MODELO ESPACIAL DO IMPACTO DO RUÍDO AERONÁUTICO NO MUNICÍPIO DE GUARULHOS

G. S. Santos, B. A. C. Silva, R. A. Gomes

RESUMO

Uma das formas de reduzir o impacto do ruído aeronáutico é estabelecer limites sobre o uso e a ocupação da área impactada, reduzindo o adensamento e impondo condições de proteção acústica. Porém os métodos convencionais empregados para a definição dessa área mostram-se pouco correlacionados ao incômodo relatado pela população. Fatores socioeconômicos, psicológicos e físicos interferem na exatidão das medidas feitas com os modelos atuais. Este trabalho tem como objetivo aplicar técnicas de estatística espacial na tentativa de melhorar as estimativas acerca dos fatores que influenciam a percepção dos moradores afetados pelo ruído aeronáutico. Os resultados apontam para um melhor ajuste dos modelos quando inseridas variáveis não acústicas para explicar o incômodo individual com o ruído aeronáutico. Além disso, o modelo GWR (*Geographically Weighted Regression*) mostrou ser válido para tratar o problema de dependência espacial e reduziu a subjetividade dos dados de incômodo relatado no entorno do Aeroporto Internacional de Guarulhos.

1 INTRODUÇÃO

Uma dificuldade encontrada para reduzir o impacto do ruído aeronáutico sobre a qualidade de vida das pessoas que habitam as áreas de entorno dos aeroportos, é que o incômodo causado é expresso segundo fatores pessoais, psicológicos, sociológicos e econômicos, que são, por definição, não acústicos. O incômodo depende de muitas variáveis relativas à exposição ao ruído, no espaço e no tempo, e afeta pessoas que residem em locais com diferentes especificidades. Vários modelos têm sido desenvolvidos com o objetivo de identificar o nível de impacto causado por aeroportos que apresentem situação crítica quanto ao ruído. A Figura 1 mostra a dispersão dos pontos, coletados por Fidell et al. (2011), que relacionam o percentual de pessoas altamente incomodadas pelo nível de ruído médio em dB(A) .

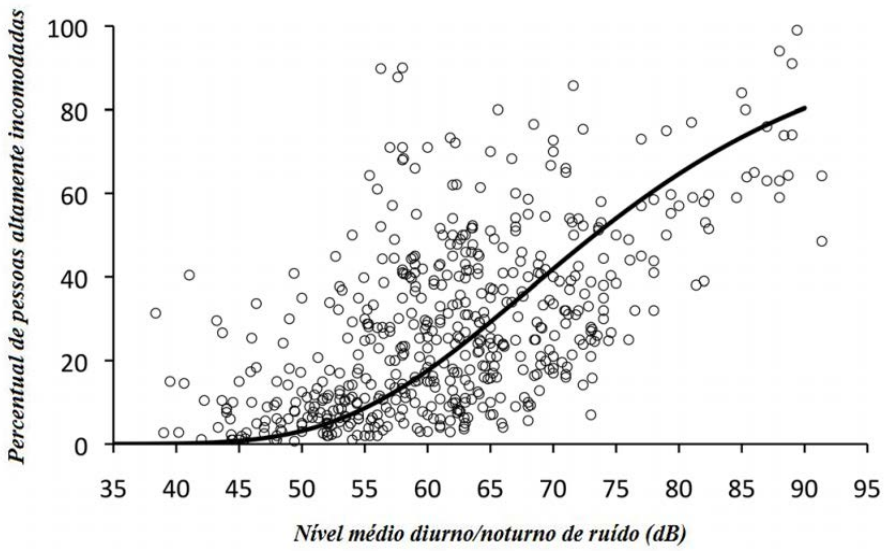

Fig. 1 Relação entre o percentual de pessoas altamente incomodadas e o nível médio de ruído (Fidell et al., 2011)

De acordo com Cohen e Coughlin (2008), existem poucos estudos que tratam o ruído aeroportuário sob a ótica de técnicas de estatística espacial. Além disso, quando se encontram publicações que se utilizam dessas técnicas, estas estão direcionadas a quantificar a influência do ruído no preço dos imóveis (KAWAMURA, 2005; ANDERSSON et al., 2009; DEKKERS & STRAATEN, 2009; DAY et al., 2007; e SALVI, 2007).

Dentre os métodos de Análise Espacial o modelo de regimes espaciais Geographically Weighted Regression (GWR) estuda fenômenos que sofrem variações locais dentro de uma determinada área estudada. Especificamente com relação à aplicação do método GWR às questões relacionadas ao ruído, as principais publicações são as de Duarte e Tamez (2009) e Cellmer (2011), porém estas estão voltadas a determinar a influência não estacionária do ruído no preço dos imóveis, e não inserem o incômodo como variável dependente.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é melhor definir a área de impacto do ruído aeronáutico, empregando técnicas de estatística espacial que possibilitam o tratamento da autocorrelação, e a incorporação de variáveis não acústicas, as quais são responsáveis por parte do desconforto relatado pelos moradores das áreas de entorno dos aeroportos.

