

ARTIGO

SOBRE A VALIDAÇÃO DE MODELOS MICROSCÓPICOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Paulo C. M. Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Mestrado em Transportes
Universidade de Brasília

Nick Tyler

Centre for Transport Studies
University College London

RESUMO

Este trabalho discute a adequação dos métodos estatísticos convencionais empregados na validação de modelos microscópicos de simulação de tráfego. Após identificar a incompatibilidade entre as condições de aplicação destes métodos e a natureza das variáveis do tráfego usados nos processos de validação, o trabalho apresenta a adaptação de um teste paramétrico previamente usado, com limitações, no estudo de um modelo de simulação de tráfego ininterrupto em vias de tráfego expresso. A aplicação do teste na validação de um modelo desenvolvido para simular as interações veiculares nas redondezas de paradas de ônibus é então sucintamente descrita e seus resultados são discutidos. O procedimento de validação mostra-se útil e o modelo de simulação é considerado válido. O exercício também revela aspectos do procedimento que precisam ser melhor trabalhados.

ABSTRACT

This paper discusses the adequacy of conventional statistical methods employed in the validation of microscopic traffic simulation models. After identifying the incompatibility between the conditions to apply these methods and the nature of the traffic variables used in

the validation processes, the paper introduces the adaptation of a parametric test previously used, with a few limitations, in the study of a simulation model for uninterrupted traffic in freeways. The application of the test to validate a model developed to simulate the vehicular interactions in the surroundings of bus stops is then briefly described and its results are discussed. The validation procedure proves useful and the simulation model is deemed valid. The exercise also reveals aspects of the procedure that need further improvement.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo tem o objetivo de contribuir para o avanço do estado da prática da validação de modelos de simulação de tráfego. A literatura corrente sugere que modelos microscópicos devem ser validados nos níveis microscópico e macroscópico. Em ambos os casos, recomenda-se o uso de ferramentas estatísticas capazes de testar os modelos quantitativamente. Entretanto, diversas dificuldades levam os pesquisadores a optarem na prática por um destes dois níveis — e os relatos mostram que o nível macroscópico tem ampla preferência.

Os esforços de validação nos dois níveis esbarram em uma dificuldade metodológica. As variáveis que expressam os fenômenos microscópicos do tráfego raramente atendem aos requisitos de independência e aleatoriedade de observações exigidos pelos métodos estatísticos convencionais. O resultado prático disso é que vários exercícios de validação utilizam métodos estatísticos apenas no nível macroscópico, deixando para a essência da modelagem (os aspectos microscópicos do fenômeno simulado) apenas testes visuais.

Depois de fazer um apanhado sobre a natureza dos modelos de tráfego e os procedimentos correntemente em uso para sua validação, este artigo descreve um método estatístico que leva em consideração a autocorrelação e a não estacionaridade das variáveis testadas. Com isso é possível validar quantitativamente os aspectos microscópicos de modelos microscópicos, reservando a validação quantitativa baseada em comparações visuais para os aspectos macroscópicos dos modelos. Isso é demonstrado com um exemplo prático.

2. A NATUREZA DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A classificação dos modelos de simulação de tráfego segue a terminologia historicamente adotada na teoria do fluxo de tráfego — ver, por exemplo, Wattleworth (1976). Nos dois extremos do espectro estão os modelos macroscópicos e microscópicos. Para alguns autores — e.g. Payne (1979) — justifica-se considerar modelos mesoscópicos como uma categoria à parte. Em qualquer caso, o que distingue os modelos microscópicos dos demais é o nível de desagregação em que os elementos dos sistemas de tráfego são tratados.

Com efeito, a abordagem macroscópica vê as correntes de tráfego como meios fluidos contínuos, nos quais a noção de partícula não é considerada. As variáveis macroscópicas do tráfego aplicam-se ao conjunto dos veículos trafegando em uma determinada via ou trecho de via e representam os valores médios associados a esses conjuntos.

