

UMA ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AMBIENTE CONSTRUÍDO E ACIDENTES DE TRÂNSITO EM ZONAS DE TRÁFEGO

Marta Rodrigues Obelheiro

WRI Brasil

Alan Ricardo Silva

Departamento de Estatística
Universidade de Brasília – UNB

Christine Tessele Nodari

Laboratório de Sistema de Transportes – LASTRAN
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGE
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

RESUMO

Este estudo tem como objetivo investigar a influência do ambiente construído sobre a incidência de acidentes em zonas de tráfego (ZTs). As técnicas de modelagem de regressão de Poisson geograficamente ponderada (RPGP) e de regressão binominal negativa geograficamente ponderada (RBNGP), bem como uma regressão binomial negativa global, foram empregadas para compreender os efeitos das cinco principais dimensões do ambiente construído na segurança viária. O modelo RBNGP apresentou o melhor desempenho entre os modelos testados. Os resultados confirmaram a importante influência do ambiente construído sobre a frequência de acidentes. A proporção de vias arteriais e a diversidade do uso do solo foram significativamente associadas a mais acidentes com vítimas. Ao compreender os efeitos do ambiente construído sobre a segurança viária, os resultados da análise podem ajudar os planejadores urbanos a considerar a segurança no trânsito proativamente ao planejar ou reformar áreas urbanas.

ABSTRACT

This study aims to investigate the influence of built environment on crash incidence at traffic analysis zones (TAZs). The Geographically Weighted Poisson Regression (GWPR) and the Geographically Weighted Negative Binomial Regression (GWNBR) modeling techniques, as well as a global negative binomial regression, were employed to understand the effects of the five main dimensions of the built environment on traffic safety. The GWNBR model presented the best performance among the tested models. The results confirmed the important roles played by the built environment in influencing crash frequency. The ratio of arterial roads and land use diversity were significantly associated with more injury crashes. By understanding the built environment effects on traffic safety, the results of the analysis can help urban planners to consider traffic safety proactively when planning or retrofitting urban areas.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as pesquisas em segurança viária e o desenvolvimento de modelos de previsão de acidentes (MPA) em nível macroscópico permitiram a identificação de importantes fatores relacionados à ocorrência de acidentes em áreas urbanas. Embora em alguns estudos os acidentes tenham sido agregados em unidades censitárias (Marshall e Garrick, 2011; Wier *et al.*, 2009; Y. Zhang *et al.*, 2015), na grande maioria os acidentes foram analisados em zonas de tráfego (Lee *et al.*, 2015; Rhee *et al.*, 2016), uma vez que análises nesta escala possibilitam que os resultados sejam usados no planejamento urbano e de transportes.

Diversos estudos investigaram a influência de vários fatores relacionados a características demográficas e da rede viária sobre os acidentes, mas apenas alguns estudos incluíram as diversas dimensões do ambiente construído (Ouyang e Bejleri, 2014). Embora aspectos do ambiente construído como diversidade do uso do solo e acessibilidade ao transporte coletivo possam ser considerados variáveis secundárias sem efeito direto sobre os acidentes, sua influência pode ser significativa (Ouyang e Bejleri, 2014; Y. Zhang *et al.*, 2015).

Na maioria dos estudos em que os efeitos do ambiente construído foram investigados, os autores desenvolveram MPA aplicando modelos tradicionais de regressão binomial negativa – BN (Wei e Lovegrove, 2013; C. Zhang *et al.*, 2014). A qualidade de ajuste e a capacidade de inferência destes modelos são provavelmente limitadas, pois esta técnica de modelagem não é capaz de considerar a dependência e a heterogeneidade espaciais comumente observadas em dados de acidentes.

A dependência e a heterogeneidade espaciais são características comuns de dados geográficos, como os acidentes. A dependência espacial nos acidentes de trânsito ocorre quando a frequência de acidentes em um lugar do espaço está relacionada com a frequência de acidentes em outro ou outros lugares do espaço. A heterogeneidade espacial, por sua vez, ocorre quando as relações entre as variáveis em estudo – neste caso, a frequência de acidentes e as variáveis explicativas de MPA – apresentam comportamentos diferentes em locais diferentes da região de estudo (LeSage, 1999). Os modelos BN não consideram estes dois aspectos porque, ao prever o número de acidentes em um determinado local, os números de acidentes em outros locais do espaço não são considerados e os coeficientes estimados para as variáveis explicativas são únicos para todos os locais, não havendo variação espacial.