2 DESENVOLVIMENTO

Fields (1993) afirma que o incômodo é relacionado com o nível sonoro que incide sobre as casas, além de cinco fatores pessoais: medo da fonte de ruído; senso de prevenção ao ruído; sensibilidade ao ruído; senso de importância da fonte de ruído; e incômodo com impactos não-acústicos da fonte de ruído.

Miedema e Vos (1998) dividem os fatores que influenciam o incômodo em variáveis demográficas (sexo, idade, nível de escolaridade, status profissional, tamanho da casa, casa própria, dependência da fonte de ruído, uso da fonte de ruído) e variáveis pessoais (sensibilidade ao ruído e medo da fonte de ruído). Nesse estudo foram encontrados relacionamentos fortes entre o incômodo e a sensibilidade ao ruído. Já as variáveis

demográficas mostraram menor influência em determinar o grau ao incômodo. Dentre elas, a idade foi a que se mostrou mais relacionada.
A princípio, todas as variáveis envolvidas no problema do ruído aeronáutico podem ser especializadas, ou seja, elas têm um comportamento que pode ser descrito e observado no espaço.
O nível de exposição ao ruído aeronáutico aumenta à medida que se aproxima da pista de pouso, e é descrito através das curvas de ruído. Porém cada bairro ou localidade dentro de uma cidade sofre impacto de muitas fontes de ruído. Esse conjunto de fontes geradoras de ruído pode também influenciar a sensibilidade ao ruído aeronáutico. Características locais como avenidas movimentadas, usos comerciais ou industriais do solo, podem descrever de forma indireta algumas dessas fontes de ruído.
A segregação social no espaço urbano também é um fator conhecido e descrito através de mapas de censo demográficos, porém essa característica ainda é pouco estudada no fenômeno de impacto do ruído aeronáutico.
Segundo Bailey e Gatrell (1995), a Análise Espacial é o estudo quantitativo de um fenômeno que é localizado no espaço. Sua ênfase é mensurar propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno em estudo de forma explícita (Druck et al., 2004). A aplicação de técnicas de Análise Espacial é encontrada em diversas áreas do conhecimento, tais como na Geografia, na Epidemiologia, Biologia e Economia.
O modelo GWR (*Geographically Weighted Regression*) pode ser aplicado para explorar os locais onde os coeficientes βn assumem valores maiores ou menores de acordo com a localização. O GWR foi desenvolvido com o intuito de se estudar fenômenos que sofrem variação de acordo com a área que é estudada. Desta maneira observa-se a chamada heterogeneidade espacial (Fotheringham et al., 2003).
Segundo Monteiro et al. (2004) para os dados socioeconômicos típicos de cidades brasileiras, o GWR tende a apresentar resultados melhores que os modelos de regressão simples ou de regressão espacial com efeitos globais. Isto ocorre em função das fortes desigualdades sociais no Brasil, que ocasionam descontinuidades abruptas nos fenômenos estudados, como no caso do recorte entre favelas e áreas ricas, como é frequente em grandes cidades.

3 MÉTODO

No GWR a ideia é ajustar um modelo de regressão a cada ponto observado, ponderando todas as demais observações como função da distância a este ponto. Desta forma o resultado será um conjunto de parâmetros, sendo que cada ponto considerado terá seus próprios coeficientes. Estes parâmetros podem ser apresentados visualmente para identificar como se comportam espacialmente os relacionamentos entre variáveis. Para aplicar o modelo GWR, o modelo padrão de regressão é reescrito na forma:

$$Y_i = \beta_{i0} + \beta_{i1}X_{i1} + \beta_{i2}X_{i2} + \cdots + \beta_{in}X_{in} + \varepsilon_i \qquad (1)$$

onde, Y_i é a variável aleatória representando o processo no ponto *i*, e β_{in} indica que os n parâmetros são estimados no ponto *i*. Para estimar os parâmetros deste modelo, a solução padrão por mínimos quadrados para o caso espacial é generalizada usando um método de ajuste local:

$$\beta_i = (X^T W_i X)^{-1} X^T W_i Y \qquad (2)$$

Onde W_i é a matriz de vizinhança do ponto i, onde cada um dos elementos w_{ij} representa uma medida de proximidade entre P_i e P_j.

$$W_i = \begin{pmatrix} w_{i1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{i2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{ij} \end{pmatrix} \tag{3}$$

