através de atributos como largura da via, declividade e número de faixas. Vias mais largas possuem maior capacidade de tráfego, o que induz o aumento do volume de veículos e, conseqüentemente, do LAeq. Por outro lado, aumentando-se a largura, menos veículos trafegam em grupos, o que diminui efeitos da interação entre veículos e induz a uma redução da intensidade sonora (Xiaodong Lu *et al.*, 2019).

Os principais atributos relacionados a edificações são a altura e quantidade de vazios entre edifícios (Guedes, 2011). Outros indicadores encontrados foram Taxa de Ocupação (Souza e Giunta, 2011), Tempo de Reverberação (Penteado, 2018) e Rugosidade (Moura *et al.*, 2016). O modelo RLS90 considera o efeito de múltiplas reflexões quando há, no máximo, 30% de vazios entre as edificações, aplicando correções de até +3,2 dB(A) (Garg e Maji, 2014). Os *canions* urbanos ocorrem quando a relação entre altura das edificações e largura da via é maior que 0,5 (Aguiar *et al.*, 2017). Podem acentuar a intensidade sonora, desenvolver microclimas e causar variações de até 7,0 dB(A) para os pedestres (Sanchez *et al.*, 2016). Por outro lado, em regiões com maior densidade construída, os edifícios se comportam como obstruções à propagação do ruído de tráfego. Isso atenua o nível sonoro nas vias adjacentes e cria regiões de Sombra Acústica nos espaços internos aos blocos.

Barreiras naturais verdes não possuem grande efeito na redução dos níveis de ruído. Faz-se necessária uma faixa de 5 m de largura para reduzir o ruído do tráfego (Renterghem, 2018). Entretanto, há evidências que os benefícios do uso de vegetação estejam no campo psicológico, dependendo da aparência da barreira e não apenas da redução real alcançada (Ow e Ghosh, 2017). Além disso, a vegetação pode causar diminuição da temperatura local e há indícios de correlação entre o conforto térmico e acústico em espaços públicos abertos (Hirashima, 2014). Na cidade de Delhi, Singh *et al.* (2013) verificou que a vegetação ($R^2 +0,68$), velocidade do vento ($R^2 -0,21$) e a umidade relativa ($R^2 -0,1$) contribuem positivamente na atenuação dos níveis de ruído, enquanto a temperatura ($R^2 +0,31$) causa um aumento dos níveis. As baixas correlações de efeitos meteorológicos podem ser explicadas porque há maior atenuação em alturas superiores a 5m do solo, quando podem gerar diferenças de até 1 dB(A). Recomenda-se medições sonoras quando a velocidade dos ventos não supera 5m/s (ABNT, 2019)

3.4.3 Tipo de pavimento

O tipo de pavimento influencia tanto a emissão quanto na propagação do ruído. O ruído gerado pelo contato do pneu com o pavimento é o resultado de dois componentes: ruído aerodinâmico (relacionado à porosidade do revestimento) e ruído mecânico (relacionado à textura do revestimento). A contribuição cresce com a velocidade e densidade de tráfego, rugosidade dos pneus, idade e tipo do pavimento (Freitas *et al.*, 2012). A partir de 50km/h os efeitos dessa interação são mais perceptíveis.

Ohiduzzaman *et al.* (2016) apresentam uma revisão de métodos de medição e técnicas usadas para reduzir o ruído no pavimento. Em geral, superfícies com menores níveis de textura (MPD) e maior porosidade são menos ruidosas (Knabben *et al.*, 2016). Pavimentos porosos podem reduzir os níveis sonoros em até 10 dB (A), sendo esse efeito mais significativo nas altas frequências do espectro sonoro (Ding e Wang, 2017). Já a textura tem grande influência em

frequências médias e baixas, entre 500 Hz e 600 Hz, e em frequências acima de 1,6 kHz. A irregularidade (IRI) não influencia diretamente em nenhuma faixa de frequência (Vázquez *et al.*, 2019). Entretanto, superfícies degradadas que apresentam rachaduras e ondulações (altos valores de IRI) apresentam maiores níveis de ruído nas baixas frequências (Sirin *et al.*, 2018).