A abordagem mesoscópica adota um nível de agregação mais baixo. O modelo de simulação de tráfego mais popular dentro desta categoria, o TRANSYT (Robertson, 1969), considera sistemas de tráfego como compostos de elementos discretos, mas tais elementos não são unitários. São os chamados *perfis cíclicos de tráfego* que representam os pelotões de veículos que se formam nas interseções semaforizadas e se dispersam ao percorrerem trechos entre interseções.

Ao contrário dos outros dois grupos, os modelos microscópicos tratam das relações de cada veículo individualmente com outros veículos que com o primeiro interagem. As primeiras formulações microscópicas para sistemas de tráfego datam de meados do século passado e referem-se a uma série de experimentos conduzidos nos laboratórios da General Motors (Herman, 1961). Estas formulações, conhecidas como *leis de seqüência*, assumem que a variação da velocidade de um determinado veículo (o *seguidor*) na corrente de tráfego é proporcional à aceleração do veículo que trafega a sua frente (o *líder*) e ao inverso da distância que separa os dois veículos.

Alternativamente a esta abordagem clássica de *estímulo-reação*, foi desenvolvida uma formulação cuja ênfase está na consideração de que motoristas não reagem tão instantaneamente às mudanças de comportamento do *líder*; em vez disso, motoristas tendem a acelerar ou desacelerar apenas para aproximar a velocidade dos valores desejados ou para evitar uma colisão com o *líder* — ver, por exemplo, Benekahal e Treiterer (1988), e Hossain e McDonald (1998). Gipps (1981) desenvolveu um modelo que na prática combina as duas abordagens, fazendo prevalecer uma ou outra restrição conforme sejam as circunstâncias em que se encontrem os veículos.

Em todos os casos de modelos microscópicos prevalece a condição de que é o movimento de cada veículo individualmente que é representado. Disso decorre que metodologias para testar tais modelos só verificarão a correção de seus mecanismos de representação se incluírem a análise do desempenho de veículos individuais.

3. MÉTODOS CORRENTES DE VALIDAÇÃO

Autores que se dispuseram a discutir métodos de validação para modelos de simulação em geral são unânimes na constatação de que não há procedimento capaz de validar todo e qualquer tipo de modelo. A escolha da metodologia é sempre dependente do problema, como afirma Sargent (1982). Law e Kelton (2000) assinalam que se existisse uma abordagem completamente definitiva para o problema da validação talvez nem houvesse necessidade do modelo de simulação, acrescentando que o método apropriado é altamente dependente não só da natureza do fenômeno sendo simulado, mas também do uso que se pretende fazer do modelo. Pidd (1998) vai ainda mais além e encara o problema na perspectiva da falsificação de teorias científicas, segundo a definição de Popper (1959): não se pode mostrar de forma absoluta que modelos de simulação são verdadeiros, já que há sempre a possibilidade de observações obtidas do modelo e do sistema real estarem em conflito. Gipps (1986) endossa esta tese admitindo que extensas baterias de testes sem erros podem apenas aumentar a confiança num modelo, mas não provam que o modelo é absolutamente correto.

De todo modo, há autores que se esforçam para estabelecer pelo menos o que pode ser tomado como diretrizes para o desenvolvimento de métodos de validação. No campo específico de modelos microscópicos de simulação de tráfego, uma importante contribuição é apresentada por Benekohal (1991). Resumidamente, este autor propõe que modelos microscópicos devem ser validados tanto no nível macroscópico como no nível microscópico, embora admita que este último é talvez a tarefa mais difícil do processo. Neste nível, Benekohal sugere que sejam examinados pelos menos alguns dos seguintes parâmetros: perfis de velocidade e localização de veículos individuais, intervalos de tempo e espaçamentos entre sucessivos veículos.

O problema que se segue é o da validação quantitativa das variáveis microscópicas do tráfego. Dois dos requisitos essenciais dos métodos estatísticos convencionais são a aleatoriedade e a independência das observações. Se se tomam as variáveis sugeridas por Benekohal, que sem dúvida alguma expressam grandezas microscópicas do tráfego, nenhum destes dois requisitos pode ser observado com o rigor que os métodos exigem. Com efeito, a posição de um veículo na via num dado instante não é independente da posição que ele ocupava no instante imediatamente anterior nem da posição do veículo que trafega a sua frente. O mesmo se aplica à velocidade e às outras variáveis listadas por Benekohal.