Pode-se fazer testes de hipóteses para verificar se as variações espaciais têm significado estatístico ou são aleatórias. Esses testes de variabilidade geográfica dos coeficientes são realizados através da comparação entre o GWR e um modelo no qual os coeficientes são fixos ao longo da vizinhança do coeficiente. Se o GWR for melhor do que esse modelo de comparação utilizando o Critério de Informação de Akaike, podemos julgar que o coeficiente certamente varia ao longo do espaço (NAKAYA, 2014).
A aplicação do modelo GWR foi feita no Software GWR4.0 desenvolvido por Nakaya, T. (2014) da Ritsumeikan University no Japão. Esse Software permite a aplicação de um modelo misto, chamado GWGLM (*Geographically Weighted Generalised Linear Modelling*), onde existem parâmetros variando localmente e parâmetros globais, da seguinte forma:

$$Y_i = \sum_l \beta_l X_{li} + \sum_g \beta_g X_{gi} + \varepsilon_i \tag{4}$$

Sendo,

$$\beta_l = (X_l{}^T W_i X_l)^{-1} X_l{}^T W_i Y \tag{5}$$

Onde Y_i é a variável dependente, β_l são os coeficientes locais, X_l são as variáveis locais, β_g são os coeficientes globais, X_g são as variáveis globais e W_i é a matriz de proximidade no ponto i.
As variáveis foram divididas em locais e globais de acordo com características ligadas ao indivíduo, ou ligadas ao ambiente. Caso as variáveis relativas às características do indivíduo sofram influência de regionalidades, estas poderão ser testadas na parcela local do modelo.

3.1 Questionários

Neste estudo foram aplicados questionários na região do entorno do Aeroporto Internacional de Guarulhos (GRU), os quais foram disponibilizados às pessoas por meio de uma página na internet.
A divulgação do site foi feita através de uma rede social no período de 11 de abril até 20 de julho de 2015. Nesse período, o anúncio teve um alcance de 124.445 impressões na página da rede social. Esse número corresponde à quantidade de vezes que o anúncio foi publicado, ou seja, que foi mostrado na tela do navegador de um usuário da rede social. Somente usuários que pertenciam ao município de Guarulhos receberam o anúncio.
O questionário aplicado seguiu basicamente a metodologia usada por Miller et al. (2014). Estruturalmente, as questões eram divididas de forma a identificar o respondente, captar as avaliações do mesmo com relação às diferentes características de sua vizinhança, identificar o nível de incômodo percebido pelo respondente em relação ao ruído

aeronáutico e outras fontes de ruído, e caracterizar a relação do respondente com o aeroporto.

4 DADOS

Neste trabalho, a coleta dos questionários válidos somou uma amostra total de 547 respondentes. Para uma população aproximada de 1,3 milhão habitantes em Guarulhos, podemos obter um nível de confiança estatística maior que 95% com um erro amostral menor que 5%. Todas as amostras foram georreferenciadas de acordo com o endereço fornecido pelo respondente no preenchimento do questionário. Os dados de nível de incômodo e sua respectiva localização são mostrados na Figura 2.

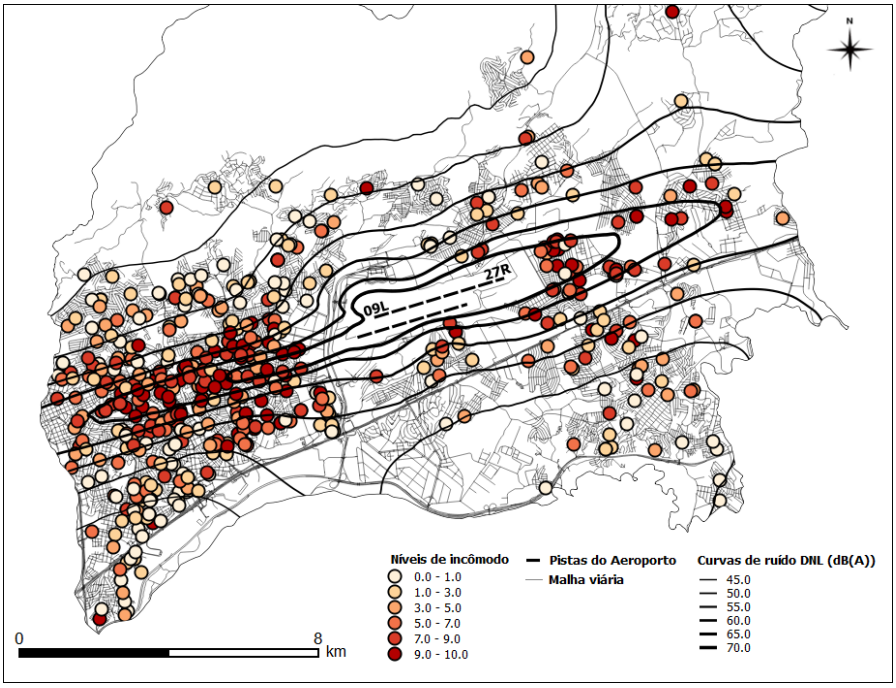

Fig. 2 Mapa da localização dos respondentes no entorno do Aeroporto de Guarulhos e os respectivos níveis de incômodo com o ruído aeronáutico

Quando analisada a representatividade espacial da amostra ao longo do município de Guarulhos é obtida uma correlação forte entre a distribuição da população no território e o total da amostra obtida pelos questionários. A Figura 3 mostra uma correlação de 96,8% quando relacionados o número populacional e o número de respondentes por km^2.

