

CONSTRUÇÃO DA MATRIZ ORIGEM DESTINO DE TRANSPORTE INTER-REGIONAL DE CARGAS E PASSAGEIROS PARA O PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA INTEGRADA

Relatório de Pesquisa

Estado da Arte em Métodos de Construção de Matrizes Origem-destino para o Transporte de Cargas Inter-regional (Relatório 9)



CONSTRUÇÃO DA MATRIZ ORIGEM-DESTINO DE TRANSPORTE INTER-REGIONAL DE CARGAS E PASSAGEIROS PARA O PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA INTEGRADA

Relatório de Pesquisa

**Estado da Arte em Métodos de Construção de Matrizes Origem-Destino
para o Transporte de Cargas Inter-regional (Relatório 9)**

ipea

Governo Federal

Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão

Ministro interino Dyogo Henrique de Oliveira

ipea Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

Fundação pública vinculada ao Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiro – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

Presidente

Ernesto Lozardo

Diretor de Desenvolvimento Institucional, Substituto

Carlos Roberto Paiva da Silva

Diretor de Estudos e Políticas do Estado, das Instituições e da Democracia

Alexandre de Ávila Gomide

Diretor de Estudos e Políticas Macroeconômicas

José Ronaldo de Castro Souza Júnior

Diretor de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais

Alexandre Xavier Ywata de Carvalho

Diretor de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação e Infraestrutura

João Alberto De Negri

Diretora de Estudos e Políticas Sociais

Lenita Maria Turchi

Diretor de Estudos e Relações Econômicas e Políticas Internacionais

Sérgio Augusto de Abreu e Lima Florêncio Sobrinho

Assessora-chefe de Imprensa e Comunicação

Regina Alvarez

Ouvidoria: <http://www.ipea.gov.br/ouvidoria>

URL: <http://www.ipea.gov.br>

CONSTRUÇÃO DA MATRIZ ORIGEM-DESTINO DE TRANSPORTE INTER-REGIONAL DE CARGAS E PASSAGEIROS PARA O PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA INTEGRADA

Relatório de Pesquisa

Estado da Arte em Métodos de Construção de Matrizes Origem-Destino para o Transporte de Cargas Inter-regional (Relatório 9)

ipea

Brasília, 2017

EQUIPE TÉCNICA

Coordenação-geral

Fabiano Mezadre Pompermayer – Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação, Regulação e Infraestrutura (Diset) do Ipea

Equipe de pesquisa

Fabiano Mezadre Pompermayer – Diset/Ipea

Erivelton Pires Guedes – Assessoria Técnica da Presidência (Astep) do Ipea

Akina Sakamori – Bolsista do Programa de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional (PNPD) da Diset/Ipea

Alan Ricardo da Silva – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Carolina Andrade Silva – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Daniel Alisson Feitosa Lopes – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Diego Rosa Mambrin – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Gabriel Gouveia Rabello – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

João Gabriel de Moraes Souza – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Maircon Batista Ribeiro – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Paulo Henrique Dourado da Silva – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Pedro Veiga de Camargo – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Priscila Nascimento de Alcântara Garcia – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Rafaella Bandeira Cabral Cunha – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Ramon de Almeida Bispo – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Raquel Araujo de Almeida – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Rennaly Patricio Sousa – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Roberto Lazarte Kaqui – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Thiago Guimarães Rodrigues – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Equipe de elaboração do relatório

Pedro Veiga de Camargo – Bolsista do PNPD da Diset/Ipea

Fabiano Mezadre Pompermayer – Diset/Ipea

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	7
1 INTRODUÇÃO	9
2 ESTRUTURAS DE MODELOS	9
3 MODELOS DE GERAÇÕES.....	11
4 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO.....	13
5 MODELOS DE ESCOLHA/DIVISÃO MODAL	14
6 MODELOS DE TRANSBORDO E ESCOLHA PORTUÁRIA.....	15
7 MODELOS DE ALOCAÇÃO	17
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	18
REFERÊNCIAS	19

APRESENTAÇÃO

Este relatório faz parte de uma série de relatórios de pesquisa do Ipea, cujo objetivo é documentar o processo de construção das matrizes origem-destino (O/D) de transporte inter-regional de cargas e passageiros que subsidiaram a elaboração do Plano Nacional de Logística Integrada (PNLI), fruto da parceria entre a Empresa de Planejamento e Logística (EPL), empresa pública do governo federal, e o Ipea, formalizada pelo Termo de Cooperação para Descentralização de Crédito nº 2, de 29 de maio de 2013.

A EPL foi criada em 2012 para apoiar o planejamento da infraestrutura de transportes do país. Uma de suas tarefas é elaborar o Plano Nacional de Logística Integrada. Em certa medida, ela cumpre missão semelhante à do Grupo de Estudos para Integração da Política de Transportes (Geipot) nas décadas de 1970 e 1980. A empresa vem se capacitando para a modelagem da oferta de infraestrutura de transportes, mas para a modelagem da demanda por transportes, que envolve mais conhecimento sobre as atividades econômicas no país e sua distribuição regional do que sobre transportes, havia a necessidade de execução externa. Algumas consultorias foram abordadas, mas surgiu a possibilidade de o estudo ser realizado pelo Ipea, que prontamente atendeu.

Nesse processo, um dos passos iniciais é o levantamento do padrão de viagens inter-regionais de cargas e passageiros, identificando os potenciais de geração e atração de viagens de cada localidade, bem como sua distribuição entre elas. Os modos de transporte usados também são levantados. Assim obtém-se a matriz OD das viagens de carga e passageiro para um ano-base, em cada modo. A partir daí, são projetados os crescimentos de demanda por transporte para os anos futuros, isto é, as matrizes OD futuras, que são confrontadas com a oferta de infraestrutura a fim de identificar seus gargalos e projetar a necessidade de melhorias, como construção ou ampliação de rodovias, ferrovias, hidrovias e portos. A construção da matriz OD é essencial para o planejamento da infraestrutura de transportes do país, uma vez que permite a construção de cenários e a otimização dos investimentos.

A elaboração de uma matriz OD envolve o levantamento e o cruzamento de uma série de dados socioeconômicos, que são ajustados e calibrados com pesquisas de campo, em que viajantes são entrevistados em locais predeterminados para identificar diversos atributos de sua viagem, como origem, destino, motivo, tipo e valor da carga, modo(s) de transporte utilizado(s) etc. Esse trabalho envolve conhecimento técnico específico em modelagem de transportes e também em economia e estatística.

Com uma matriz OD consolidada e abrangente, a EPL poderá realizar suas avaliações de necessidade de expansão da oferta de infraestrutura de transporte. O Ipea, além de apoiar a EPL nestas avaliações, se beneficia das informações da matriz OD ao cruzá-las com outras fontes de dados socioeconômicos, podendo realizar estudos diversos sobre desenvolvimento regional, matrizes insumo-produto e fomento produtivo, por exemplo. Adicionalmente, a disponibilização dessa base de dados à sociedade permite o desenvolvimento do próprio setor de transporte e logística.