Estas dificuldades foram registradas por vários autores e o próprio Benekohal, em trabalhos posteriores, admitiu a inaplicabilidade de métodos estatísticos como a análise de regressão e usou apenas a comparação visual entre os comportamentos de veículos na simulação e no sistema real para validar modelos no nível microscópico — ver, por exemplo, Aycin e Benekohal (1998 e 1999). O problema, porém, não é específico de estudos microscópicos de tráfego; para Law e Kelton (2000) os *outputs* de quase todos os sistemas do mundo real e das simulações são não-estacionários e autocorrelacionados, e portanto nenhum dos testes estatísticos clássicos é diretamente aplicável. Hsu e Hunter (1977) vão ainda além e afirmam ser a correlação serial no tempo em si mesma uma importante característica de muitos sistemas simulados.

4. ANÁLISE DE ERRO USANDO SÉRIES TEMPORAIS

De acordo com Rao e Owen (2000), a idéia original de aplicar a análise de erro usando séries temporais em processos de validação de simulação coube a Thomas Tytula, que em 1977 usou o recurso para testar modelos de simulação de sistemas de mísseis. Resumidamente, o processo consiste em:

- Formar uma série temporal das diferenças percentuais entre os valores observados no sistema e simulados pelo modelo;
- Dividir a série em duas parcelas;
- Ajustar um modelo descritivo da série para uma parcela inicial de valores das diferenças; e
- Testar se os valores das diferenças para a segunda parcela caem dentro dos limites calculados pelo modelo descritivo da série.

Rao e Owen (2000) justificam o uso de modelos do tipo ARIMA (do inglês *autorregressive integrated moving average*) (Box *et al.*, 1994) para este tipo de análise porque tais modelos levam em conta simultaneamente duas características consideradas inerentes ao tráfego: a autocorrelação das variáveis e a não-estacionaridade dos processos. O método foi desenvolvido pelos autores para testar um modelo microscópico de simulação de tráfego em vias expressas. A aplicação descrita no referido artigo analisou o desempenho do modelo de simulação em um trecho de entrelaçamento.

As variáveis usadas por Rao e Owen (2000) no exercício de validação foram as velocidades individuais dos veículos e os intervalos de tempo entre dois veículos consecutivos, que são sem dúvida variáveis microscópicas. Porém, o tratamento dado a elas no exercício encerra um alto grau de agregação, o que implica que na prática a comparação se dá ao nível das médias e não dos valores individuais. As séries temporais construídas por Rao e Owen expressam a diferença entre valores correspondentes a veículos que cruzam a seção analisada agrupados em intervalos de 5 minutos. Não há, portanto, uma vinculação inequívoca entre elementos observados no sistema do mundo real e os simulados pelo modelo.

Como será visto a seguir, a maior contribuição que o procedimento apresentado neste artigo traz para o conhecimento produzido no campo da validação reside no respeito à natureza dos fenômenos. O método analisa a diferença no valor de variáveis de veículos individualmente associados entre o conjunto de dados observados em campo e o produzido pela simulação.

A principal consideração que embasa o método é a de que se um modelo microscópico de simulação de tráfego é válido então ele é capaz de reproduzir com fidelidade as manobras dos veículos. Desta forma, se um veículo *B* na simulação está submetido a condições que reproduzem aquelas a que está submetido um veículo *A* observado em campo, se *A* e *B* são veículos do mesmo tipo e se os respectivos motoristas têm as mesmas características, a posição que *B* ocupa em cada instante t_j da simulação equivale à posição que *A* ocupa em cada instante t_i da observação.

Assim, o método apresentado aqui analisa através de modelos ARIMA o erro nas séries formadas pelas diferenças das posições longitudinais e laterais entre os veículos simulados e observados em campo à medida que eles se deslocam. Além dessa diferença — a associação individual entre elementos dos dois conjuntos de dados — em relação ao procedimento descrito por Rao e Owen, o método empregado nesta pesquisa não considera as diferenças percentuais e sim as absolutas entre os valores das variáveis. Isto porque os referenciais de posição são definidos arbitrariamente, sem qualquer significado para as diferenças analisadas.