O asfalto emborrachado é apontado por León *et al.* (2020) como a melhor solução de pavimento visando sustentabilidade. Nesse pavimento, que utiliza na sua composição material de pneus reciclados, o ruído gerado irrita menos as pessoas do que o asfalto denso, embora não seja significativamente diferente (Freitas *et al.*, 2012). Quando aos outros tipos, os pavimentos rígidos produzem até 5 dB(A) a mais que pavimentos asfálticos, enquanto paralelepípedos são os mais ruidosos (Khan e Biligiri, 2017).

4. CONCLUSÃO

Esse artigo apresentou um panorama das ferramentas utilizadas na modelagem de ruído urbano gerado pelo tráfego rodoviário. Foram apresentados os softwares e modelos de predição mais utilizados, os métodos de formulação de modelos e as principais evidências sobre a influência de atributos de modelagem no ruído urbano. Os métodos mais utilizados na formulação de modelos são Regressão Múltipla, Redes Neurais Artificiais (RNA) e Algoritmos Genéticos (AG). Em geral, utiliza-se os atributos: volume, velocidade, porcentagem de veículos pesados, tipo de pavimento, geometria da via e forma de edificações. Modelos RNA e AG, que utilizam maior quantidade de atributos, apresentam melhores resultados. Por outro lado, atenta-se ao aumento do tempo de processamento e disponibilidade dos dados em larga escala.

Diversas cidades têm realizado mapeamento sonoro com softwares comerciais. Esses programas possuem alta performance e implementam modelos de predição advindos de países como Alemanha, França e Inglaterra. Softwares associados a SIGs, desempenham um papel significativo no desenvolvimento de modelos estocásticos e nos mapeamentos em larga escala. A vantagem do SIG consiste no gerenciamento de grande quantidade de dados advindos de diversas bases. As lacunas dessa abordagem estão nas premissas adotadas, como a modelagem 2D e a não consideração de efeitos de difração e reflexão da onda sonora. Esses aspectos podem gerar erros maiores que os aceitáveis.