Oito relatórios descrevem as metodologias usadas em todo o processo de construção da base de dados e suas projeções. O último desses relatórios reúne os procedimentos intermediários para a construção das matrizes e apresenta alguns dos resultados agregados. Há, ainda, três relatórios que avaliaram o estado da arte de modelos de construção da matriz OD, com proposições para as novas versões do PNLI. A seguir, a lista com os títulos de cada relatório.

- 1) *Desenho da Pesquisa Origem-Destino do Transporte Rodoviário no Brasil.*
- 2) *Construção da Matriz Origem-Destino Observada para Transporte de Cargas Inter-regional.*
- 3) *Modelos de Regressão para Geração e Atração de Viagens do Transporte de Cargas Inter-regional.*
- 4) *Modelos de Distribuição para Matriz Origem-Destino de Transporte de Cargas Inter-regional: desenvolvimento de um conjunto de ferramentas e calibração inicial.*
- 5) *Cenários de Projeção das Atividades Econômicas por Unidade da Federação para a Projeção da Matriz Origem-Destino de Transporte de Cargas Inter-regional.*
- 6) *Construção da Matriz Origem-Destino Observada de Transporte de Passageiros Inter-regional.*
- 7) *Modelos de Regressão para Geração e Atração de Viagens de Passageiros.*
- 8) *Projeções das Matrizes Origem-Destino de Carga e Passageiros: aplicando os modelos de geração e distribuição de viagens com as projeções socioeconômicas.*
- 9) *Estado da Arte em Métodos de Construção de Matrizes Origem-Destino para o Transporte de Cargas Inter-regional.*
- 10) *Estado da Arte de Métodos de Estimação de Matrizes Origem-Destino para Passageiros à Longa Distância.*
- 11) *Métodos de Estimação da Matriz Origem-Destino para o Transporte Aéreo de Passageiros.*

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta uma revisão bibliográfica de métodos aplicados a projeção de matrizes O/D de transporte de carga nacionais. De acordo com Boyce (2002), o modelo de quatro etapas teve origem no final da década de 1950, nos Estados Unidos, com o desenvolvimento do Estudo dos Transportes na Área de Chicago (CATS – em inglês, Chicago Area Transportation Study), que dividiu o processo de planejamento de transportes em: *i)* modelagem de *geração* de viagens; *ii)* modelagem da *distribuição* de viagens; *iii)* métodos de *escolha modal*; e *iv)* *alocação* das viagens à rede de transporte. Desde então, tornou-se o processo padrão para planejamento de transportes, mas – como bem discutido pelo referido autor – as consequências desse padrão único podem ter sido muitas vezes negativas.

Com base nas conclusões feitas por Boyce (2002), esta revisão bibliográfica de métodos aplicados a projeção de matrizes de carga nacionais será focada não apenas nos parâmetros e resultados obtidos por estudos semelhantes realizados em outras partes do mundo, mas também em metodologias alternativas que tenham sido aplicadas com algum grau de sucesso em estudos semelhantes.

Como consequência dessa metodologia, a revisão bibliográfica será dividida em oito seções, incluindo-se esta introdução. A segunda seção é dedicada às diversas estruturas de modelos presentes na literatura para o caso do transporte de carga, enquanto as demais seções abordam cada um dos elementos presentes no conjunto de estruturas de modelos apresentados na segunda seção, as quais são muito mais numerosas que as tradicionais quatro etapas, como é apresentado a seguir. Conclui-se o relatório com as considerações finais.

Apesar de se discutir o problema de disponibilidade de dados nas seções seguintes, é importante que fique claro que foi justamente a pouca disponibilidade de dados que, muitas vezes, guiou o desenvolvimento de modelos de planejamento de carga. A ausência de esforços recorrentes de captação de dados de empresas e operadores logísticos, como são o censo e as pesquisas domiciliares de O/D – base para o planejamento de transporte das famílias –, é agravada pela existência de segredos comerciais e lógicas de comportamento muito mais complexas que aquelas que se verificam em domicílios.

2 ESTRUTURAS DE MODELOS

Diversas estruturas de modelos foram sugeridas na literatura desde o desenvolvimento do CATS, mas este texto se concentrará nas mais recentes e bem-sucedidas estruturas aplicadas no desenvolvimento de modelos de planejamento de carga, além de experiências pouco convencionais que apresentaram resultados positivos.

Moavenzadeh *et al.* (1983) propuseram uma estrutura de modelo para o caso egípcio que vai além dos elementos tradicionais de planejamento, incluindo-se também restrições de frota, capacidade de terminais de transbordo, capacidade de portos, entre outros elementos mais comumente encontrados em modelos de planejamento logístico de curto prazo, em vez de modelos de planejamento de transportes de longo prazo. O modelo proposto por esses atores, entretanto, exige quantidade de dados extremamente grande, sem contribuir diretamente para os objetivos comumente associados a planos nacionais de longo prazo.

Ashtakala e Murthy (1993), por sua vez, desenvolveram para a região de Alberta, no Canadá, um sistema de modelos diretamente derivados do tradicional modelo de quatro etapas. Esses modelos utilizam técnicas estatísticas tradicionais. Os dados relevantes nesse

estudo, no entanto, foram a utilização de informações coletadas no final da década de 1970 – em adição a dados mais recentes – e, mais importante, a conclusão, por parte dos autores, de que tais dados – mesmo que razoavelmente antigos à época do estudo – ainda eram adequados para a estimação e a calibração de modelos.

O sistema de modelos mais compatível com o caso brasileiro, entretanto, é aquele utilizado pela Administração Federal de Autoestradas (FHWA – em inglês, Federal Highway Administration (FHWA) americano para o desenvolvimento da sua matriz regional de carga, que é parte da Estrutura de Análise de Fretes (FAF – em inglês, Freight Analysis Framework). O desenvolvimento do FAF americano é baseado em uma ampla pesquisa de transporte de produtos, conhecida como Pesquisa de Fluxos de Mercadorias (CFS – em inglês, Commodity Flow Survey) (Usdot, 2014) e complementada com dados da matriz insumo-produto nacional norte-americana, com informações fornecidas pelas agências reguladoras de comércio exterior, com dados de sensoriamento remoto e censo econômico, entre outros, como apresentado em detalhes por Southworth *et al.* (2011).

Uma vez que a pesquisa americana (CFS) cobre as empresas que enviam/recebem produtos em vez de veículos específicos, todos os modos de transporte e suas combinações são pesquisados, e não existe, *a priori*, viés de seleção para a participação dos modos de transporte na matriz nacional de transporte.