Estudos analisando as relações espaciais entre os acidentes e o ambiente construído são escassos. Em muitos estudos macroscópicos de acidentes, foram aplicados modelos espaciais locais, como a regressão geograficamente ponderada (RGP) com distribuição de Poisson – RPGP (Li *et al.*, 2013; Xu e Huang, 2015), mas apenas algumas pesquisas analisaram todas as dimensões do ambiente construído. Além disso, modelos RPGP consideram a dependência e a heterogeneidade espaciais, mas não são capazes de considerar a superdispersão comumente observada em dados de acidentes. Para superar esta limitação, modelos RGP com distribuição binomial negativa (RBNGP) foram aplicados em pesquisas recentes, com resultados apontando para um melhor desempenho dos modelos RBNGP quando comparados a modelos BN globais e a modelos RPGP (Gomes *et al.*, 2017; Yu e Xu, 2017). Recentemente, Yu e Xu (2017) desenvolveram modelos RBNGP e Huang *et al.* (2018) calibraram um modelo RGP linear para explorar as relações entre o ambiente construído e a segurança viária. Ambos os estudos concluíram que características do ambiente construído são preditores significativos de acidentes e que as relações entre o ambiente construído e os acidentes variam no espaço, justificando o uso de MPA espaciais. Embora haja uma literatura crescente sobre as conexões entre o ambiente construído e a segurança viária, as relações do ambiente construído com acidentes em zonas urbanas ainda não foram suficientemente investigadas a partir de uma perspectiva espacial que considere também a superdispersão dos dados de acidentes, e as estimativas de estudos anteriores podem ser imprecisas devido às limitações dos modelos aplicados.

Este artigo tem por objetivo analisar as relações entre ambiente construído e acidentes de trânsito em zonas de tráfego. Modelos RPGP, RBNGP e modelos BN globais foram calibrados para analisar a influência das cinco principais dimensões do ambiente construído – densidade, diversidade, desenho, acessibilidade ao destino e distância ao transporte coletivo – sobre a frequência de acidentes, bem como investigar as variações espaciais destas influências.

2. AMBIENTE CONSTRUIDO E SEGURANÇA VIÁRIA

Ambiente construído é um conceito amplo que inclui padrões de uso do solo, sistema de transporte e características de desenho que combinados promovem oportunidades de realização

de viagens e atividade física (Transportation Research Board, 2005). De acordo com Ewing e Dumbaugh (2009), os padrões de desenvolvimento urbano e o desenho viário, os dois grandes componentes do ambiente construído, afetam a frequência e a severidade dos acidentes por meio de três mediadores: os volumes, as velocidades e os conflitos de tráfego.

O ambiente construído é usualmente descrito por cinco características principais ou dimensões que começam em inglês com a letra “D”: densidade, diversidade de uso do solo, desenho urbano, distância ao transporte coletivo e acessibilidade ao destino (Cervero e Kockelman, 1997; Ewing e Dumbaugh, 2009). Diversos estudos analisaram as relações entre as dimensões do ambiente construído e os acidentes em zonas urbanas. Algumas variáveis apresentam tendências claras em vários estudos conduzidos em diferentes locais em termos de sua associação com a frequência de acidentes.

A densidade, usualmente medida como densidade populacional, é amplamente incluída em pesquisas de segurança, com resultados mostrando que mais acidentes podem ser esperados em áreas com mais residentes, mesmo após controlar a exposição (Dumbaugh *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014; Pirdavani *et al.*, 2014). Entretanto, mesmo quando associada a mais acidentes, a densidade não se mostra uma variável especialmente significativa para entender a incidência de acidentes quando comparada a outras variáveis e dimensões do ambiente construído (Ouyang e Bejleri, 2014). Em alguns estudos, a densidade populacional foi associada a menos acidentes, um resultado atribuído ao fato de que os moradores de ambientes densos tipicamente dirigem menos, reduzindo sua exposição (Dumbaugh e Rae, 2009) e à comum priorização de investimentos em segurança em áreas densamente povoadas.

O desenho é usualmente representado por variáveis relacionadas a interseções ou à rede viária. Mais interseções significam um maior número de conflitos, mas também interrupções mais frequentes de longos trechos de vias, levando a reduções de velocidade. Diferentes tipos de interseções têm desempenho diferente em segurança. Interseções de três aproximações têm sido associadas a menos acidentes (Ukkusuri *et al.*, 2012), enquanto que interseções mais complexas, com quatro ou mais aproximações, têm sido consistentemente associadas a mais acidentes (Dumbaugh *et al.*, 2013; Ukkusuri *et al.*, 2012; Y. Zhang *et al.*, 2015).

Quanto à rede viária, mais acidentes são esperados em áreas com maior concentração de vias de alta velocidade. Arteriais apresentaram um efeito positivo sobre os acidentes em muitos estudos (Dumbaugh *et al.*, 2013; Wier *et al.*, 2009). Vias locais, como esperado, têm sido associadas a menos acidentes em áreas urbanas (Ukkusuri *et al.*, 2012).

A distância ao transporte coletivo, geralmente medida em estudos de segurança como número ou densidade de pontos de ônibus ou estações de trem, tem sido associada a mais acidentes (Ukkusuri *et al.*, 2012; Wei e Lovegrove, 2013). Paradas e estações de transporte coletivo geralmente estão localizadas nas vias principais, em áreas que atraem pessoas e veículos, aumentando a possibilidade de conflitos entre pedestres e veículos, e entre ônibus e outros veículos.