5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O método delineado neste artigo foi usado no processo de validação de parte do modelo chamado BusSIGSIM (Silva, 2001). Este modelo é uma adaptação da versão paralela (Crosta, 1999) do programa SIGSIM (Silcock, 1993), que desenvolvida para melhor representar as interações veiculares na presença da operação de ônibus. O modelo BusSIGSIM tem outros aspectos, mas apenas o módulo de representação das manobras nas redondezas de paradas de ônibus foi submetida à validação quantitativa de que se ocupa este artigo.

A próxima seção descreve sumariamente as características determinantes deste módulo do BusSIGSIM. Em seguida, a seção 5.2 discute o processo de validação e os resultados da análise de erro usando ARIMA.

5.1. O modelo de simulação

A representação de paradas de ônibus em modelos convencionais de simulação de tráfego é simplista e em geral permite apenas dois tipos de parada: as paradas *off-line* (e.g. baias), em que ônibus parados não causam qualquer interferência nas faixas de rolamento, e as paradas *in-line*, em um ônibus parado provoca o bloqueio completo, ainda que temporário, da faixa de rolamento em que se situa. Na prática, qualquer parada provoca algum tipo de interferência com o tráfego e em quase todos os casos os motoristas encontram formas de ultrapassar os ônibus.

Os veículos simulados no modelo BusSIGSIM podem ultrapassar ônibus nas paradas de diversas formas: mudando completamente de faixa (inclusive usando faixa de sentido oposto), usando parcialmente mais de uma faixa (também podendo usar faixa de sentido oposto), usando brechas na faixa adjacente ou 'espremendo-se' com outras correntes de tráfego na seção onde o ônibus encontra-se parado.

5.2. Processo de validação

O procedimento de validação teve como ponto de partida a coleta de imagens em VHS registrando os fluxos de veículos nas proximidades de duas paradas de ônibus de tipos diferentes. Em seguida, as posições longitudinais e laterais dos veículos foram anotadas a intervalos de 0,667 segundos (o mesmo intervalo padrão usado pelo modelo para atualizar as posições dos veículos). Isso foi feito para as situações em que ocorrem manobras típicas como as mencionadas na seção anterior.

O procedimento em si teve dois estágios. O primeiro pode ser considerado como de nível macroscópico. Diagramas espaço-tempo foram usados para que se pudesse verificar, através de comparação

visual, se veículos na simulação reagem da mesma forma que os observados em campo. Por exemplo, dadas as mesmas circunstâncias em termos de geometria da via, e posições e velocidades dos demais veículos, a comparação visual é capaz de revelar se um determinado veículo simulado reage da mesma forma que seu correspondente na observação de campo, e.g. ultrapassando ou não um ônibus na parada.

A figura 1 ilustra um desses casos. Ela mostra os diagramas espaço-tempo para a faixa de rolamento onde há um ônibus parado, produzidos a partir de observações de campo (a) e da simulação (b). Nos dois casos os veículos mantêm-se atrás do ônibus parado até o surgimento de uma brecha no fluxo oposto (cujos diagramas não são mostrados aqui), quando acontecem as manobras de ultrapassagem.

O segundo estágio constituiu o objeto principal deste artigo, ou seja, a validação quantitativa por meio de teste paramétrico — a análise de erro usando técnicas de séries temporais. O interesse aqui é verificar se o modelo reproduz fielmente as trajetórias seguidas pelos veículos realizando as manobras verificadas no estágio anterior. Para cada veículo observado em campo envolvido nestas manobras foram identificados n (no mínimo 10) veículos j equivalentes na simulação. As séries temporais *longitudinal* e *lateral* foram formadas para as diferenças entre as posições longitudinais e laterais dos veículos na forma descrita a seguir.