A construção de matrizes para anos futuros, por sua vez, não é discutida em documentos públicos e requer a estimação de modelos que cobrem desde a geração de *commodities* até a alocação de tráfego, os quais são analisados neste relatório. Uma abordagem completamente diferente, no entanto, tem sido aplicada em países da comunidade europeia – incluindo-se Holanda, Suécia, Noruega e Alemanha, entre os quais a Holanda foi o primeiro a implementá-la, conforme descrito por Tavasszy *et al.* (1998).

Apesar de ter sido inicialmente publicado por Tavasszy *et al.* (1998), foi a publicação de de Jong e Ben-Akiva (2007) que consolidou o novo paradigma para modelagem de transporte de cargas, baseada no entendimento integrado da cadeia logística sob uma ótica não só das etapas de transporte, mas também de seus agentes (donos de carga, transportadoras, armazéns etc.). Sendo bastante recente, esse tipo de modelo tem sido até agora aplicado quase que exclusivamente nos países da Comunidade Europeia, para os quais se acham diversos exemplos, incluindo-se Holanda, Suécia, Noruega e Alemanha. O modelo holandês, descrito no trabalho seminal de Tavasszy *et al.* (1998), já na sua segunda geração – conforme descrito por Bovenkerk (2005) –, é um modelo com muito mais ênfase em logística e elementos de simulação discreta do que se via em planejamento regional até então.

O trabalho de Liedtke (2009) sobre o desenvolvimento de um modelo de planejamento regional de carga para a Alemanha assemelha-se ao estudo de Tavasszy *et al.* (1998), ao utilizar muitos elementos de logística e basear-se muito em simulação discreta de eventos com a enumeração de agentes da cadeia logística.

O trabalho de de Jong e Ben-Akiva (2007) sobre o modelo desenvolvido para a Suécia, no entanto, apresenta uma visão probabilística mais convencional para o planejamento regional, baseada em modelos de escolha discreta e menor detalhamento da cadeia logística como um todo, o que é mais adequado ao caso de países de dimensões continentais ou modelos envolvendo múltiplos países. Isso se vê na iniciativa do FHWA americano, com a implementação do Programa de Pesquisa de Autoestradas Estratégicas 2 (SHRP2 – em inglês, Strategic Highway Research Program 2), o qual tem financiado o desenvolvimento de modelos estaduais e regionais baseados largamente no modelo proposto pelos referidos autores.

3 MODELOS DE GERAÇÃO

De acordo com Ortúzar e Willumsen (2011), modelos de fator de crescimento para o total de viagens geradas em cada zona são utilizados desde a década de 1950, o que é consistente com a argumentação de Boyce (2002) sobre o início da modelagem de transportes naquela década, com o desenvolvimento dos modelos que compuseram o CATS em Chicago, Estados Unidos.

No que tange ao planejamento de transporte individual, os modelos de fator de crescimento, no entanto, foram substituídos quase completamente por modelos de regressão, análise de categorias e, com menos frequência, modelos de escolha discreta, que visam modelar a probabilidade de um indivíduo fazer uma viagem ou não. Dessas três classes de modelos, duas resultam exclusivamente na classe de modelos desagregados. Modelos de análise de categorias e de escolha discreta utilizam como variáveis explicativas características de cada indivíduo – ou família, ou entidade – para modelar a quantidade de viagens ou probabilidade de realização destas de cada um desses indivíduos.

Modelos de geração de transporte de carga, no entanto, evoluíram de maneira muito distinta até o início dos anos 2000, basicamente pela ausência de fontes de dados tão robustas quanto aquelas disponíveis para transporte urbano, principalmente o censo e as pesquisas domiciliares de origem-destino.

Uma vez que o acesso a dados desagregados (registros de empresas individuais com respectivas características) é escasso e que pesquisas específicas sobre transporte de carga são raramente feitas, a maior parte dos estudos realizados até agora – tanto na elaboração de estudos acadêmicos quanto no desenvolvimento de modelos por consultores especializados – utilizou modelos do tipo agregado, em que não apenas as variáveis explicativas, mas também as dependentes são consideradas em seu total zonal. Em outras palavras, modelam-se as viagens geradas em uma zona, e não por entidades individuais.

Alguns estudos, no entanto, tiveram acesso a dados que permitiram o desenvolvimento de modelos desagregados, como é o caso de Bastida e Holguín-Veras (2009), que compararam o desempenho de modelos agregados com aqueles gerados por modelos desagregados para a cidade de Nova Iorque. Nesse estudo, entretanto, os autores modelaram o número de caminhões originados de – e destinados a – cada estabelecimento, dados o número de empregados do estabelecimento separados em seis categorias e o setor da economia em que o estabelecimento estava classificado.

A elaboração desse modelo foi possível pela disponibilidade da CFS e porque o censo econômico americano provê o número de empresas por setor da economia e número de empregados para cada condado americano, visto que dados secundários obtidos de empresas de pesquisa privadas também permitem distribuir esses totais de empresas pelas diversas zonas de tráfego incluídas em cada condado. A conclusão a que os autores chegaram, entretanto, foi que as duas estruturas de modelo chegam a resultados bastante semelhantes, de onde se conclui que a enorme quantidade de dados e trabalho adicionais requerida para a elaboração de modelos de classificação cruzada para geração de viagens de caminhões não é justificada.

Quanto à utilização de modelos de escolha discreta, não há literatura que a registre, embora seja possível encontrar sua discussão na literatura de modelos baseados em microsimulação discutidos na seção 7 deste relatório.

Modelos baseados na técnica de regressão linear aparecem então como os mais frequentes, tanto na literatura acadêmica quanto na prática de modelagem. Apesar de muito

utilizados, a base teórica de modelos de regressão já não se mostra relevante o suficiente para justificar sua publicação em periódicos de prestígio. Dessa forma, trabalhos como o de Kulpa (2014) e Holguín-Veras *et al.* (2011) tornam-se importantes, exclusivamente ao discutirem o desenvolvimento de modelos de geração de viagens na ausência de dados convencionais – a exemplo de Kulpa (2014) –, ou discutir a instabilidade temporal de parâmetros como a carga média carregada por caminhões e o número médio de viagens recebidas por cada estabelecimento – como no trabalho de Holguín-Veras *et al.* (2011), que desenvolveram sua pesquisa para o caso da cidade de Nova Iorque.

3.1 Modelos com estruturas alternativas

Apesar de não se encontrar literatura recente e que seja relevante para o caso brasileiro sobre o uso de modelos baseados na técnica de regressão linear, uma série de trabalhos que lançam mão de técnicas semelhantes foi publicada na última década. Entre tais técnicas, as mais interessantes são, sem dúvida, o sistema de equações simultâneas e a regressão espacial.