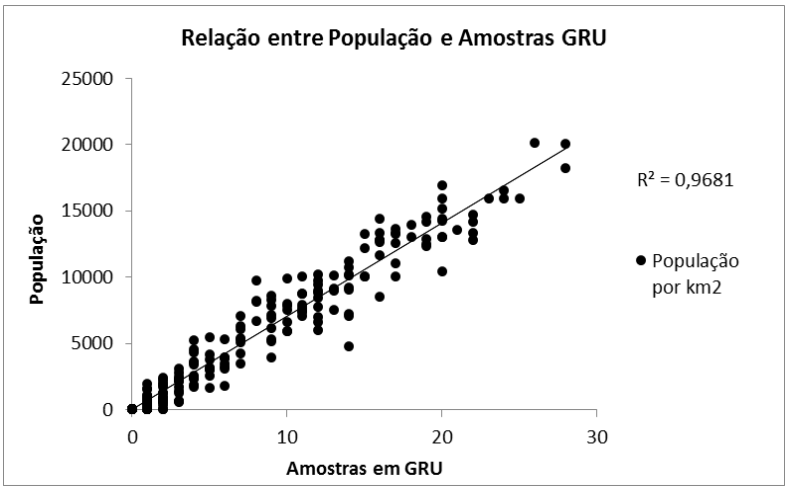

Fig. 3 Relação entre a população de Guarulhos e a amostra coletada nos questionários

Para uma análise exploratória dos dados, os níveis de incômodo foram relacionados com o nível de ruído na métrica DNL[1] (*Day-Night Average Sound Level*), através de uma regressão polinomial de terceira ordem. Porém diferentemente de Fidell et al. (2011), foi utilizado o valor individual de incômodo relatado pelos moradores de Guarulhos. Esse procedimento foi realizado basicamente por dois motivos: manter um número de amostras elevado para elevar a densidade espacial de pontos; manter as diferentes características do indivíduo ao invés de homogeneizar a amostra agrupando-os por faixa de dB (método utilizado para determinação do percentual de pessoas altamente incomodadas, %HA).
A relação entre o incômodo individual em função do DNL é mostrada na Figura 4, e apresenta um nível explicativo muito baixo com R^2 = 0,1947. Desta maneira observa-se a necessidade de incluir variáveis não-acústicas no modelo.

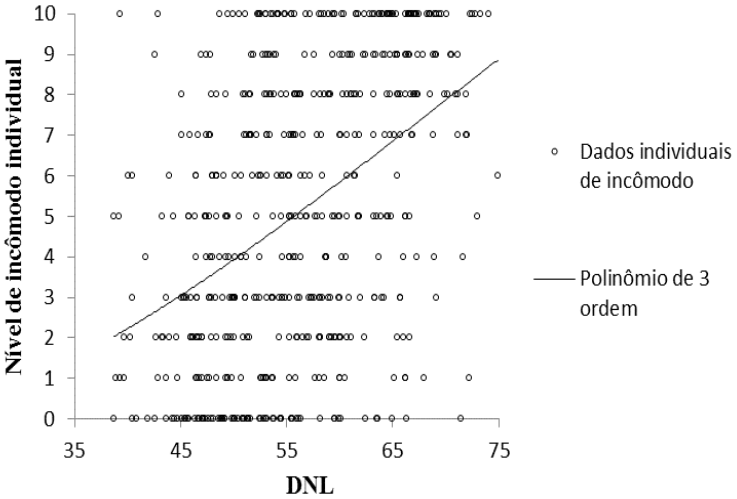

Fig. 4 Relação entre o incômodo individual e o nível de ruído na métrica DNL

Os dados de incômodo individual e o nível de ruído na métrica DNL também contêm níveis significantes de dependência espacial. O teste de Moran foi aplicado tanto para as

[1] O DNL é uma média do nível de ruído em dB(A) que ocorre num período de 24 horas com uma penalidade de 10 dB(A) aplicada no período noturno, das 10 horas da noite até as 7 horas da manhã (Galloway et al., 1974)

variáveis quanto para os resíduos da regressão polinomial de terceira ordem. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

Tab. 1 Índice global de autocorrelação espacial para as variáveis e os resíduos

Variáveis	Moran I	Variância	p-valor
Incômodo Individual	0.20123	0.0003199	2.2e-16
DNL	0.92618	0.0003195	2.2e-16
Resíduos	0.03764	0.0003089	0.00764

O resultado mostra uma grande autocorrelação na variável DNL e na variável de incômodo. Nos resíduos da regressão polinomial esse valor diminuí bastante, porém há uma persistência de uma autocorrelação positiva com significância estatística, conforme é observado no teste estatístico p-valor.