A influência de atributos urbanos na emissão sonora parece ser bastante variável entre países. Diferentes condições de tráfego podem exigir adaptações dos modelos às condições locais. Verificou-se que alguns estudos nacionais apresentam discordâncias entre os fatores de equivalência de motocicletas em veículos leves. Isso ressalta a necessidade de pesquisas nacionais sobre os fatores de emissão de veículos e o impacto do uso de motocicletas, sobretudo em situações de tráfego congestionado. Não se encontrou pesquisa brasileira tratando do impacto das buzinas. Quanto aos atributos de propagação sonora, o resultado das pesquisas recentes vem reforçando estudos internacionais consolidados. A altura e quantidade de vazios entre edificações possuem grande contribuição nos fenômenos de difração e reflexão das ondas sonoras. Já os fatores meteorológicos apresentam baixa correlação com os níveis de ruído urbano. Quanto ao tipo de pavimento, aspectos sobre a porosidade de superfícies possuem destaque na atenuação de ruído urbano e na busca por uma mobilidade urbana sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2019) *NBR 10151 – Acústica — Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — Aplicação de uso geral*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Abo-Qudais S, Alhiary A (2007). Statistical models for traffic noise at signalized intersections. *Journal of Building Environment*, v. 42, n.8, p. 2939–2948.
- ACEM (2014) Striving against traffic noise: how powered two-wheelers can contribute, Association des Constructeurs Européens de Motocycles, Bruxelas, Bélgica, 16 p.
- Aditya, K., e Chowdary, V. (2020) Influence of Honking on the Road Traffic Noise Generated at Urban Rotaries for Heterogeneous Traffic, *Environmental and Climate Technologies*, v.24, n. 1, p. 23-42.
- Agarwal, S. e Swami, B.L. (2010) Comprehensive approach for the development of traffic noise prediction model for Jaipur City. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, 172(1–4): 113–120.
- Aguiar *et al.* (2017) Caracterização de cânions urbanos e seus efeitos climáticos em área com intenso processo de verticalização na cidade de Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.10, p.1046-1058.
- Aguilera, I. *et al.* (2014) Application of land use regression modelling to assess the spatial distribution of road traffic noise in three European cities. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*. V. 25.
- Arana, M. *et al.* (2010). Strategic noise map of a major road carried out with two environmental prediction software packages. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 163, p.503-513.
- ARPA PIEMONTE, 2019. *OpeNoise map QGIS plugin*. Disponível em: <https://hub.qgis.org/projects/openoise>.
- Ary Junior, I.J. *et al.* (2018) Impact of traffic-related environmental noise on school children and teachers in a Brazilian city. *Canadian Acoustics*, V. 46, N.1, p 15-28.
- Bocher, E. *et al.* (2019). NoiseModelling: An Open Source GIS Based Tool to Produce Environmental Noise Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, V. 8, P, 30.
- Brasileiro, T. *et al.* (2018). Estado Da Arte Dos Mapas Sonoros No Brasil. *Anais do XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*, SOBRAC, Porto Alegre.
- Calixto, A.; Diniz, F. e Zannin, P. (2003). The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting. *Cities*. V. 20. P. 23-29. DOI: 10.1016/S0264-2751(02)00093-8.
- CETESB (2009) Nº 012/2009/P - Dispõe sobre a aprovação do Procedimento para Avaliação de Níveis de Ruído em Sistemas Lineares de Transporte. Companhia de tecnologia de saneamento ambiental, São Paulo.
- Cirianni, F. e Giovanni L. (2012) Environmental Modeling For Traffic Noise In Urban Area. *American Journal of Environmental Science*, V. 8, N. 4, P 345-351.
- Coensel, B.; Can, A. e Botteldooren, D. (2012). Effect of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions. *Environ. Modell. Softw.* V. 35, p. 74–83.
- Costa S.B. e Lourenço R.W. (2011) Geoprocessing applied to the assessment of environmental noise: a case study in the city of Sorocaba, São Paulo, Brazil. *Env. Monit Assess*, V. 172, p. 329-337.
- Da Paz, E. C. e Zannin, P. H. T. (2010) Urban daytime traffic noise prediction models. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 163, p. 515 – 529.
- Debnath, A. e Singh, P. (2018) Environmental traffic noise modelling of Dhanbad township area – a mathematical based approach. *Appl Acoust*, V.129, 161–172.
- Dídac, D. T.; Mora, J.M. e Celso, L.Q. (2017). Comparación de mapas de ruido obtenidos con software libre (openoise v0.3.1) y comercial (predictor-lima v11.10). Encontro Ibérico de Acostica. Coruna.
- Ding, Y. e Wang, H. (2019) FEM-BEM analysis of tyre-pavement noise on porous asphalt surfaces with different textures. *International Journal of Pavement Engineering*, V. 20, n. 9.
- END (2002) Directive of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise, Directive 2002/49/EC.
- Farcas, F. e Sivertun, Å. (2012) Road traffic noise: Gis tools for noise mapping and a case study for skåne region. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* V. 34.
- Fecht, D. *et al.* (2016) Spatial and temporal associations of road traffic noise and air pollution in London: Implications for epidemiological studies, *Environment International*, V. 88. P. 235-242.
- Feng Li *et al.* (2017) Dynamic simulation and characteristics analysis of traffic noise at roundabout and signalized intersections, *Applied Acoustics*, V. 121, P. 14-24.
- Fiedler, P.E.K e Zannin, P.H.T (2015) Evaluation of noise pollution in urban traffic hubs—Noise maps and measurements, *Environmental Impact Assessment Review*, V. 51, P. 1-9.