Para cada um dos n veículos j identificados na simulação foram calculadas as diferenças $\Delta long_{i,j}$ nas posições longitudinais e $\Delta lat_{i,j}$ nas posições laterais para os equivalentes observados em cada um dos m passos i de duração das manobras. As diferenças foram sempre calculadas como (*posição do veículo simulado*) – (*posição do veículo observado*). As séries temporais foram formadas como:

$$longitudinal = \{ \Delta long_{1,1}, \dots, \Delta long_{1,n}, \dots, \Delta long_{i,j}, \dots, \Delta long_{m,1}, \dots, \Delta long_{m,n} \} \quad (1)$$

e

$$lateral = \{ \Delta lat_{1,1}, \dots, \Delta lat_{1,n}, \dots, \Delta lat_{i,j}, \dots, \Delta lat_{m,1}, \dots, \Delta lat_{m,n} \} \quad (2)$$

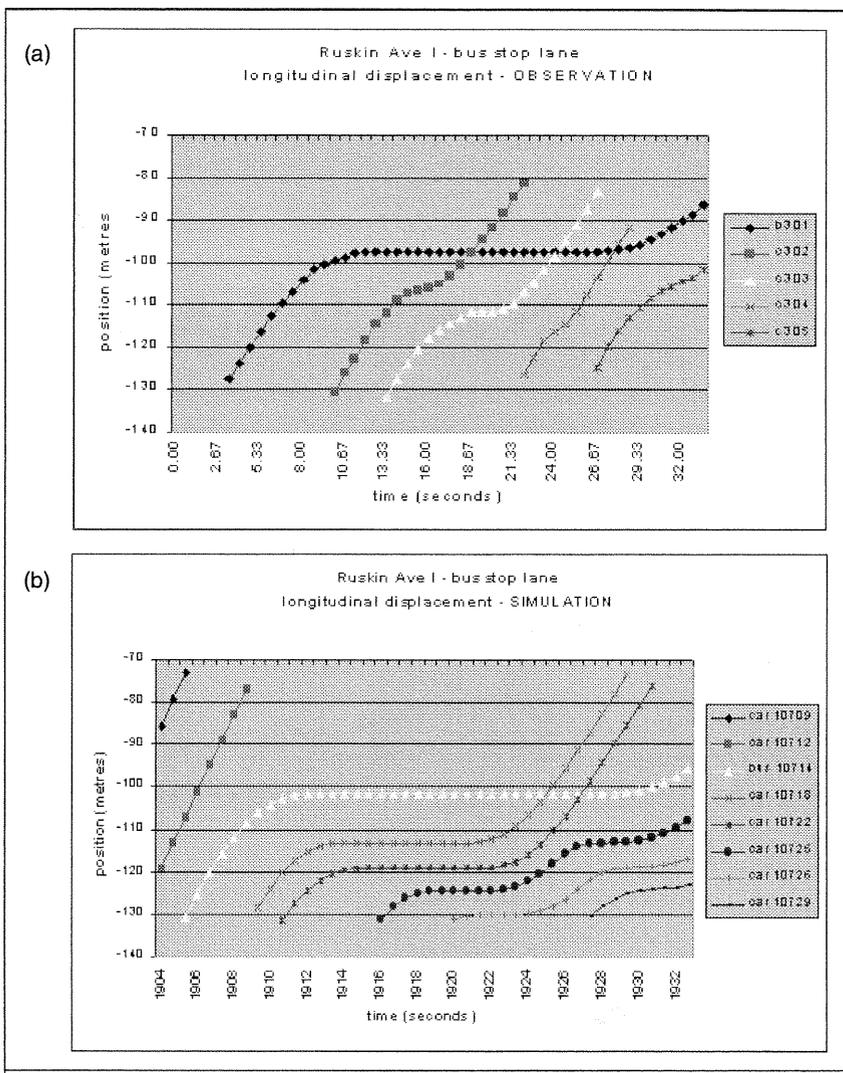


Figura 1: Exemplo de diagramas espaço-tempo usados para comparação entre manobras observadas (a) e simuladas (b) em faixa com um ônibus parado

De acordo com o procedimento recomendado por Box *et al.* (1994) para construção de modelos ARIMA, foram produzidos os gráficos das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF)

para ajudar a identificação dos valores iniciais dos parâmetros p , q e d (ordem da autorregressividade AR, ordem da média móvel MA e ordem de diferenciação, respectivamente) do modelo. O resultado desta etapa foi a seleção dos valores $p=1$, $q=1$ e $d=2$, isto é, do modelo ARIMA(1,2,1) como melhor candidato para descrever ambas as séries para todos os veículos envolvidos nas manobras típicas estudadas. Os passos restantes do procedimento de construção do modelo ARIMA confirmaram estes valores.