5 RESULTADOS

Na regressão geograficamente ponderada GWGLM há um aumento do R^2 ajustado com relação à regressão polinomial de terceira ordem. A Tabela 2 mostra o resultado da regressão com o valor do coeficiente estimado da variável associada a relação de trabalho com GRU. Observa-se uma leve queda no valor correspondente ao teste estatístico *t*, porém sem aproximação ao nível de corte $t > |2|$, correspondente a um nível de confiança de aproximadamente 96%.

Tab. 2 Resultado da parcela global do modelo GWGLM

R^2 = 0.580533	R^2 ajustado = 0.549189		AICc = 2501.638
Variável	**Coeficiente Estimado**	**Desvio padrão**	**Estatística *t***
GRU_labor	-0.779128	0.244877	-3.181718

Nota-se que a relação da variável com o nível de incômodo é inversa, confirmando que a relação de trabalho no Aeroporto de Guarulhos faz decrescer o nível de incômodo com o ruído aeronáutico relatado no questionário aplicado, demonstrando maior tolerância ao ruído por parte das pessoas que têm relação profissional com o aeroporto.
As variáveis inclusas na parcela local do modelo mostraram diferentes valores em seus coeficientes ao longo da área do município de Guarulhos. A Figura 5 mostra as variações dos coeficientes estimados correspondente ao impacto do DNL no incômodo dos moradores juntamente com a informação referente às curvas de ruído.

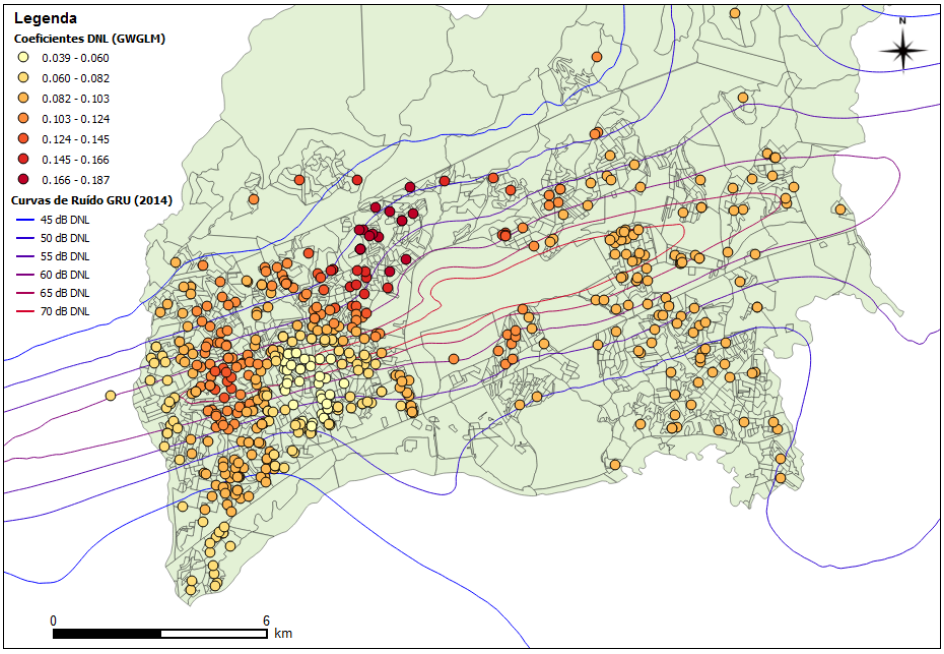

Fig. 5 Mapa dos coeficientes da variável DNL

A parte norte do aeroporto ainda continua sendo mais sensível às variações do nível de ruído na métrica DNL, porém apresentam uma concentração maior na área correspondente ao bairro Taboão de Guarulhos.

Próximo ao bairro Jardim Bom Clima o DNL causa um aumento menor da variável dependente comparado às outras regiões de Guarulhos. É possível observar nessa região que mesmo com uma variação grande no valor das curvas de ruído, a variação do incômodo não é tão acentuada, como mostra os coeficientes da Figura 5.

A próxima variável considerada na parcela local do modelo GWGLM foi o incômodo geral com os vizinhos (*InVizGeral*). Também houve variações locais dos coeficientes, como mostra a Figura 6.