As tendências de algumas variáveis, no entanto, permanecem pouco claras devido ao número limitado de estudos. Medidas de entropia, amplamente usadas em estudos de viagem para representar a diversidade, não são comumente incluídas em análises de acidentes. Alguns estudos sugerem que um uso do solo mais diversificado está associado a mais acidentes

(Ouyang e Bejleri, 2014). A acessibilidade ao destino, que mede a facilidade de acesso às atrações da viagem (Ewing e Cervero, 2010), também não é amplamente utilizada em análises de segurança. A distância ao centro foi incluída em alguns estudos para representar a acessibilidade regional, com áreas mais próximas do centro da cidade associadas a um maior total de acidentes e menos acidentes fatais (Marshall e Garrick, 2011), resultados provavelmente relacionados ao tráfego de passagem mais intenso e às velocidades mais baixas esperadas em áreas mais próximas ao centro da cidade. A distância ao comércio, que representa a acessibilidade local, foi associada a menos acidentes (Ouyang e Bejleri, 2014).

3. MÉTODO

Este estudo foi realizado com dados da base georreferenciada da cidade de Porto Alegre, incluindo informações socioeconômicas do Censo 2010. A cidade é dividida em 97 zonas de tráfego (ZTs), nas quais 19.607 acidentes com vítimas ocorreram entre os anos de 2010 e 2012. As bases de dados de acidentes e da rede viária foram fornecidas por diferentes departamentos da EPTC. Dados de uso do solo foram obtidos do Censo de 2010 e da Secretaria Municipal de Produção, Indústria e Comércio (SMIC). As relações entre ambiente construído e acidentes de trânsito em zonas de tráfego foi analisada a partir das seguintes etapas: i) seleção e análise das variáveis; ii) desenvolvimento e avaliação dos modelos; e iii) cálculo de medidas de ajustes e comparação dos modelos; e iv) análise da dependência espacial.

3.1. Seleção e análise das variáveis

As variáveis para representar o ambiente construído foram selecionadas a partir da revisão da literatura e considerando sua influência esperada sobre a frequência de acidentes. Antes da calibração dos modelos, os coeficientes de correlação de Pearson e o fator de inflação de variância (VIF) foram calculados para avaliar a correlação e a multicolinearidade entre as variáveis explicativas. Um valor do coeficiente de correlação de Pearson igual a 0,7 foi considerado como o limite para correlação forte (Heiberger e Holland, 2015). Variáveis que apresentaram alta correlação e/ou alta multicolinearidade foram eliminadas.

3.2. Desenvolvimento e avaliação dos modelos

Foram calibrados três modelos: modelo BN global, modelo RPGP e modelo RNBGP. A calibração dos modelos espaciais RPGP e RNBGP foi realizada com um conjunto de macros SAS/IML© (Silva e Rodrigues, 2016). As formulações dos modelos adotadas neste estudo são apresentadas a seguir:

3.2.1. Modelo BN global

O modelo BN adotado neste estudo é dado por (Hadayeghi, 2009):

$$E(y) = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \dots + \beta_n x_n) \quad (1)$$

em que $E(y)$ é o valor esperado da frequência de acidentes, x_i são as variáveis explicativas ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) e β_i são os parâmetros a serem estimados pelo modelo ($i = 0, 1, 2, \dots, n$).

3.2.2. Modelo RPGP

O modelo RPGP adotado neste estudo é dado por (Nakaya *et al.*, 2005):

$$y_j \sim \text{Poisson} \left[t_j \exp \left(\sum_k \beta_k (u_{xj}, u_{yj}) x_{jk} \right) \right] \quad (2)$$

em que y_j é a frequência de acidentes na zona j ($j = 1, \dots, n$), x_{jk} é a k -ésima variável explicativa na zona j ($k = 1, \dots, K$), β_k é o parâmetro do modelo estimado para a variável explicativa x_{jk} , e

t_j é uma variável *offset*. β_k é função da localização $u_j = (u_{xj}, u_{yj})$ que denota as duas coordenadas do j -ésimo ponto (centroide da ZT) no espaço. Cada coeficiente β_k é estimado com base em uma amostra de observações, ponderadas de acordo com sua proximidade à zona j . Esta influência é calculada usando a largura de banda, que pode ser constante (kernel fixo) ou variável (kernel adaptativo). Ambas as opções foram testadas para determinar a ótima largura de banda para cada modelo, sendo escolhida a largura de banda que apresentou o menor AICc (Silva e Rodrigues, 2014). O mesmo procedimento foi adotado no modelo RNBGP. O AICc é definido como (Silva e Rodrigues, 2014):

$$AIC_c = -2L(\beta, \alpha) + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (3)$$

em que k é o número efetivo de parâmetros no modelo e $L(\beta, \alpha)$ é o log da verossimilhança.

3.2.3. Modelo RNBGP

O modelo RNBGP adotado neste estudo é dado por (Silva e Rodrigues, 2014):

$$y_j = \sim NB \left[t_j \exp \left(\sum_k \beta_k(u_{xj}, u_{yj}) x_{jk} \right), \alpha(u_{xj}, u_{yj}) \right] \quad (4)$$

em que NB representa Binomial Negativa, α é o parâmetro de superdispersão que também varia com a localização $u_j = (u_{xj}, u_{yj})$ e as demais variáveis são as mesmas utilizadas na equação do modelo RPGP.