Ainda segundo Box *et al.*, o passo seguinte à identificação dos valores para p , q e d corresponde a estimar os valores dos p coeficientes AR, dos q coeficientes MA e da constante de integração. A análise de erro prosseguiu com a divisão das séries em duas porções, o intervalo de tempo da segunda correspondendo a 20% do da primeira. A primeira porção foi usada para a construção do modelo descritivo de cada série. A segunda porção foi usada para efeito de prognóstico. A figura 2 mostra exemplos de gráficos resultantes deste processo. À esquerda da linha vertical aparece a plotagem da série original (linha cheia), da estimativa feita pelo modelo ARIMA(1,2,1) (linha pontilhada) e dos limites do intervalo de confiança desta estimativa (linhas tracejada e 'traço-ponto'). À direita da linha vertical aparecem as mesma curvas, não mais como ajuste em torno dos valores reais fornecidos mas sim como previsão gerada pelo modelo ARIMA(1,2,1).

Além dos gráficos, o processamento da análise de modelos ARIMA produz uma série de índices que são usados no que Box *et al.* chamam de etapa de diagnóstico. Esta etapa verifica quão ajustados são os valores calculados para coeficientes AR e MA na etapa anterior.

Os dois estágios do exercício de validação aprovaram o modelo BusSIGSIM. De um lado, a comparação visual dos diagramas espaço-tempo mostrou que os veículos na simulação reagem do mesmo modo que os veículos observados em campo quando submetidos às mesmas circunstâncias. De outro, o estágio de validação quantitativa (análise de erro usando modelos ARIMA) mostrou a capacidade que o modelo BusSIGSIM tem de reproduzir com fidelidade satisfatória

as trajetórias seguidas por veículos interagindo nas imediações de paradas de ônibus.