O uso de regressões espaciais foi documentado com riqueza de detalhes por Novak *et al.* (2011), no que diz respeito à circunstância de geração de demanda por transporte de carga, para o caso dos Estados Unidos. A pesquisa bibliográfica realizada pelos autores corrobora aquela feita anteriormente, de que a regressão linear ainda é a técnica mais utilizada nos modelos de geração de carga – ao menos nos Estados Unidos –, e argumenta que a disponibilidade de dados geográficos detalhados permite a consideração de regressões espaciais sem qualquer dificuldade, o que também é verdade em grande parte para o caso brasileiro.

Uma vez que Novak *et al.* (2011) foram os primeiros a introduzir a técnica de regressão espacial ao caso de geração de carga para o caso norte-americano, foi possível a eles não explorar outras técnicas como as de agregação de produtos ou envolvendo análise de sazonalidade, tendo se limitado apenas a explorar a geração de carga anual para as dezenove classes de produtos do sistema de classificação americano North American Industry Classification System (Naics).

Entretanto, Novak *et al.* (2011) chegaram a conclusões importantes, como a de que a utilização de regressões espaciais pode melhorar a *performance* dos estimadores calculados para o caso da geração de carga, e, principalmente, a de que existe um grande viés geográfico relacionado a algumas variáveis; consequência do achado de que algumas variáveis passam a mostrar-se correlacionadas quando analisadas espacialmente.

Outro trabalho relevante que utilizou técnicas de regressão foi o de Holguín-Veras e Patil (2008), os quais incluíram a componente geográfica, ao construir um modelo de demanda direta – ou geração direta. O mérito desse trabalho, no entanto, está na consideração de processo iterativo de calibração de parâmetros, o qual tem como objetivo replicar os volumes de tráfego observados, e não apenas os vetores de produção e atração de carga.

Do ponto de vista estatístico, no entanto, não é possível estabelecer medidas de qualidade para os parâmetros calibrados, uma vez que não existe um processo de estimação propriamente dito. O processo iterativo proposto pelos autores, entretanto, assemelha-se aos processos tradicionais de calibração de matrizes com base em contagens de tráfego, o que é consistente com as práticas vigentes de planejamento de transporte de carga. Vale frisar, todavia, que essa técnica foi apenas testada em um ambiente urbano razoavelmente pequeno, e sua utilização em nível nacional não parece apropriada.

O trabalho mais rigoroso do ponto de vista teórico, no entanto, foi o apresentado por Ranaiefar *et al.* (2013), que propõe um sistema de equações simultâneas também para o caso norte-americano. Apesar de não ter utilizado conceitos explícitos de regressão espacial, os autores segmentaram a demanda a ser modelada, com base em um processo de formação de *clusters*, formulado a partir da separação geográfica entre áreas e características destas – como população e nível de emprego –, que incorporou algumas das recomendações feitas por Novak *et al.* (2011).

Uma vantagem considerável do trabalho de Ranaiefar *et al.* (2013), em relação aos de Novak *et al.* (2011) e Holguín-Veras e Patil (2008), foi a utilização de processos de estimação rigorosos e que permitem avaliação objetiva dos estimadores resultantes para os parâmetros estimados. Aliado a isso, Ranaiefar *et al.* (2013) ainda apresentaram os coeficientes de determinação (R^2) mais altos entre todos os modelos computados previamente para a base de dados utilizada.

A maior contribuição de Ranaiefar *et al.* (2013), no entanto, foi a inclusão de variáveis explicativas de maior qualidade, como a capacidade de refinarias de petróleo e o número de empregados para setores bastante detalhados da economia, o que é geralmente evitado pela dificuldade de seu cálculo. Tais dados também estão disponíveis para o Brasil com razoável detalhamento, ao menos se considerando a economia formal.

4 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO

Modelos de distribuição para o planejamento de carga aparecem de forma extremamente esparsa na literatura científica. Se considerarmos os modelos de distribuição de viagens disponíveis na literatura, independentemente do tipo de modelo (passageiro ou carga), encontram-se basicamente cinco grupos de modelos: modelos de fator de crescimento – nos quais se incluem Fratar e Furness –, de maximização de entropia – ou gravitacionais –, modelos de oportunidades intervenientes, modelos de escolha de destino e os novos modelos baseados em cadeias logísticas. Desses, apenas os modelos de oportunidades intervenientes não são encontrados na literatura de transporte de cargas.

Dos quatro tipos de modelos restantes, os mais recentes e com base teórica mais robusta são os baseados em cadeias logísticas, mas tais modelos têm tido aplicações bastante restritas em atividades de planejamento de transporte regional de carga. Alguns exemplos dessas aplicações são os descritos por de Jong e Ben-Akiva (2007), Liedtke (2009) e Holmgren *et al.* (2012).

Apesar de detalhados, esses artigos tratam de arquitetura de modelos que não se aplica ao caso brasileiro; em específico, ao desenvolvimento da matriz nacional de carga, uma vez que tais modelos foram calibrados com a tentativa de reproduzir a interação entre firmas, as quais precisariam ser enumeradas e seu comportamento, estudado com a utilização de pesquisas específicas.

A despeito de serem secundários em termos de número de publicações e, especialmente, aplicações em modelos operacionais, outros métodos também foram estudados. Exemplos desses estudos exploratórios podem ser encontrados nos trabalhos de Shir-mohammadli (2011) – que explorou a utilização de redes neurais e as comparou com um modelo híbrido *logit*-Fratar –, de Fernandez, de Cea e Soto (2002) – que desenvolveram um modelo de equilíbrio espacial – e de Sivakumar e Bhat (2002) – que exploraram a utilização de modelos derivados dos tradicionais modelos de escolha direta.

Uma vez que a construção de uma matriz O/D para o ano-base de estudo será atingida com a expansão da pesquisa origem-destino realizada com caminhões e dados das agências reguladoras do transporte ferroviário e hidroviário, bem como da Secretaria de Comércio Exterior (Secex) do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), pode-se trabalhar com a hipótese que a atual matriz OD de carga do Brasil foi observada, podendo portanto ser utilizada como base para a estimação do modelo de distribuição. Como consequência direta, passa a ser viável a utilização de modelos de fatores de crescimento e gravitacionais, além daqueles baseados em *fractional split*, como sugerido por Sivakumar e Bhat (2002).

Conforme sugerido por Ortúzar e Willumsen (2011), modelos baseados em fatores de crescimento não devem ser considerados para projeções envolvendo horizontes muito distantes do ano-base, assim como para cenários em que políticas públicas que visam – ou que têm grande potencial de – alterar a distribuição de viagens/carga estejam sendo avaliadas. Modelos de maximização de entropia, apesar de usados extensivamente no planejamento de transporte de passageiros e cargas, não tiveram sua aplicabilidade explicitamente validada para o caso dos modelos de transporte de carga, possivelmente pela inexistência de dados para tal. Apesar disso, a utilização desse modelo é amplamente aceita entre os profissionais de planejamento de transporte e permanece como opção válida para a elaboração de qualquer modelo de quatro etapas que esteja sendo desenvolvido.