- Florencio, D.N.P. (2018) Avaliação Do Mapa Sonoro De Tráfego Veicular No Município De Natal/Rn. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.
- Forcetto, A.L.S. (2016) Poluição Sonora Urbana: a influência de modificações em escapamentos de motocicletas na emissão de ruído. Dissertação (Mestre em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Freitas, E. (2012) Traffic noise abatement: How different pavements, vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, V. 17, P. 321-326.
- Garg, N. e Maji, S. (2014) A critical review of principal traffic noise models: strategies and implications. *Environ. Impact Assess. Rev.* V. 46, p. 68–81.
- Givargis, S. e Karimi, H., 2010. A basic neural traffic noise prediction model for Tehran's roads. *J. Environ. Manage*, V. 91, p. 2529–2534.
- Gomez, M. *et al.* (2015) Assessment of the RLS 90 calculation method for predicting road traffic noise in Colombian conditions. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, N. 75, P. 175-188.
- Guedes, I.C.M. (2018) Modelo probabilístico para investigação da influência de pontos de ônibus no ruído do tráfego veicular urbano, Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura E Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas.
- Guedes, I.C.M.; Bertoli, S.R. e Zannin, P.H.T. (2011) Influence of urban shapes on environmental noise: A case study in Aracaju - Brazil, *Science of The Total Environment*, V. 412–413, P. 66-76.
- Gulliver, J. *et al.* (2015) Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment, *Environmental Modelling & Software*, V. 74, P. 183-193.
- Harman, B.I; Koseoglu, H e Yigit, C.O. (2016) Performance evaluation of IDW, Kriging and multiquadric interpolation methods in producing noise mapping: A case study at the city of Isparta, Turkey, *Applied Acoustics*, V. 112, P.147-157.
- Hirashima, S. Q. S. (2014) Percepção sonora e térmica e avaliação de conforto em espaços urbanos abertos do município de Belo Horizonte - MG, Brasil. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal de São Paulo. São Paulo.
- Hustim, M. *et al.* (2018) The effect of speed factors and horn sound to the RLS 90 model reliability on The Visum program in predicting noise of heterogeneous traffic. *Intern. Journal of Integrated Eng.*, v. 10, p. 77-81.
- Jamalzadeh, Z, *et al.* (2018). Traffic Noise Exposure and Driving Behaviors. *J. of Human, Environment and Health Promotion*. V. 4, p. 111- 115.
- Kalaiselvi, R e Ramachandraiah, A. (2016) Honking noise corrections for traffic noise prediction models in heterogeneous traffic conditions like India, *Applied Acoustics*, V. 111, P. 25-38.
- Kephalopoulos, S. *et al.* (2014) Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping, *Science of The Total Environment*, V. 482–483, P. 400-410.
- Khan, J. *et al.* (2018) Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques. *Science of The Total Environment*. v. 634, p. 661–676
- Khan, V. e Biligiri, K.P. (2018) Evolution of tyre/road noise research in India: Investigations using statistical pass-by method and noise trailer, *Inter. Journal of Pavement Research and Technology*, V.11, P.253-264.
- Knabben, R.M. *et al.* (2016) Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures, *Applied Acoustics*, V. 114, P. 266-274.
- Kumar, P. e Nigam S.P. (2014) Narotam Kumar, Vehicular traffic noise modeling using artificial neural network approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, V.40, P.111-122.
- Kurra, S. e Dal, L. (2012) Sound insulation design by using noise maps, *Building and Environ.*, V. 49, P. 291-303.
- León, G. *et al.* (2020) Evaluation of tyre/road noise and texture interaction on rubberised and conventional pavements using CPX and profiling measurements. *Road Materials and Pavement Design*.
- Makarewicz, R. e Galuszka, M. (2011) Road traffic noise prediction based on speed-flow diagram. *Appl Acoust*, V. 72, P.190–195.
- Melo, R.A.; Pimentel, R.L. e Lacerda, D.M. *et al.* (2015) Applicability of models to estimate traffic noise for urban roads. *J Environ Health Sci Engineer* v.13, p. 83.
- Moher, D. *et al.* (2015). Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis Protocols (PRISMA-P) statement. *Syst Rev.*, V 4, p. 1.
- Moura, V.R.; Melo, G.S.V.M e Santos W.S (2016) Ruído e configuração espacial urbana: um estudo de caso na cidade de Belém do Pará. *Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, v. 7, p. 237-251
- Murphy, E.; Rice, H.J e Meskell, C. (2006) Environmental noise prediction, noise mapping and GIS integration : the case of inner Dublin, Ireland. *8th Intern. Transport Noise and Vibration Symposium*, St. Petersburg.