3.3. Medidas de qualidade de ajuste e comparação dos modelos

As medidas utilizadas para quantificar e comparar o desempenho dos modelos são o AICc e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), definida como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad (5)$$

em que Y_i é o número observado de acidentes na zona i , \hat{Y}_i é o número previsto de acidentes na zona i e N é o número de zonas. Para ambas as medidas, valores menores indicam um melhor desempenho do modelo.

3.4. Análise da dependência espacial

A eficiência dos modelos também foi analisada em relação à dependência espacial dos seus resíduos. A autocorrelação espacial dos resíduos dos modelos foi testada por meio do Índice Global de Moran (I). Os valores do índice I de Moran variam de -1 (autocorrelação negativa forte) a 1 (autocorrelação positiva forte). Um valor próximo de zero indica falta de correlação.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis selecionadas agregadas por ZT.

4.1. Resultado do desenvolvimento e avaliação dos modelos

Os resultados dos modelos estimados são apresentados na Tabela 2. Os resultados dos modelos RPGP e RNBGP incluem a média, valores mínimo e máximo, 1º e 3º quartis dos coeficientes. Para estes modelos, a análise a seguir considera o valor médio dos coeficientes estimados para verificar a associação de cada variável explicativa com a frequência de acidentes com vítimas nas ZTs.

Tabela 1: Estatística descritiva das variáveis

Categoria	Variável	Descrição	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Acidentes	NOICs	Total de acidentes com vítimas	204,85	6	546	119,58
Exposição	NOTs	Número de viagens (x1000)	20,10	0,27	90,31	14,62
Socioeconômica	INC	Renda média [R\$]	1607,24	0,00	4742,97	1083,40
Densidade	POPD	Densidade populacional [hab/ha]	76,51	0,00	282,51	56,57
Diversidade	I _{div}	Índice de diversidade	0,40	0,02	0,87	0,22
Desenho	D3LI	Densidade de interseções de 3 aproximações [nº/ha]	0,49	0,04	1,41	0,29
	D4MLI	Densidade de interseções de 4 ou mais aproximações [nº/ha]	0,23	0,00	0,65	0,16
	SIGD	Densidade de semáforos [nº/ha]	0,12	0,00	0,53	0,12
	LOC	Proporção de vias locais	0,67	0,09	1,00	0,17
	COL	Proporção de vias coletoras	0,04	0,00	0,43	0,07
	ART	Proporção de vias arteriais	0,14	0,00	0,46	0,08
Acessibilidade ao destino	DCSU	Densidade de unidades de comércio & serviços [nº/ha]	10,65	0,00	128,68	18,22
	CBDdist	Distância do centro da cidade [km]	6,84	0,16	26,58	5,00
Distância ao transporte coletivo (TC)	BSD	Densidade de paradas de ônibus [nº/ha]	0,29	0,00	1,73	0,25

Como esperado, em todos os modelos a variável NOTs (número de viagens) apresentou coeficiente positivo, indicando que zonas com maior número de viagens foram associadas a mais acidentes com vítimas. Nos modelos BN (global e espacial), áreas com maior renda tiveram menos acidentes com vítimas, um resultado que é consistente com estudos anteriores (Cai *et al.*, 2017; Wier *et al.*, 2009). Vários fatores relacionados à renda podem influenciar o risco de acidentes, como a propriedade de veículos, idade e condição de manutenção dos veículos, tolerância ao risco e qualidade geral do ambiente viário em zonas de diferentes níveis de renda.

Em relação ao ambiente construído, apenas duas das dimensões mostraram efeito significativo sobre a frequência de acidentes: diversidade e desenho. As interseções não tiveram o desempenho esperado: os efeitos das interseções de três e de quatro ou mais aproximações não foram estatisticamente significativos.

Ao comparar os coeficientes estimados nos diferentes modelos, observa-se que o modelo RNBGP mostra coeficientes médios muito semelhantes aos coeficientes do modelo BN. No modelo RPGP, os coeficientes médios das variáveis NOTs (número de viagens) e ART (proporção de vias arteriais) são similares aos valores calibrados nos demais modelos, enquanto que os coeficientes médios de I_{div} (índice de diversidade) e INC (renda média) são diferentes dos estimados nos modelos BN (global e espacial). O RPGP é o único modelo no qual a variável renda foi positivamente associada a acidentes, de acordo com seu coeficiente médio. As

diferenças entre os coeficientes dos modelos RPGP e dos modelos BN global e espacial provavelmente se devem ao fato de o modelo RPGP não ser capaz de considerar a superdispersão dos dados de acidentes.