Modelos gravitacionais são utilizados em planejamento de transporte desde a década de 1950, o que se verifica com a publicação do trabalho de Casey (1955), mas conforme apontado por Ortúzar e Willumsen (2011). Apenas com os trabalhos de Wilson (1970; 1974) é que se teve a derivação de tais modelos a partir de base teórica mais robusta, o princípio de maximização de entropia.

5 MODELOS DE ESCOLHA/DIVISÃO MODAL

Modelos de escolha modal aplicados ao transporte de carga também são pouco representados na literatura científica, embora existam mais publicações explorando essa classe de modelos do que aqueles aplicados à distribuição de viagens.

São duas as fontes para a pouca disponibilidade desses estudos. A primeira – implicitamente apresentada por Beagan, Fischer e Kuppam (2007) – é a frequente elaboração de modelos para planejamento exclusivamente rodoviário, o que exclui a componente de escolha modal do sistema de modelos.

A segunda causa para a pequena disponibilidade de modelos de escolha modal é a disponibilidade extremamente limitada de dados que permitam a modelagem do comportamento de empresas, no que tange à escolha de modos. Essa falta de dados advém tanto da necessidade das empresas de proteger seus segredos comerciais, quanto da existência de operadores logísticos, que acabam por deter todo o conhecimento sobre a estrutura de modos de transporte utilizados.

Apesar disso, encontra-se literatura, desde o final da década de 1970 e o início dos anos 1980, que discute a utilização de modelos comportamentais para a modelagem de escolha modal em planejamento de carga, dos quais o exemplo mais relevante é o de Gray (1982).

No início da década de 2000, no entanto, uma nova série de procedimentos baseados em modelos de escolha discreta voltou a ser proposta. O primeiro exemplo relevante é o de Sivakumar e Bhat (2002), que propuseram um modelo agregado baseado para o problema

de distribuição de viagens, mas que já foi adaptado em diversos modelos de planejamento regional nos Estados Unidos, incluindo-se o do estado da Califórnia.

Mais recentemente, Samimi, Kawamura e Mohammadian (2011) estimaram modelos do tipo *logit* binários, com o objetivo de analisar as variáveis envolvidas na decisão de escolha entre rodovia e ferrovia para o caso americano, com destaque para a análise de diferentes cenários para o preço de combustíveis. Apesar de aplicarem rigorosos testes estatísticos para a verificação de viés na amostra obtida pela pesquisa que deu origem ao estudo, os referidos autores não apresentam apropriadamente os resultados do processo de estimação dos modelos estimados, o que compromete em parte a análise destes. Por seu turno, eles apresentam análises detalhadas de elasticidade das escolhas modais, com relação a variáveis como o custo de cada modo, a distância viajada, o peso do carregamento etc. Apesar de os resultados específicos não se aplicarem ao Brasil, a metodologia utilizada em seu desenvolvimento pode ser referência valiosa no desenvolvimento de estudo específico para a avaliação de políticas públicas, com o objetivo de atacar especificamente a questão da repartição modal.

Em uma linha distinta de pesquisa, modelos baseados em cadeias logísticas, no entanto, deram novo impulso ao desenvolvimento de modelos de escolha modal. Um dos primeiros exemplos de modelo de escolha modal desenvolvido em um modelo de cadeia logística foi o de Rich, Holmblad e Hansen (2009), que propuseram um modelo de escolha discreta do tipo *logit*, para analisar a movimentação de carga na região de Öresund, na Dinamarca.

A importância desse estudo, entretanto, vem do fato de que Rich, Holmblad e Hansen (2009) puderam estimar modelos de escolha independentes para diferentes produtos, o que lhes permitiu traçar conclusões específicas para cada produto e o impacto que o tempo, a confiabilidade e o custo de cada modo de transporte têm para cada um desses produtos.

Adicionalmente, Rich, Holmblad e Hansen (2009) foram capazes de calcular o valor da elasticidade-preço para diferentes produtos e combinações de modo de transporte, além do valor do tempo para diferentes produtos. Os autores ponderam que os dados de entrada apresentam pouca variação no que tange aos agentes de transporte, o que pode comprometer a qualidade dos resultados, e que as elasticidades-preço calculadas são menores do que em outros estudos encontrados na literatura. Tais questões exclusivamente técnicas, entretanto, não diminuem o potencial que estudos desse tipo apresentam para a avaliação de benefícios de projetos em termos de economia de tempo e a forma como esse benefício é dividido por indústria e tipo de operador de transporte.

Outros estudos baseados em modelos de cadeias logísticas também olharam em detalhes a questão da divisão modal no transporte regional de carga, caso de Baidur e Viegas (2011). Diferentemente de Rich, Holmblad e Hansen (2009), Baidur e Viegas (2011) desenvolveram um modelo desagregado baseado em microssimulação, no qual identificaram os diferentes agentes (transportadoras, donos de carga etc.) e seus padrões de comportamento. A estrutura do modelo baseado em microssimulação, no entanto, dificulta sua utilização no modelo em desenvolvimento para o caso brasileiro.

6 MODELOS DE TRANSBORDO E ESCOLHA PORTUÁRIA

Modelos de transbordo é um assunto menos presente na literatura, o que pode ser devido à inerente dificuldade de analisar a escolha de modo em separado da escolha do próprio ponto de transbordo.

Uma segunda hipótese é ainda a existência de número muito reduzido de pontos de transbordo na maioria das redes de transporte existentes, o que diminui o número de alternativas para o transbordo – nos raros casos em que existe mais de uma alternativa – e, conseqüentemente, a relevância dessa classe de modelos.

O exemplo mais recente desse tipo de aplicação é o trabalho de Chow, Ritchie e Jeong (2014), que propõe um modelo para ajustar parâmetros para funções de congestionamento de estações de transbordo, com base em dados históricos para o caso do transporte de carga no estado da Califórnia. Embora interessante do ponto de vista matemático, a base teórica do modelo desenvolvido é questionável e pode ser considerada *ad hoc*. No caso brasileiro, no entanto, não existe real competição entre estações de transbordo, o que torna improvável a necessidade da utilização de tais modelos.

Trabalho semelhante foi executado por Davydenko e Tavasszy (2013) para o caso de centros de distribuição na Holanda, o qual também conta com porção considerável de modelos *ad hoc*. Tanto no caso dos pontos de transbordo na Califórnia quanto no caso dos centros de distribuição holandeses; no entanto, existe um considerável número de instalações competindo nos mercados locais, o que resulta em competição real entre instalações e maior relevância do nível de serviço e impacto de congestionamento de cada uma dessas instalações.

A competição entre centros de instalações nas diversas regiões metropolitanas (RMs) brasileiras, entretanto, permitiria a utilização de modelos de transbordo – como o proposto por Davydenko e Tavasszy (2013) –, caso fossem desenvolvidos modelos baseados em agentes discretos, como discutido brevemente na seção 2.