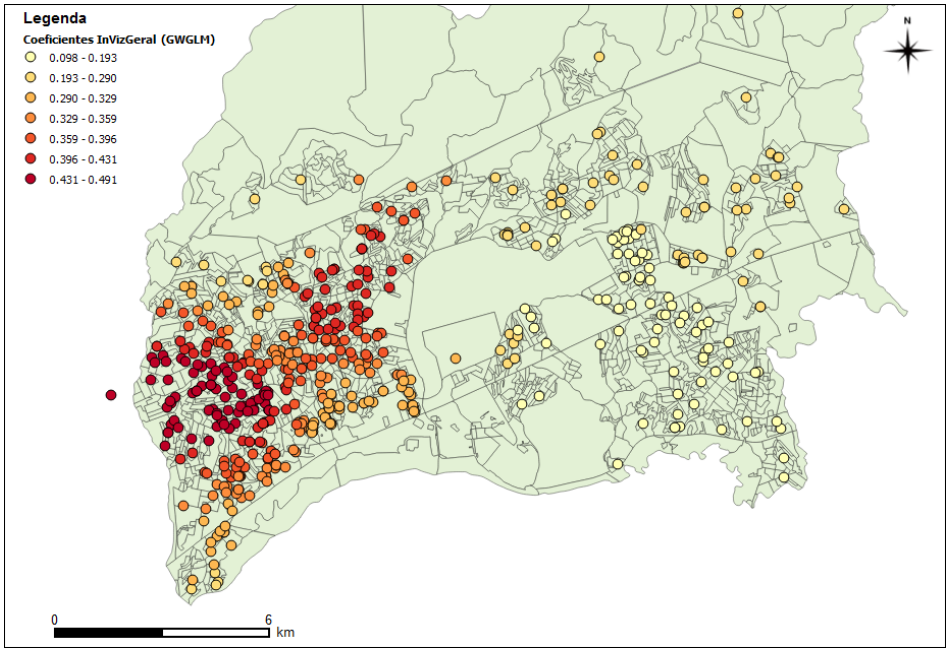

Fig. 6 Mapa dos coeficientes da variável *InVizGeral*

Nota-se que os coeficientes de maior valor estão mais presentes na parte sudoeste do município de Guarulhos, porém apresenta maiores concentrações na região dos bairros Cocaia, mais próximo ao aeroporto, e Vila Galvão e Picanto, próximos ao limite de município com São Paulo. Percebe-se que na região desses bairros o incômodo geral com os vizinhos provoca um maior incômodo com ruído aeronáutico. Esse resultado sugere uma visão um pouco diferente a respeito do ruído de fundo, uma vez que o sinal encontrado nos coeficientes é positivo. O senso comum sugere um menor incômodo com o tráfego aéreo à medida que se aumenta o ruído de fundo, porém os modelos indicam que a tolerância com ruídos adicionais pode diminuir quando há um aumento do ruído de fundo.
A variável associada à sensação de aumento/diminuição do ruído aeronáutico (*AumDiminu*) apresentou também diferenças locais, como visto na Figura 7.

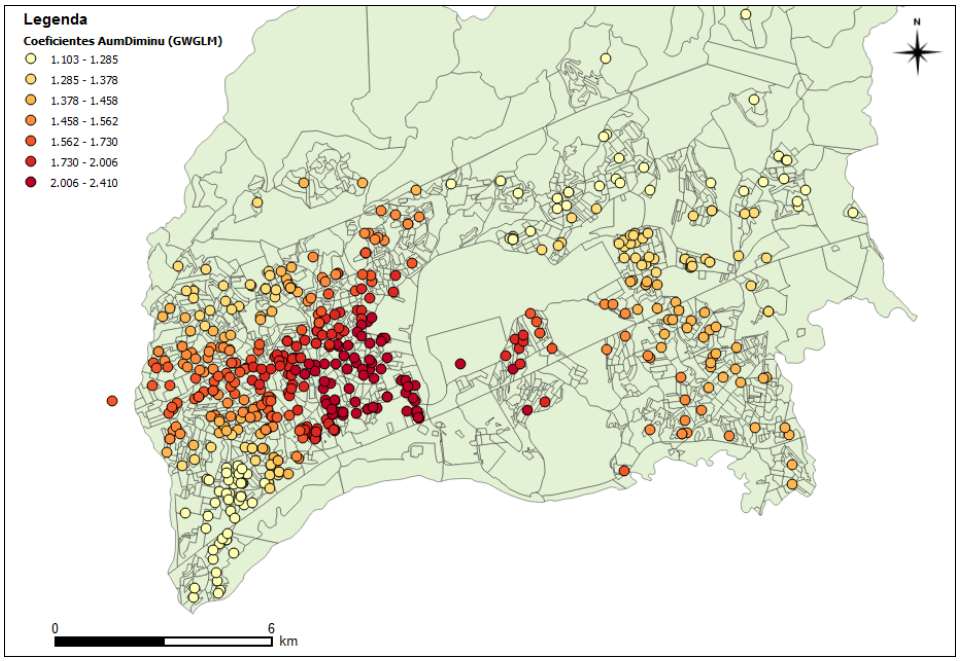

Fig. 7 Mapa dos coeficientes da variável AumDiminu

Os coeficientes da variável *AumDiminu* de maior valor encontram-se concentrados próximos da cabeceira 09R do aeroporto, mais especificamente na região do bairro Vila Barros. Porém a concentração no modelo GWGLM se estende para oeste do Aeroporto de Guarulhos, seguindo um pouco a forma das curvas de ruído. Nessas regiões com um pequeno aumento do ruído aeronáutico é gerado um maior incômodo na população.
Outra variável adicionada no modelo GWGLM é relacionada ao nível de preocupação com acidentes aéreos (*PreocAcid*). A distribuição dos seus coeficientes é mostrada na Figura 8.