Tabela 2: Resultados dos modelos

Categoria	Variável	BN		RPGP					RBNGP				
		β	p-valor	Média	Min.	Max.	1º Q.	3º Q.	Média	Min.	Max.	1º Q.	3º Q.
-	Intercepto	-0,79	0,2338	-1,40	-11,14	7,03	-4,33	0,79	-0,54	-4,64	2,41	-2,13	1,16
Exposição	ln (NOTs)	0,55	<0,0001	0,59	-0,33	1,57	0,37	0,82	0,52	0,28	0,91	0,35	0,67
Socioeconômica	INC	-0,0002	<0,0001	0,0001	-0,002	0,003	-0,0002	0,0001	-0,0001	-0,0002	0,0002	-0,0001	-0,0001
Densidade	POPD												
Diversidade	I_{div}	1,52	<0,0001	0,31	-15,76	6,62	0,24	1,78	1,02	-0,85	1,66	0,90	1,57
Desenho	D3LI												
	D4MLI												
	SIGD												
	COL												
	ART	3,41	<0,0001	2,83	-9,16	10,53	0,40	5,44	3,39	0,63	9,14	1,56	4,84
Acessibilidade ao destino	CBDdist												
Distância ao TC	BSD												
Largura de banda ^a		-		13					67				
Qualidade de ajuste	AICc	1138,77		1792,95					1113,91				
	RMSE	92,7		38,1					74,3				

a: número de vizinhos (kernel adaptativo)

Modelos RGP estimam um conjunto de coeficientes locais que podem ou não ser significativos, bem como podem apresentar sinais diferentes e inesperados, em cada zona. Isto é amplamente observado nos resultados do modelo RPGP, que estimou coeficientes positivos e negativos para todas as variáveis, como mostrado na Tabela 2 pelos valores mínimo e máximo dos coeficientes estimados para as variáveis explicativas. Quando comparado ao RBNGP, o modelo RPGP estimou um intervalo mais amplo de coeficientes para todas as variáveis. A maior variação observada nos coeficientes do modelo RPGP se deve à sua menor largura de banda; como resultado, o modelo precisa de mais parâmetros para se ajustar aos dados existentes, aumentando o risco de sobreajuste.

O problema dos sinais inesperados é comum em modelos RPGP (Hadayeghi *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013) e pode ser devido à sua base de calibração. É possível que os modelos locais produzam sinais contra-intuitivos para as variáveis que não são significativas em algumas zonas (Hadayeghi *et al.*, 2010; Pirdavani *et al.*, 2014). Esta possibilidade foi investigada por meio do mapeamento das estatísticas *t* locais para identificar onde as relações são significativas com 95% de confiança. A significância estatística dos coeficientes foi avaliada por meio de testes robustos em relação à multicolinearidade entre as variáveis explicativas (Fotheringham e Oshan, 2016; Silva e Fotheringham, 2016). A maioria dos coeficientes com sinais inesperados não se mostrou significativa. Ainda assim, o problema dos sinais inesperados é mais pronunciado no modelo RPGP do que no modelo RBNGP, o que também pode ter sido causado pela incapacidade do modelo RPGP de considerar a superdispersão dos acidentes.

A distribuição espacial dos coeficientes dos modelos RPGP e RBNGP é mostrada na Figura 1 e Figura 2. Para todas as variáveis, o modelo RBNGP fornece uma distribuição espacial de coeficientes que é mais homogênea, diferentemente do RPGP.

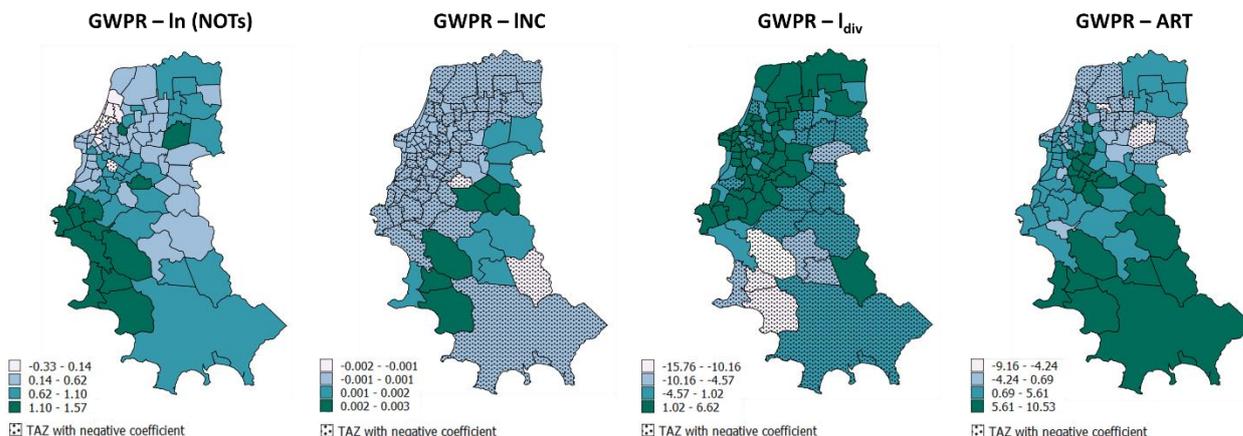


Figura 1: Distribuição espacial dos coeficientes do modelo RPGP (GWPR)