Modelos de escolha portuária (aérea e marítima) também não são discutidos em abundância na literatura, sendo o exemplo mais recente o trabalho de Tongzon (2009), que modelou o problema de escolha portuária sob a visão do transitário,¹ utilizando apenas uma função logarítmica com formulação bastante específica ao caso do Sudeste Asiático, o que impede uma eventual transferência de parâmetros de modelos para o caso brasileiro.

A maior contribuição de Tongzon (2009), no entanto, foi a excelente argumentação defendendo a modelagem de escolha portuária em um sistema de modelos logísticos, com o preciso destaque para o fato de que portos marítimos não são completamente integrados ao restante da malha de transportes em países em desenvolvimento, o que pode justificar a utilização de modelos de escolha portuária em situações específicas.

Apesar de mais antigo, o modelo apresentado por Malchow e Kanafani (2004) talvez seja o mais relevante para o caso brasileiro, uma vez que foca no problema de escolha portuária do ponto de vista do exportador/importador. Assim, considera os custos globais associados à chegada ao porto e as despesas – diretas e indiretas – concernentes aos portos em si.

Diferente de Tongzon (2009), Malchow e Kanafani (2004) utilizaram um modelo de escolha discreta adaptado para o caso de *panel data*, o que permitiu a análise dos portos de forma agregada. Os resultados – apesar de específicos para o caso norte-americano – fornecem estimativas da importância relativa que cada variável modelada apresenta, como a distância terrestre para o porto, a distância oceânica entre os possíveis portos e o porto de destino, bem como a capacidade e a frequência de navios. Malchow e Kanafani (2004) verificaram, por exemplo, que a distância terrestre é sete vezes mais relevante que a distância oceânica, quando da escolha entre dois portos alternativos.

1. Pessoa ou entidade que presta serviços no transporte internacional de mercadorias. É um intermediário entre o exportador ou importador e as empresas de transporte e logística.

7 MODELOS DE ALOCAÇÃO

As discussões sobre modelos de alocação mais recentes na literatura incluem dois temas principais: integração de modelos de alocação dinâmica (DTA – em inglês, *dynamic traffic assignment*) a modelos de planejamento urbano baseados em atividades (ABM – em inglês, *activity based models*), e algoritmos avançados para alocação estática por equilíbrio.

No caso de planejamento regional em que o congestionamento urbano não é modelado em detalhe, a utilização do DTA não oferece quaisquer vantagens em relação às técnicas de alocação estáticas; por isso, não será detalhada neste texto.

No que tange à alocação estática por equilíbrio, os principais focos de pesquisa têm sido em algoritmos que forneçam soluções com grande grau de convergência, até mesmo em casos de redes muito congestionadas, além da paralelização de algoritmos de forma a utilizar todos os núcleos dos processadores atuais de forma eficiente.

Perederieieva *et al.* (2013) apresenta comparação bastante objetiva entre diferentes algoritmos, entre os quais estão alguns dos algoritmos mais modernos em existência, incluindo-se o algoritmo B – proposto por Dial (2006) –, o algoritmo TAPAS – apresentado por Bar-Gera (2010) –, uma releitura dos algoritmos proposto por Jayakrishnan *et al.* (1994) feita por Florian, Constantin e Florian (2009) e a versão biconjugada do tradicional algoritmo de Frank-Wolfe, formalizada por Mitradjieva e Lindberg (2013).

Conforme bem ressaltado por Ortúzar e Willumsen (2011), no entanto, alocação por equilíbrio é adequada para a modelagem de situações em que há congestionamento, o que provavelmente não é o caso de redes regionais rodoviárias, como a do Brasil, especialmente no caso em que não se modele implícita ou explicitamente o tráfego urbano. Para ferrovias, hidrovias e pontos de transbordo, espera-se congestionamento. Porém, a alocação pelo equilíbrio de Wardrop talvez não seja a mais adequada. Um modelo de alocação tudo ou nada com restrição explícita de capacidade deve funcionar, apesar de ser necessário definir exogenamente a capacidade alocada a cada produto. Para adotar o algoritmo de Frank-Wolfe, funções de custo (não lineares) devem ser calibradas, como feito em Chow, Richie e Jeong (2014).

7.1 Modelos de escolha de rotas

Para o caso de transporte regional, no entanto, técnicas de alocação baseadas em escolhas de rotas são mais apropriadas que aquelas de alocação estática. Algoritmos de escolha de rota, entretanto, não aparecem com frequência na literatura.

Essa classe de modelos tem origem no trabalho seminal de Dial (1971), cuja intenção era promover alguma distribuição do tráfego alocado às redes de simulação e não tinha qualquer fundamentação teórica do ponto de vista de teorias econômicas. É importante ressaltar, no entanto, que esse trabalho precede outra publicação relevante no campo de alocação de tráfego, que foi a de Leblanc, Morlok e Pierskalla (1975), que introduziu a utilização do algoritmo de Frank-Wolfe para a solução do problema de alocação por equilíbrio.

Apesar de ainda disponível em muitos dos pacotes comerciais de planejamento de transporte, o algoritmo desenvolvido por Dial – também conhecido por STOCH – é fundamentalmente ineficiente, pois enumera um conjunto de rotas inadequado – conforme demonstrado por Si *et al.* (2010) e Frejinger (2008) – e também² do ponto de vista da teoria da utilidade aleatória – conforme argumentado por Fisk (1977) e Camargo (2014).

2. A derivação do modelo de escolha do tipo *logit* presume que as alternativas para escolha sejam completamente independentes, o que não acontece com duas rotas distintas que compartilhem um ou mais *links* da rede. Para mais detalhes, ver Train (2009).

Durante as décadas de 1970 e 1980, não foram propostos modelos alternativos ao de Dial (1971) para o problema de escolha de rotas, e foi Cascetta *et al.* (1996) que introduziu o primeiro modelo de escolha de rotas explicitamente baseado no modelo de escolha discreta do tipo *logit* – mais detalhes podem ser encontrados em Train (2009).

O modelo proposto por Cascetta *et al.* (1996), chamado de *c-logit*, propõe a enumeração de um conjunto de rotas e a aplicação de um modelo do tipo *logit* multinomial, mas no qual se considera uma penalização para as rotas que apresentam sobreposição.

Outros modelos baseados em modelos de escolha discreta foram propostos entre 1996 e 2004, notadamente: o *path-sized logit*, criado por Ben-Akiva e Ramming (1998); o *paired combinatorial logit*, proposto por Koppelman e Wen (2000); o *cross nested logit*, criado por Prashker e Bekhor (1998); o *link nested logit*, proposto por Vovsha e Bekhor (1998); o *logit kernel*, criado por Ben-Akiva, Ramming e Bekhor (2004); e o *recursive multinomial logit application algorithm* (ReMuLAA), proposto por Camargo (2014).