- Nardi, A.S.L.V. (2008) Mapeamento sonoro em ambiente urbano: estudo de caso: área central de Florianópolis. *Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Ohiduzzaman, M. *et al.* (2016) State-of-the-Art Review on Sustainable Design and Construction of Quieter Pavements-Part 1: Traffic Noise Measurement and Abatement Techniques. *Sustainability*, v.8, p. 742.
- Ow, L.F. e Ghosh, S. (2017) Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation, *Applied Acoustics*, Volume 120, Pages 15-20.
- Pal, M. e Sarkar, D. (2012). Delay, fuel loss and noise pollution during idling of vehicles at signalized intersection in Agartala city India. *Civil Environ. Res.* V. 2, p. 161–170.
- Penteadó, L.; Souza, L. e Christoforo, A. (2018). Reverberation time as an indicator for noise maps. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, V. 12, P. 257-265.
- Pinto, F.A.N.C. e Mardones, M.D.M. (2009) Noise mapping of densely populated neighborhoods—example of Copacabana, Rio de Janeiro—Brazil. *Environ Monit Assess*, v. 155, p. 309–318.
- Pozzer, T. e Holtz, M. (2018) The pilot noise map of São Paulo: first findings and next steps. *XLVII International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, INTERNOISE, Chicago.
- Quiñones-Bolaños, E.E.; Bustillo-Lecompt C.F. e Mehrvar, M. (2016) A traffic noise model for road intersections in the city of Cartagena de Indias, Colombia, *Transp. Research Part D*. V. 47, P. 149-161.
- Rahmani, S.; Mousavi, S. M. e Kamali, M. J. (2011) Modeling of road-traffic noise with the use of genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, v. 11, p. 1008–1013. doi:10.1016/j.asoc.2010.01.022.
- Ramírez, A. e Domínguez, E. (2013) Modeling urban traffic noise with stochastic and deterministic traffic models, *Applied Acoustics*, V. 74, Issue 4, P. 614-621.
- Renterghem, T.V (2019) Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise, *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 40, Pages 133-144.
- Rodrigues, F. (2016) Metodologia para investigação de relação entre ruído de tráfego e condições operacionais do fluxo em centros urbanos. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Sanchez, G.M.E. (2016) The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads, *Building and Environment*, Volume 97, Pages 96-110.
- Singh, D. *et al.* (2013) The effects of meteorological parameters in ambient noise modelling studies in Delhi. *Environ Monit Assess*, V. 185, P. 1873–1882. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2674-1>
- Sirin, O.; Ohiduzzaman, M. e Kassem, M. (2018) Effect of Pavement Surface Aging on Tire-Pavement Noise: A Case Study in the State of Qatar. *International Conference on Civil, Offshore & Environ. Engin.*, V. 203.
- Souza, L. C. L. D. e Giunta, M.B. (2011) Urban indices as environmental noise indicators. *Computers. Environment and Urban Systems*, v. 35, p. 421–430. Doi:10.1016/j.compenvurbsys.2011.06.001.
- Suárez, E. e Barros, J.L. (2014) Traffic noise mapping of the city of Santiago de Chile, *Science of The Total Environment*, V. 466–467, P. 539-546.
- Szopinska, K. (2017). Creation of Theoretical Road Traffic Noise Model with the Help of GIS. *Environmental Engineering 10th International Conference*. Lithuania.
- Tang, U.W. e Wang, Z.S. (2007) Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: results from a modeling system. *Environ. Model. Software*. V. 22, p. 1750-1764.
- Toriya, A.J e Ruiz, D.P (2015) A general procedure to generate models for urban environmental-noise pollution using feature selection and machine learning methods, *Science of The Total Environ.*, V. 505, P. 680-693.
- Vázquez, V.F. *et al.* (2019) Functional Performance of Stone Mastic Asphalt Pavements in Spain: Acoustic Assessment. *Coatings*. V. 9, p. 123.
- Vijay, R; Chakrabarti, T e Gupta, R. (2018) Characterization of Traffic Noise and Honking Assessment of an Indian Urban Road. *Fluctuation and Noise Letters*. Vol. 17, No. 4.14 p.
- WG-AEN (2007). European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise. Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure.
- WHO (2018) Environmental Noise Guidelines for the European Region. *World Health Organization*, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- Xiaodong Lu, *et al.* (2019) Influence of urban road characteristics on traffic noise. *Transp Res Part D Transp Environ*, V. 75, P. 136–55.
- Zefreh, M.M. e Torok, A. (2018). Theoretical Comparison of the Effects of Different Traffic Conditions on Urban Road Traffic Noise. *Journal of advanced transportation*. V. 2018.
- Zuo, J. *et al.* (2016). Mapping Urban Environmental Noise Using Smartphones. *Sensors*, v. 16, P. 1692.