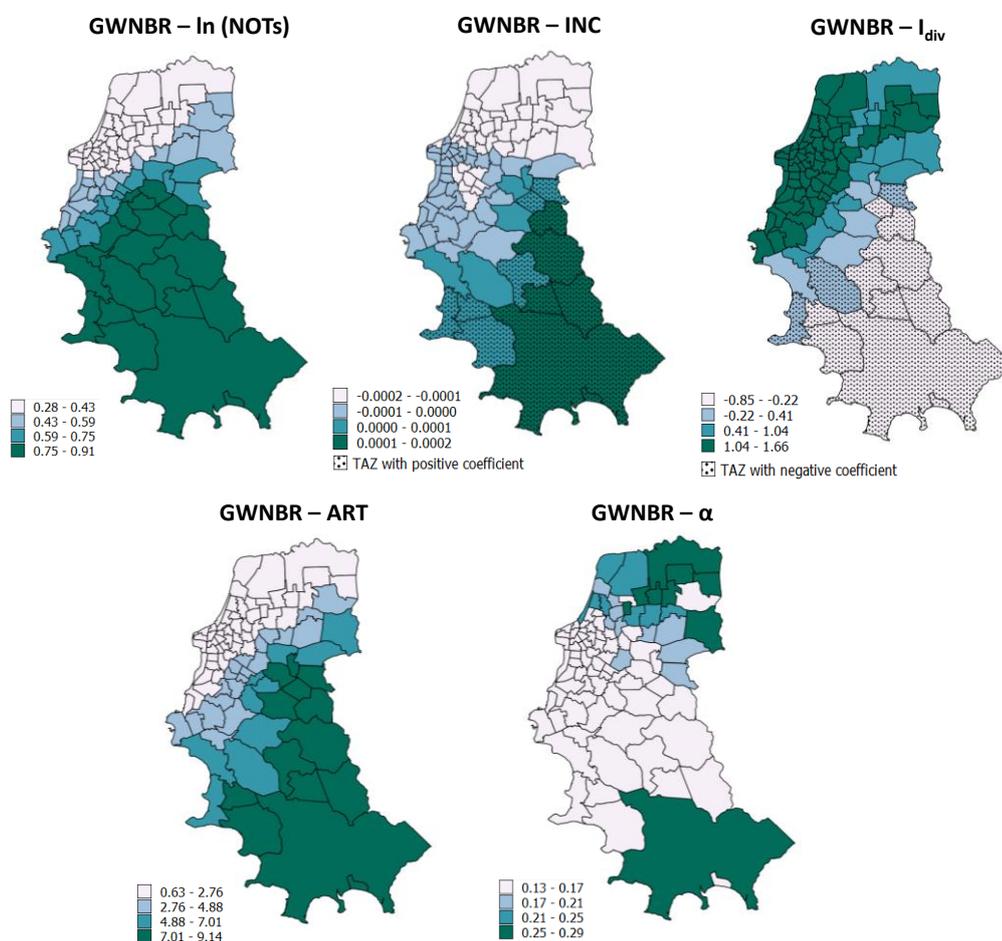


Figura 2: Distribuição espacial dos coeficientes do modelo RNBGP (GWNBR)

Vias arteriais foram associadas a mais acidentes, um resultado que é consistente com pesquisas anteriores (Dumbaugh *et al.*, 2013; Wier *et al.*, 2009; Yu e Xu, 2017) e provavelmente relacionado com as velocidades mais altas geralmente esperadas em arteriais. A distribuição espacial dos coeficientes mostra que o efeito da variável é mais pronunciado na região sul e

pouco significativo no norte da cidade. É possível que as vias arteriais estejam atuando como uma variável proxy de exposição, uma vez que tendem a registrar maior tráfego de passagem. Além disso, as vias arteriais na área de estudo são desenhadas para tráfego em velocidades mais altas, concentram polos atratores de viagens, circulação de transporte coletivo e muitas apresentam estacionamento junto ao meio-fio. Essas características criam uma mistura complexa de ambientes de tráfego e urbano que aumentam a carga sobre os condutores e os conflitos de tráfego, podendo resultar em mais acidentes.

Um uso do solo mais diverso foi associado a mais acidentes, como em estudos anteriores (Amoh-Gyimah *et al.*, 2017; Rhee *et al.*, 2016). Os coeficientes são mais altos no centro e na parte norte da cidade, onde o uso do solo é mais diversificado. Áreas com uso do solo mais diversificado geralmente concentram o tráfego de veículos e pedestres, levando a mais exposição, mais conflitos e, possivelmente, mais acidentes.

Os resultados dos modelos RPGP e RBNGP confirmam que as relações entre os acidentes e o ambiente construído variam no espaço, como observado em estudos anteriores (Huang *et al.*, 2018; Yu e Xu, 2017). É possível que uma mesma característica do ambiente construído afete os volumes, conflitos e velocidades de tráfego de maneira diferente em locais diferentes, levando a diferentes resultados de segurança. Além disso, combinações diferentes de características do ambiente construído podem influenciar conjuntamente os acidentes.

4.2. Qualidade de ajuste dos modelos, comparação dos modelos e análise da dependência espacial

O modelo RBNGP apresenta o melhor desempenho em relação ao AICc. O pior desempenho foi do modelo RPGP, um resultado provavelmente relacionado à incapacidade do modelo de considerar a superdispersão dos dados de acidentes. Por outro lado, o modelo RPGP apresenta o menor erro de previsão (RMSE), um resultado do maior ajuste deste modelo a valores extremos quando comparado ao modelo RBNGP. O modelo RBNGP é menos vulnerável a valores extremos, já que seus coeficientes apresentam menor variação. Isso é mostrado pela variação espacial mais homogênea dos coeficientes do modelo RBNGP (Figura 2).