Todos esses modelos caem em três categorias distintas. A primeira, da qual fazem parte o *path-sized logit* e o ReMuLAA, caracterizam-se por aplicar penalidades às rotas que apresentam sobreposição de forma a representar adequadamente o quão distintas das demais são as rotas enumeradas. O segundo grupo de modelos – que inclui apenas o *logit kernel* – caracteriza-se por não precisar tratar a superposição de rotas, ao utilizar o modelo do tipo Probit³ para a realização da escolha.

Os demais modelos caem na categoria de modelos que tentam derivar formulações que tratam da superposição de rotas de forma explícita, ao derivar tais modelos diretamente da teoria da utilidade aleatória. Apesar de engenhosos, tais modelos não consideram o fato de que modelos de escolha discreta não podem ser aplicados diretamente a redes de transporte, pois o número de rotas entre dois pontos é infinito,⁴ conforme apontado por Camargo (2014).

Entre os modelos que derivam alternativas teóricas diretamente da teoria da utilidade aleatória, aquele que apresenta derivação mais elegante é o apresentado por Vovsha e Bekhor (1998), mas até mesmo o exemplo apresentado pelos autores apresenta inconsistências básicas, conforme também apontado por Camargo (2014).

Do ponto de vista computacional, os únicos modelos que se apresentaram para utilização em modelos de tamanho real foram o próprio STOCH, o *c-logit* e o ReMuLAA, o que torna os únicos candidatos disponíveis na literatura para aplicações em modelos regionais.

Para mais detalhes em relação a modelos de escolha de rotas e comparações entre os diferentes modelos propostos, é possível se referir a Ben-Akiva, Ramming e Bekhor (2004), Frejinger (2008) e Camargo (2014).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme exposto nas seções anteriores, existem diversas técnicas de planejamento, as quais enfatizam diferentes partes do sistema de transporte de cargas através da utilização de modalidades distintas. Por esse motivo, é importante que se defina rapidamente qual paradigma de planejamento será utilizado, optando-se claramente por estrutura de modelos que possa dar suporte ao processo de planejamento e análise de políticas públicas.

3. Para mais detalhes, ver Train (2009).

4. O número de rotas entre dois nós de uma rede é infinito, contanto que haja ao menos um circuito fechado nessa rede.

Nesse sentido, os diversos grupos de modelos apresentados neste relatório permitem a construção da *estrutura principal* de um modelo regional de planejamento de carga, mas *não cobrem a totalidade dos modelos* que podem ser utilizados nesse tipo de estudo.

Projeção de variáveis relacionadas à disponibilidade de recursos para produção e à mudança de tecnologia de produção são dois campos que, apesar de não estarem no campo dos modelos comumente desenvolvidos para o planejamento de transportes, devem ser estimados quando necessários. Exemplos desses modelos são o de Gleason (1982) e Camargo (2014). No primeiro caso, o trabalho foi desenvolvido especificamente para a projeção de produção agrícola, enquanto o segundo caso refere exclusivamente a uma análise de sazonalidade que não é feita de forma consistente para nenhuma safra nos Estados Unidos, mas outros exemplos podem também ser citados.

REFERÊNCIAS

- ASHTAKALA, B.; MURTHY, A. S. N. Sequential models to determine intercity commodity transportation demand. **Transportation Research Part A: policy and practice**, v. 27, n. 5, p. 373-382, 1993.
- BAINDUR, D.; VIEGAS, J. M. An agent based model concept for assessing modal share in inter-regional freight transport markets. **Journal of Transport Geography**, v. 19, n. 6, p. 1093-1105, Nov. 2011.
- BAR-GERA, H. Traffic assignment by paired alternative segments. **Transportation Research Part B: methodological**, v. 44, n. 8-9, p. 1022-1046, Sept./Nov. 2010.
- BASTIDA, C.; HOLGUÍN-VERAS, J. **Freight generation models: comparative analysis of regression models and multiple classification analysis**. Washington: TRB, 2009. p. 51-61. (Transportation Research Record, n. 2097).
- BEAGAN, D.; FISCHER, M.; KUPPAM, A. **Quick Response Freight Manual II**. Washington: Federal Highway Administration, 2007. (Report n. FHWA-HOP-08-010, EDL n. 1439).
- BEN-AKIVA, M. E.; RAMMING, M.S. **Discrete choice models of traveler behavior in networks**. Course Advanced Methods for Planning and Managements of Transportation Networks. Capri, 1998.
- BEN-AKIVA, M. E.; RAMMING, M.S.; BEKHOR, S. **Human behaviour and traffic networks**. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- BOVENKERK, M. SMILE+: the new and improved Dutch national freight model system. *In: EUROPEAN TRANSPORT CONFERENCE*. Strasbourg: AET, 2005.
- BOYCE, D. Is the sequential travel forecasting paradigm counterproductive. **ASCE Journal of Urban Planning and Development**, v. 128, n. 4, p. 169-183, 2002.
- CAMARGO, P. V. **ReMuLAA: a new algorithm for the route choice problem**. 2014. Dissertation (Master's degree) – University of California, Irvine, 2014.
- CASCETTA, E. *et al.* **Modified logit route choice model overcoming path overlapping problems: specification and some calibration results for interurban networks**. Elsevier: Lyon, 1996.
- CASEY, H. J. Applications to traffic engineering of the law of retail gravitation. **Traffic Quarterly**, v. IX, n. 1, p. 23-35, 1955.
- CHOW, J.; RITCHIE, S.; JEONG, K. Nonlinear inverse optimization for parameter estimation of commodity-vehicle-decoupled freight assignment. **Transportation Research E**, v. 67, p. 71-91, July 2014.