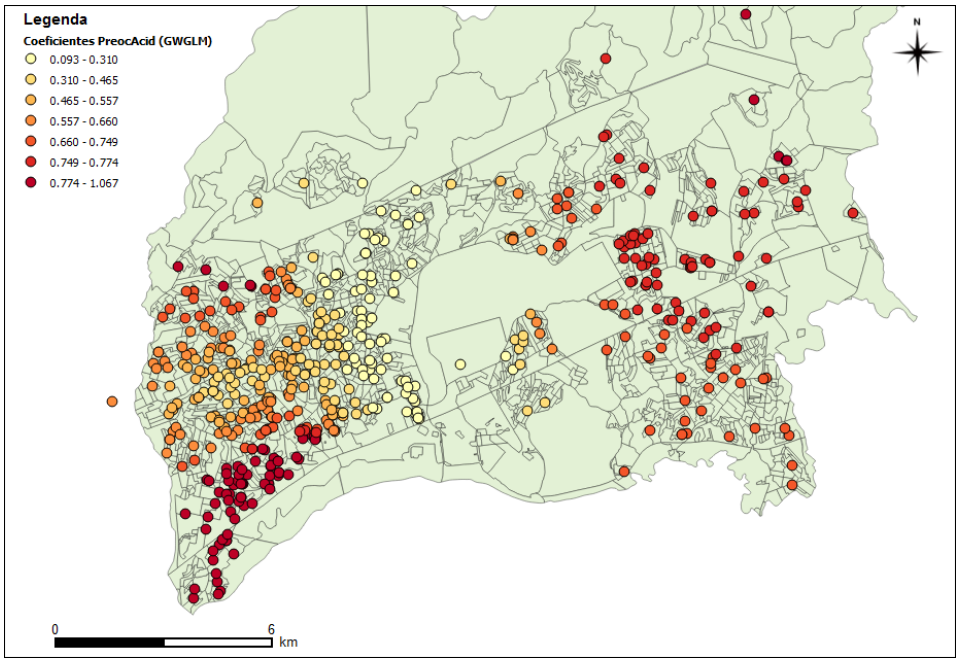

Fig. 8 Mapa dos coeficientes da variável *PreocAcid*

As regiões onde os coeficientes mostraram impactar menos a variável dependente se concentraram nas proximidades do Aeroporto de Guarulhos com uma tendência maior para oeste. Houve também um espalhamento desses valores menores seguindo um o trajeto dos contornos de ruído na métrica DNL. As regiões próximas ao aeroporto, porém ao lado das cabeceiras 27, tiveram uma maior influência dessa variável no nível de incômodo pelo ruído aeronáutico. O mesmo ocorreu nas regiões próximas a Vila Augusta, extremo sudoeste do município.

Posteriormente é preciso verificar se a introdução de cada variável na parcela local do modelo GWGLM é significativa. Isso é feito através de um Teste de Variabilidade Geográfica, utilizado o critério Akaike (AICc) para comparação entre modelos de regressão.

5.1 Teste de variabilidade geográfica do GWGLM

Para testar a variabilidade geográfica dos coeficientes, uma comparação pode ser realizada através do Software GWR4.0. Essa comparação é realizada entre o GWGLM e um modelo no qual os coeficientes são fixos ao longo da vizinhança do coeficiente. Se o GWGLM for melhor do que esse modelo de comparação utilizando o critério AICc, podemos julgar que o coeficiente certamente varia ao longo do espaço. A rotina de teste se repete para cada coeficiente utilizado na parcela local do modelo GWGLM. Além disso, o programa utiliza os testes de hipótese estatísticos F para modelos gaussianos. A Tabela 3 mostra os resultados dos testes aplicados nos coeficientes locais.

Tab. 3 Teste de variabilidade geográfica para os coeficientes locais do GWGLM

Variável	F	Diferença AICc
Intercept	2.394851	-1.14268
InVizGeral	2.164891	-0.19292
PreocAcid	3.955405	-8.51522
AumDiminu	2.957401	-4.53777
DNL	2.253020	-0.54806

Se o modelo de comparação atinge um melhor ajuste, o valor do indicador AICc é menor do que o do GWGLM, de modo que a Diferença AICc torna-se um valor positivo, sugerindo que não há variabilidade geográfica do coeficiente. Portanto os valores negativos encontrados na Tabela 3 confirmam a variabilidade espacial dos coeficientes, porém esse resultado não é categórico para as variáveis *InVizGeral* e DNL, pois suas diferenças AICc não são menores que o valor de corte igual a -2 sugerido por Nakaya (2014).