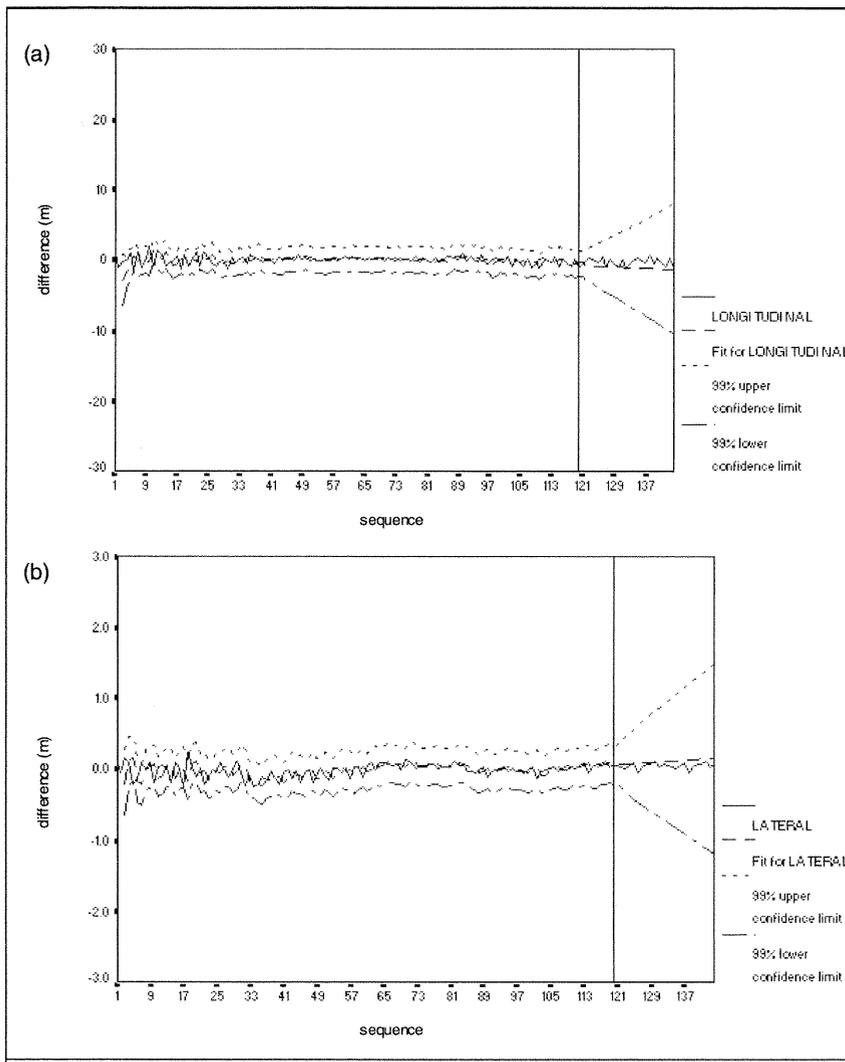


Figura 2: Exemplo de plotagem das séries *longitudinal* e *lateral* com as respectivas estimativas pelo modelo ARIMA(1,2,1) e intervalos de confiança

Os índices calculados na terceira etapa (diagnóstico) da construção dos modelos ARIMA, entretanto, apresentam aspectos que merecem comentários adicionais porque:

- Os valores variam muito de caso para caso estudado. Não é possível definir um padrão que se repete entre os diversos veículos e circunstâncias analisados.
- São muito altos em alguns casos. A teoria diz que quanto mais baixos os índices AIC (*Akaike information criterion*, melhor para modelos autorregressivos) e SBC (*Schwartz Bayesian criterion*, um critério mais geral) mais ajustado é modelo. Os casos em que estes índices são mais altos significam que o modelo descreve a série com muita folga.

É relevante que os casos em que se observam tais ocorrências mais intensamente correspondem a séries temporais com algum tipo de perturbação, ou seja com não-estacionaridades que resistiram à segunda ordem de diferenciação. À primeira vista, a razão para estas perturbações poderia ser que o método não se adequa ao tipo de estudo em que foi empregado. Entretanto, como a representações de manobras similares correspondem índices diferentes, tal explicação torna-se improvável. Assim, conforme detalhadamente discutido em (Silva, 2001), são duas as mais prováveis causas destes destas perturbações:

- Erros de julgamento no processo de leitura das fitas VHS e registro das posições dos veículos. De fato, o processo de captação dos dados a partir das gravações foi artesanal e impreciso. Mas, como todas as fitas foram analisadas pela mesma pessoa, a tendência aqui seria que todos os erros fossem no mesmo sentido, neutralizando seus efeitos.
- Todas as diferenças em cada série foram calculadas em relação a apenas um veículo observado. Isto significa que nenhum eventual comportamento peculiar de qualquer motorista foi atenuado.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este artigo explora a questão da validação microscópica quantitativa de modelos microscópicos de simulação de tráfego. Após argumentar que testes estatísticos convencionais não se aplicam à maioria dos modelos por causa da natureza dos fenômenos simulados, o artigo apresenta um procedimento baseado na análise de erro, usando modelos ARIMA para séries temporais formadas pelas diferenças entre valores obtidos da simulação e de levantamentos de campo. O mais relevante avanço que este procedimento traz em relação aos métodos tradicionais é a possibilidade de tratar apropriadamente as características de autocorrelação e não-estacionaridade que marcam a maioria dos fenômenos de tráfego.

O procedimento foi usado como parte da validação do módulo do modelo BusSIGSIM (desenvolvido para estudar a interação entre ônibus e outros veículos) que simula as manobras veiculares nas imediações de paradas de ônibus. O modelo BusSIGSIM foi considerado válido segundo conjunto da metodologia empregada (comparação visual de diagramas espaço-tempo e análise das diferenças nas trajetórias dos veículos).