- DAVYDENKO, I. Y.; TAVASSZY, L. A. Estimation of warehouse throughput in freight transport demand model for the Netherlands. Washington: TRB, 2013. p. 9-17. (Transportation Research Record, n. 2379).
- DE JONG, G.; BEN-AKIVA, M. A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 41, n. 9, p. 950-965, Nov. 2007.
- DIAL, R. B. A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. **Transportation Research**, v. 5, n. 2, p. 83-111, 1971.
- _____. A path-based user-equilibrium traffic assignment algorithm that obviates path storage and enumeration. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 40, n. 10, p. 917-936, Dec. 2006.
- FERNANDEZ, J.E.; DE CEA, J., SOTO, A. A multi-modal supply-demand equilibrium model for predicting intercity freight flows. **Transportation Research Part B**, v. 37, n. 7, p. 595-614, Aug. 2003.
- FISK, C. Note on the maximum likelihood calibration on dial's assignment method. **Transportation Research**, v. 11, n. 1, p. 67-68, Feb. 1977.
- FLORIAN, M.; CONSTANTIN, I.; FLORIAN, D. **A new look at projected gradient method for equilibrium assignment**. Washington: TRB, 2009. p. 10-16. (Transportation Research Record, n. 2090).
- FREJINGER, E. **Route choice analysis: data, models, algorithms and applications**. 2008. Dissertation (Master's degree) – Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, 2008.
- GLEASON, C. P. **Large area yield estimation/forecasting using plant process models**. Chicago: USDA, 1982.
- GRAY, R. Behavioural approaches to freight transport modal choice. **Transportation Reviews**, v. 2, n. 2, p. 161-184, 1982.
- HOLGUÍN-VERAS, J. *et al.* Freight generation, freight trip generation, and the perils of using constant trip rates. **Transportation Research Record**, n. 2224, p. 68-81, 2011.
- HOLGUÍN-VERAS, J.; PATIL, G. A multi-commodity integrated commodity based-empty trip freight origin-destination synthesis model. **Networks and Spatial Economics**, v. 8, n. 2-3, p. 309-326, 2008. Disponível em: <goo.gl/Tbu47I>.
- HOLMGREN, J. *et al.* TAPAS: A multi-agent-based model for simulation of transport chains. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 23, p. 1-18, 2012.
- JAYAKRISHNAN, R. *et al.* **A faster path-based algorithm for traffic assignment**. Washington: TRB, 1994. p. 75-83. (Transportation Research Record, n. 1443).
- KOPPELMAN, F. S.; WEN, C. The paired combinatorial logit model: properties, estimation and application. **Transportation Research Part B: methodological**, v. 34, n. 2, 75-89, Feb. 2000.
- KULPA, T. Freight truck trip generation modelling at regional level. **Procedia: social and behavioral sciences**, v. 111, p. 1-1276, Feb. 2014. Disponível em: <goo.gl/jm2nF2>.
- LEBLANC, L. J.; MORLOK, K.; PIERSKALLA, W. P. An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. **Transportation Research**, v. 9, n. 5, p. 309-318, 1975.
- LIEDTKE, G. Principles of micro-behavior commodity transport modeling. **Transportation Research Part E: logistics and transportation review**, v. 45, n. 5, p. 795-809, Sept. 2009.
- MALCHOW, M. B.; KANAFANI, A. A disaggregate analysis of port selection. **Transportation Research Part E: logistics and transportation review**, v. 40, n. 4, p. 317-337, July 2004.

- MITRADJIEVA, M.; LINDBERG, P. O. The stiff is moving: conjugate direction Frank-Wolfe methods with applications to traffic assignment. **Transportation Science**, v. 47, n. 2, p. 280-293, 2013.
- MOAVENZADEH, F. *et al.* A methodology for intercity transportation planning in Egypt. **Transportation Research A: General**, v. 17, n. 2, p. 481-491, 1983.
- NOVAK, D. C. *et al.* Nationwide freight generation models: a spatial regression approach. **Networks and Spatial Economics**, v. 11, n. 1, p. 23-41, 2011.
- ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling transport**. London: John Wiley & Sons, 2011.
- PEREDERIEIEVA, O. *et al.* **A computational study of traffic assignment algorithms**. Brisbane: Australasian Transport Research, 2013.
- PRASHKER, J. N.; BEKHOR, S. **Investigation of stochastic network loading procedures**. Washington: TRB, 1988. p. 94-102. (Transportation Research Record, n. 1645).
- RANAIEFAR, F. *et al.* Geographic scalability and supply chain elasticity of a structural commodity generation model using public data. *In: ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD*, 92., 2013, Washington. **Annals...** Washington: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2013.
- RICH, J.; HOLMBLAD, P. M.; HANSEN, C. O. A weighted logit freight mode-choice model. **Transportation Research Part E: logistics and transportation review**, v. 45, n. 6, p. 1006-1019, Nov. 2009.
- SAMIMI, A.; KAWAMURA, K.; MOHAMMADIAN, A. A behavioral analysis of freight mode choice decisions. **Transportation Planning and Technology**, v. 34, n. 8, p. 857-869, 2011.
- SHIR-MOHAMMADLI, M. *et al.* A comparative study of a hybrid logit-Fratar and neural network models for trip distribution: case of the city of Isfahan. **Journal of Advanced Transportation**, v. 45, n. 1, p. 80-93, 2011.
- SI, B. *et al.* An improved dial's algorithm for logit-based traffic assignment within a directed acyclic network. **Transportation Planning and Technology**, v. 33, v. 2, p. 123-137, 2010.
- SIVAKUMAR, A.; BHAT, C. Fractional split-distribution model for statewide commodity-flow analysis. Washington: TRB, 2002. p. 80-88. (Transportation Research Record, n. 1790).
- SOUTHWORTH, F. *et al.* **A description of the FAF 3 regional database and how it is constructed**. Oak Ridge: Oakridge National Laboratory, 2011.
- TAVASSZY, L. A. *et al.* Scenario-wise analysis of transport and logistics with a SMILE. *In: WCTR CONFERENCE*, 8., 1998, Belgium. **Annals...** Belgium: Antwerp, 1998.
- TONGZON, J.L. Port choice and freight forwarders. **Transportation Research Part E: logistics and transportation review**, v. 45, n. 1, p. 186-195, Jan. 2009.
- TRAIN, K. E. **Discrete choice methods with simulation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- USDOT – UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Commodity flow survey**. Washington: BTS, 2012. Disponível em: <<https://goo.gl/iFYU7H>>.
- VOVSHA, P.; BEKHOR, S. **Link-nested logit model of route choice: overcoming route overlapping problem**. Washington: TRB, 1998. (Transportation Research Record, n. 1645).
- WILSON, A. G. **Entropy in urban and regional modelling**. London: Pion, 1970.
- . **Urban and regional models in geography and planning**. New York: John Wiley & Sons, 1974.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

CAMARGO, P. V.; MCNALLY, M. G.; RITCHIE, S. Exploratory use of raster images as a data source for agricultural commodities transportation planning. *In: ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD*, 93., 2014, Washington. **Annals...** Washington: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2014.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. **Computing in Science and Engineering Archive**, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007.

HYMAN, G. M. The calibration of distribution models. **Environment and Planning**, v. 1, p. 105-112, 1969.

VAN DER WALT, S.; COLBERT, S. C.; VAROQUAUX, G. The NumPy array: a structure for efficient numerical computation. **Computing in Science & Engineering**, v. 13, n. 2, 22-30, 2011.

VAN ROSSUM, G.; DRAKE, F. L. (Eds.). **Python Reference Manual**. Virginia: PythonLabs, 2001.

WILLIAMS, I. A comparison of some calibration techniques for doubly constrained models with an exponential cost function. **Transportation Research**, v. 10, n. 2, p. 91-104, Apr. 1976.

Missão do Ipea

Aprimorar as políticas públicas essenciais ao desenvolvimento brasileiro por meio da produção e disseminação de conhecimentos e da assessoria ao Estado nas suas decisões estratégicas.

ipea Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

MINISTÉRIO DO
**PLANEJAMENTO,
DESENVOLVIMENTO E GESTÃO**