A Tabela 3 apresenta os resultados do Índice Global de Moran (I), utilizado para testar a existência de autocorrelação espacial dos resíduos dos modelos. Os resultados mostram que os modelos BN (global e espacial) produziram resíduos sem dependência espacial significativa, ao contrário do modelo RPGP. Cabe ressaltar que o modelo RPGP apresentou os menores erros de previsão, o que mostra que um modelo local com bom desempenho preditivo não garante resultados espacialmente não enviesados. O modelo RBNGP apresentou erros de previsão ligeiramente superiores, mas com resíduos espacialmente independentes e AICc inferior quando comparado ao modelo RPGP. Resultados semelhantes foram observados por Gomes et al. (2017) ao comparar modelos RPGP e RBNGP baseados em ZTs.

Tabela 3: Dependência espacial dos resíduos dos modelos

Modelo	I de Moran	p-valor
NB	0.015	0.33
RPGP	-0.162	0.03
RBNGP	-0.071	0.15

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma análise da relação entre ambiente construído e acidentes de trânsito em zonas de tráfego. Foram calibrados três diferentes modelos de previsão de acidentes: um modelo tradicional global de regressão binomial negativa (BN), um modelo de regressão de Poisson geograficamente ponderada (RPGP) e um modelo de regressão binomial negativa geograficamente ponderada (RBNGP). Os três modelos foram calibrados para analisar a influência das cinco principais dimensões do ambiente construído – densidade, diversidade, desenho, acessibilidade ao destino e distância ao transporte coletivo – sobre a frequência de acidentes com vítimas.

Duas das dimensões do ambiente construído – diversidade e desenho – se mostraram preditores significativos dos acidentes nas zonas de tráfego. Zonas com maior proporção de vias arteriais e uso do solo mais diverso foram associadas a mais acidentes com vítimas. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores e confirmam a importância dessas variáveis para entender o risco de acidentes em uma escala de zonas urbanas.

Em relação aos modelos utilizados, o modelo RPGP apresentou os menores erros de previsão, mas produziu resíduos espacialmente dependentes, o que não é desejável. O modelo RBNGP, por outro lado, apresentou erros de previsão ligeiramente maiores, mas também uma melhor qualidade de ajuste e resíduos espacialmente independentes, registrando um melhor desempenho.

A análise de acidentes em uma escala de zonas de tráfego tem como uma de suas principais vantagens a possibilidade de integrar facilmente os resultados da análise com o planejamento urbano e de transportes. Os resultados deste estudo podem ser usados para embasar programas e ações que visem requalificar vias arteriais e áreas de uso misto do solo para incentivar velocidades mais baixas e reduzir os conflitos de tráfego, proporcionando benefícios em segurança.

Uma limitação deste trabalho consiste na ausência de variáveis importantes para explicar a acidentalidade, como por exemplo os fluxos de tráfego. Análises futuras podem explorar o impacto de diferentes combinações de características do ambiente construído sobre a incidência de acidentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amoh-Gyimah, R., Saberi, M., e Sarvi, M. (2017) The effect of variations in spatial units on unobserved heterogeneity in macroscopic crash models. *Analytic Methods in Accident Research*, 13, 28–51.
- Cai, Q., Abdel-Aty, M., Lee, J., e Eluru, N. (2017) Comparative analysis of zonal systems for macro-level crash modeling. *Journal of Safety Research*, 61, 157–166.
- Cervero, R., e Kockelman, K. (1997) Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity and Design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3), 199–219.
- Dumbaugh, E., Li, W., e Joh, K. (2013) The built environment and the incidence of pedestrian and cyclist crashes. *URBAN DESIGN International*, 18(3), 217–228.
- Dumbaugh, E., e Rae, R. (2009) Safe Urban Form: Revisiting the Relationship Between Community Design and Traffic Safety. *Journal of the American Planning Association*, 75(3), 309–329.
- Ewing, R., e Cervero, R. (2010) Travel and the Built Environment. *Journal of the American Planning Association*, 76(3), 265–294.
- Ewing, R., e Dumbaugh, E. (2009) The Built Environment and Traffic Safety: A Review of Empirical Evidence. *Journal of Planning Literature*, 23(4), 347–367.
- Fotheringham, A. S., e Oshan, T. M. (2016) Geographically weighted regression and multicollinearity: dispelling the myth. *Journal of Geographical Systems*, 18(4), 303–329.