A aplicação prática do método de análise de erro, entretanto, revela aspectos que devem ser considerados em seus futuros usos. O mais importante destes aspectos diz respeito ao tamanho da amostra. Para cada um dos veículos típicos cujas trajetórias foram analisadas, apenas um elemento das observações de campo foi usado para gerar diferenças de posição que formaram a respectiva série temporal. Com isso, eventuais comportamentos atípicos adotados por esses motoristas podem ter gerado nas séries perturbações suficientemente fortes para dificultar sua descrição por um modelo ARIMA.

De todo modo, a explicitação das relações de autocorrelação nas variáveis microscópicas do tráfego constitui considerável contribuição para o estado da prática da validação de modelos de simulação de tráfego.

AGRADECIMENTOS

A pesquisa que gerou este trabalho foi realizada no *Centre for Transport Studies, University College London* com o apoio da Universidade de Brasília. Os autores agradecem às instituições e a todos os colegas que contribuíram para que os resultados pudessem ser alcançados. A pesquisa foi financiada pela Fundação CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aycin, M.F. e R.F. Benekohal (1998) Linear acceleration car-following model development and validation. *Transportation Research Record*, 1644, 10-19.
- Aycin, M.F. e R.F. Benekohal (1999) Comparison of car-following models for simulation. *Transportation Research Record*, 1678, 116-127.
- Benekohal, R.F. (1991) Procedure for validation of microscopic traffic flow simulation models. *Transportation Research Record*, 1320, 190-202.
- Benekohal, R.F. e J. Treiterer (1988) CARSIM: car-following model for simulation of traffic in normal and stop-and-go conditions. *Transportation Research Record*, 1194, 99-111.
- Box, G.E.P.; G.M. Jenkins e G.C. Reinsel (1994) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 3a. ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, EUA.
- Crosta, D.A. (1999) Parallel SIGSIM: version 3.0 user guide. Working paper. University of London Centre for Transport Studies, Londres, Reino Unido.
- Gipps, P.G. (1981) A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research - Part B*, 15(2), 105-111.
- Gipps, P.G. (1986) A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research - Part B*, 20(5), 403-414.
- Herman, R. (1961) *Theory of Traffic Flow*. Elsevier Pub. Co., Amsterdam, Holanda.
- Hossain, M. e M. McDonald (1998) Modelling the impacts of reducing non-motorised traffic in urban corridors of developing cities. *Transportation Research - Part A*, 32(4), 247-260.

- Hsu, D.A. e J.S. Hunter (1977) Analysis of simulation-generated responses using autoregressive models. *Management Science*, 24(2), 181-190.
- Law, A.M. e W.D. Kelton (2000) *Simulation Modeling and Analysis*. 3rd ed. McGraw-Hill, Boston, EUA.
- Payne, H.J. (1979) FREFLO: a macroscopic simulation model of freeway traffic. *Transportation Research Record*, 722, 68-76.
- Pidd, M. (1998) *Computer Simulation in Management Science*. 4th ed. John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido.
- Popper, K.R. (1959) *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson, Londres, Reino Unido.
- Rao, L. e L. Owen (2000) Validation of high-fidelity traffic simulation models. Artigo apresentado no TRB Annual Meeting, Washington D.C., EUA, January 2000.
- Robertson, D.I. (1969) TRANSYT - a Traffic Network Study Tool. Laboratory Report. 253. TRRL - Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Reino Unido.
- Sargent, R.G. (1982) Verification and validation of simulation models. In: *Progress in Modelling and Simulation*, (Ed. F. E. Cellier), Academic Press, Londres, UK.
- Silcock, J.P. (1993) SIGSIM version 1.0 users guide. Working paper. University of London Centre for Transport Studies, Londres, UK.
- Silva, P.C.M. (2001) *Modelling Interactions between bus operations and traffic flow*. Tese de PhD. University of London, Londres, UK.
- Wattleworth, J.A. (1976) Traffic flow theory. In: *Transportation and Traffic Engineering Handbook*, (Ed. J. E. Baerwald), 258-308. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, EUA.

Endereço dos autores:

Paulo C. M. Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília
70910-900 - Brasília - DF
E-mail: pcmsilva@unb.br

Nick Tyler
Centre for Transport Studies
University College London
E-mail: n.tyler@ucl.ac.uk