6. CONCLUSÃO

O modelo polinomial aplicado na relação entre o incômodo individual e o nível de ruído na métrica DNL, apresentou R^2 de 0,1947, o que significa que apenas 20% aproximadamente da variação do nível de incômodo dos respondentes é explicado pela métrica DNL. Quando inseridas variáveis não acústicas significantes o valor do R^2 sobe para 0,5492, de acordo com o modelo GWGLM3, significando uma explicação de mais de 50% da variação do incômodo individual dos respondentes pelo ruído aeronáutico.
As variáveis que se mostraram significativamente relacionadas com o incômodo causado pelo ruído aeronáutico, além do nível de ruído na métrica DNL, foram a sensação de aumento/diminuição do ruído aeronáutico, o incômodo geral com o barulho dos vizinhos, o nível de preocupação com acidentes aéreos e a relação de trabalho com o Aeroporto Internacional de Guarulhos. Algumas delas já foram observadas em estudos anteriores como em Fields (1993) e Miedema e Vos (1998).
O resultado do teste de Moran (I = 0.037, p-valor = 0.01089) nos resíduos do modelo baseado exclusivamente na métrica DNL mostrou que existe autocorrelação nos fatores não inclusos no modelo. A aplicação de modelos GWR contribuiu para inclusão desses fatores e tratamento da dependência espacial, além de identificar suas respectivas variações locais ao longo do município de Guarulhos.

7 REFERÊNCIAS

Andersson, H., Jonsson, L., & Ögren, M. (2010). Property prices and exposure to multiple noise sources: Hedonic regression with road and railway noise. **Environmental and resource economics**, 45(1), 73-89.

Bailey, T. C.; Gatrell, A. C. (1995) Interactive spatial data analysis – **Longman Scientific & Technical** – 1st Edition

Cellmer, R. (2011) Spatial Analysis of the Effect of Noise on the Prices and Value of Residential Real Estates. **Geomatics and Environmental Engineering** 2011, Vol. 5, No. 4

Cohen, J. P., & Coughlin, C. C. (2008). Spatial hedonic models of airport noise, proximity, and housing prices. **Journal of Regional Science**, 48(5), 859-878.

Day, B., Bateman, I., & Lake, I. (2007). Beyond implicit prices: recovering theoretically consistent and transferable values for noise avoidance from a hedonic property price model. **Environmental and resource economics**, 37(1), 211-232.

Dekkers, J. E., & van der Straaten, J. W. (2009). Monetary valuation of aircraft noise: A hedonic analysis around Amsterdam airport. **Ecological Economics**, 68(11), 2850-2858.

Druck, S., Carvalho, M. S., Câmara, G., & Monteiro, A. M. V. (2004). Spatial analysis of geographic data. **Embrapa Cerrados**.

Duarte, C. M.; Tamez, C. G. (2009) Does noise have stationary impact on residential values? **Journal of European Real Estate Research** Vol. 2 No. 3, 2009 pp. 259-279

Fidell, S.; Mestre, V.; Schomer, P.; Berry, B.; Gjestland T.; Vallet, M.; Reid, T. (2011) A first-principles model for estimating the prevalence of annoyance with aircraft noise exposure. **Journal of the Acoustical Society of America**. Volume 130. Issue 2.

Fields, J. M. (1993). Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 93(5), 2753-2763.

Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2003). **Geographically weighted regression**. John Wiley & Sons, Limited.

Galloway, W. J., Eldred, K. M., & Simpson, M. A. (1974). Population distribution of the United States as a function of outdoor noise level. **US Environmental Protection Agency, Office of Noise Abatement and Control.**

Kawamura, K., & Mahajan, S. (2005). Hedonic analysis of impacts of traffic volumes on property values. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, (1924), 69-75.

Miedema, H. M., & Vos, H. (1998). Exposure-response relationships for transportation noise. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 104(6), 3432-3445.

Miller, N. P., Cantor, D., Lohr, S., Jodts, E., Boene, P., Williams, D., ... & Hume, K. (2014). Research Methods for Understanding Aircraft Noise Annoyances and Sleep Disturbance. **ACRP Web-Only Document**, (17).

Monteiro, A. M. V. et al. Análise espacial de dados geográficos. **Editora: Embrapa, 1ª edição**, 2004.

Nakaya, T. et al. Semiparametric Geographically Weighted Generalised Linear Modelling: The Concept and Implementation Using GWR4. **Geocomputation; Brunsdon, C., Singleton, A., Eds.; A Practical Primer, Sage: London, UK**, 2014.

Salvi, M. (2007). Spatial estimation of the impact of airport noise on residential housing prices. **Available at SSRN 1000217**.