- Gomes, M. J. T. L., Cunto, F., e Silva, A. R. (2017) Geographically weighted negative binomial regression applied to zonal level safety performance models. *Accident Analysis and Prevention*, 106, 254–261.
- Hadayeghi, A. (2009) *Use of Advanced Techniques to estimate Zonal Level Safety Planning Models and Examine Their Temporal Transferability*. University of Toronto.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. S., e Persaud, B. (2010) Development of planning level transportation safety tools using Geographically Weighted Poisson Regression. *Accident Analysis and Prevention*, 42(2), 676–88.
- Heiberger, R. M., e Holland, B. (2015) *Statistical Analysis and Data Display – an Intermediate Course with Examples in R*. (2nd editio.). Springer-Verlag New York.
- Huang, Y., Wang, X., e Patton, D. (2018) Examining spatial relationships between crashes and the built environment: A geographically weighted regression approach. *Journal of Transport Geography*, 69, 221–233.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., e Jiang, X. (2014) Development of zone system for macro-level traffic safety analysis. *Journal of Transport Geography*, 38, 13–21.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., e Jiang, X. (2015) Multivariate crash modeling for motor vehicle and non-motorized modes at the macroscopic level. *Accident Analysis and Prevention*, 78, 146–154.
- LeSage, J. P. (1999) *The Theory and Practice of Spatial Econometrics*. (Vol. 2). Department of Economics, University of Toledo. doi:10.1016/0169-2070(86)90119-6
- Li, Z., Wang, W., Liu, P., Bigham, J. M., e Ragland, D. R. (2013) Using Geographically Weighted Poisson Regression for county-level crash modeling in California. *Safety Science*, 58, 89–97.
- Marshall, W. E., e Garrick, N. W. (2011) Does street network design affect traffic safety? *Accident Analysis and Prevention*, 43(3), 769–81.
- Nakaya, T., Fotheringham, A. S., Brunson, C., e Charlton, M. (2005) Geographically weighted Poisson regression for disease association mapping. *Statistics in Medicine*, 24(17), 2695–2717.
- Ouyang, Y., e Bejleri, I. (2014) A GIS-Based Community Level Method to Evaluate the Influence of Built Environment on Traffic Crashes. *93rd Transportation Research Board Annual Meeting*. Transportation Research Board, 2014, Washington, D.C.
- Pirdavani, A., Bellemans, T., Brijs, T., e Wets, G. (2014) Application of Geographically Weighted Regression Technique in Spatial Analysis of Fatal and Injury Crashes. *Journal of Transportation Engineering*, 140(8), 1–10.
- Rhee, K.-A., Kim, J.-K., Lee, Y., e Ulfarsson, G. F. (2016) Spatial regression analysis of traffic crashes in Seoul. *Accident Analysis and Prevention*, 91, 190–199.
- Silva, A. R. da, e Fotheringham, A. S. (2016) The Multiple Testing Issue in Geographically Weighted Regression. *Geographical Analysis*, 48, 233–247.
- Silva, A. R. da, e Rodrigues, T. C. V. (2014) Geographically Weighted Negative Binomial Regression — incorporating overdispersion. *Statistics and Computing*, 24(5), 769–783.
- Silva, A. R. da, e Rodrigues, T. C. V. (2016) A SAS Macro for Geographically Weighted Negative Binomial Regression. Available at: <<http://support.sas.com/resources/papers/proceedings16/8000-2016.pdf>>. Obtido de <http://support.sas.com/resources/papers/proceedings16/8000-2016.pdf>
- Transportation Research Board. (2005) *Does the built environment influence physical activity? Examining the evidence - Special Report 282. Built Environment*.
- Ukkusuri, S., Miranda-Moreno, L. F., Ramadurai, G., e Isa-Tavarez, J. (2012) The role of built environment on pedestrian crash frequency. *Safety Science*, 50, 1141–1151.
- Wei, F., e Lovegrove, G. R. (2013) An empirical tool to evaluate the safety of cyclists: Community based, macro-level collision prediction models using negative binomial regression. *Accident Analysis and Prevention*, 61, 129–137.
- Wier, M., Weintraub, J., Humphreys, E. H., Seto, E., e Bhatia, R. (2009) An area-level model of vehicle-pedestrian injury collisions with implications for land use and transportation planning. *Accident Analysis and Prevention*, 41(1), 137–45.
- Xu, P., e Huang, H. (2015) Modeling crash spatial heterogeneity: Random parameter versus geographically weighting. *Accident Analysis and Prevention*, 75, 16–25.
- Yu, C., e Xu, M. (2017) Local Variations in the Impacts of Built Environments on Traffic Safety. *Journal of Planning Education and Research*, 1–15.
- Zhang, C., Yan, X., Ma, L., e An, M. (2014) Crash Prediction and Risk Evaluation Based on Traffic Analysis Zones. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1–9. doi:10.1155/2014/987978
- Zhang, Y., Bigham, J., Ragland, D., e Chen, X. (2015) Investigating the associations between road network structure and non-motorist accidents. *JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY*, 42, 34–47.

Marta R. Obelheiro (marta.obelheiro@gmail.com)

WRI Brasil

Av. Independência, 1299/401 – Porto Alegre, RS, Brasil

Alan Ricardo Silva

Departamento de Estatística, Universidade de Brasília

Campus Universitario Darcy Ribeiro, Predio CIC/EST Sala A1 35/28

Christine Tessele Nodari

Laboratório de Sistema de Transportes, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Osvaldo Aranha, 99 5º andar LASTRAN – Porto Alegre, RS, Brasil