

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA

HALLEY WESLEY ALEXANDRE SILVA GONDIM

**Construção de Visualizações de  
Matrizes Origem-Destino no Cenário do  
Tráfego Urbano com Foco em Avaliação  
de Usabilidade**

Goiânia  
2016

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**      Dissertação      Tese

**2. Identificação da Tese ou Dissertação**

Nome completo do autor: Halley Wesley Alexandre Silva Gondim

Título do trabalho: Construção de Visualizações de Matrizes Origem-Destino no Cenário do Tráfego Urbano com Foco em Avaliação de Usabilidade

**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  SIM      NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Data: 26 / 09 / 2016

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

HALLEY WESLEY ALEXANDRE SILVA GONDIM

# **Construção de Visualizações de Matrizes Origem-Destino no Cenário do Tráfego Urbano com Foco em Avaliação de Usabilidade**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Doutorado.

**Área de concentração:** Ciência da Computação.

**Orientador:** Prof. Dr. Hugo Alexandre Dantas do Nascimento

Goiânia  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Wesley Alexandre Silva Gondim, Halley  
Construção de Visualizações de Matrizes Origem-Destino no Cenário do Tráfego Urbano com Foco em Avaliação de Usabilidade. [manuscrito] / Halley Wesley Alexandre Silva Gondim. - 2016. CCXXI, 221 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Alexandre Dantas do Nascimento . Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Informática (INF), Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Goiânia, 2016. Bibliografia. Apêndice.

1. Tráfego Urbano. 2. Matriz Origem-Destino. 3. Visualização de Informações. 4. Avaliação de Usabilidade. I. , Hugo Alexandre Dantas do Nascimento, orient. II. Título.

CDU 004



**Ata de Defesa de Tese de Doutorado**

Aos vinte e seis dias do mês de setembro de dois mil e dezesseis, no horário das nove horas, foi realizada, nas dependências do Instituto de Informática da UFG, a defesa pública da Tese de Doutorado do aluno Halley Wesley Alexandre Silva Gondim, matrícula no. 2011 0535, intitulada **“Construção de Visualizações de Matrizes Origem-Destino no Cenário do Tráfego Urbano com Foco em Avaliação de Usabilidade”**.

A Banca Examinadora, constituída pelos professores:

Prof. Dr. Hugo Alexandre Dantas do Nascimento – (INF/UFG) - orientador

Prof. Dr. Cedric Luiz de Carvalho – INF/UFG

Profa. Dra. Carla Maria Dal Sasso Freitas - INF/UFRGS

Prof. Dr. Eduardo Simões de Albuquerque – INF/UFG

Prof. Dr. Fabrizzio Alphonsus Alves de Melo Nunes Soares- INF/UFG

emitiu o resultado:

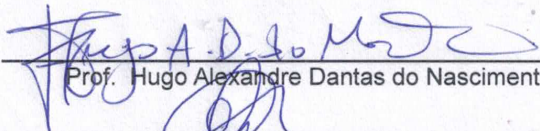
Aprovado

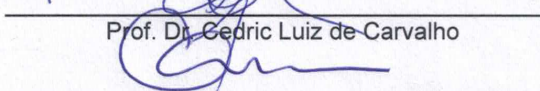
Aprovado com revisão

(A Banca Examinadora deve definir as exigências a serem cumpridas pelo aluno na revisão, ficando o orientador responsável pela verificação do cumprimento das mesmas.)

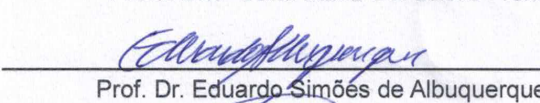
Reprovado

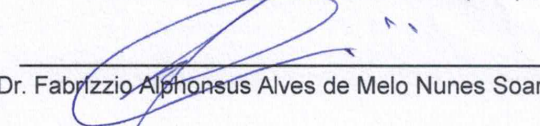
com o seguinte parecer: tendo o aluno desenvolvido o trabalho adequadamente e com contribuições científicas, além de demonstrar domínio do tema e segurança na apresentação, a banca o considera aprovado.

  
Prof. Hugo Alexandre Dantas do Nascimento

  
Prof. Dr. Cedric Luiz de Carvalho

Profa. Dr.a Carla Maria Dal Sasso Freitas

  
Prof. Dr. Eduardo Simões de Albuquerque

  
Prof. Dr. Fabrizzio Alphonsus Alves de Melo Nunes Soares

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador(a).

**Halley Wesley Alexandre Silva Gondim**

Mestre em Ciência da Computação pela UFG e especialista em Banco de Dados. Possui experiência em Computação Gráfica e Engenharia de Software com ênfase em: visualizações, modelagem 3D, desenvolvimento e arquitetura de software, e com conhecimentos específicos em *frameworks* de aplicação Java, Three.js e D3.js. Atualmente é Analista de Sistemas da PUC/GO

Dedico este trabalho a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível.

---

## **Agradecimentos**

---

Quero agradecer primeiramente ao meu orientador, prof. Dr. Hugo Alexandre, por me incentivar nos momentos difíceis e pelas lições que me tornaram um pesquisador melhor. Sem dúvida é um ótimo mestre! Agradeço ainda ao professor Dr. Derek Reilly, que me co-orientou nesta caminhada com sábios conselhos e ajuda na publicação de artigos. Agradeço também à minha esposa e aos meus familiares por me apoiarem e compreenderem minha dedicação a este trabalho. Faço um agradecimento especial a todos os meus colegas de turma e do grupo de pesquisa do tráfego, em particular ao meu amigo Walid Jradi pelos conselhos e pela motivação. Por fim, agradeço à coordenação do doutorado e à secretaria da pós-graduação, em especial à Mirian e à Patrícia, por responderem minhas infinitas dúvidas sobre o programa; à PUC-GO, pelo apoio na realização do doutorado, inclusive na forma de liberação e flexibilidade de reorganização de horário de trabalho, para que eu pudesse frequentar as aulas e participar das reuniões de pesquisa. Aos alunos e professores da UFG e da PUC-GO que participaram das avaliações de usabilidade descritas nesta tese; e aos demais amigos e colegas que acompanharam e incentivaram o progresso nessa longa jornada.

Muito obrigado!

Cada sonho que você deixa para trás é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.

**Steve Jobs,**

---

## Resumo

---

Gondim, Halley Wesley Alexandre Silva. **Construção de Visualizações de Matrizes Origem-Destino no Cenário do Tráfego Urbano com Foco em Avaliação de Usabilidade**. Goiânia, 2016. 221p. Tese de Doutorado Relatório de Graduação. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

A maioria das cidades de médio e grande porte no mundo sofre dos problemas relacionados ao crescimento do número de veículos. Congestionamentos, poluição do ar e desperdício de tempo são alguns exemplos desses problemas, hoje constantemente lembrados frente aos grandes prejuízos causados aos cidadãos. A utilização de técnicas de Visualização de Informações pode servir para apoiar a análise desses problemas e ajudar a identificar soluções viáveis e efetivas para os mesmos. Por outro lado, a aplicação de Visualização de Informações aos problemas de tráfego urbano ainda é uma área pouco explorada e geralmente focada em aspectos simples do trânsito. A presente tese vem, assim, suprir a carência por estudos nessa área, em especial na representação de dados relacionados a matrizes Origem-Destino (OD). Para tanto, propõe-se uma classificação específica para visualizações voltadas ao cenário do tráfego urbano, com o objetivo de facilitar a identificação de trabalhos e autores relacionados à área. Além disso, há a criação de novas visualizações, voltadas para matrizes ODs, com o intuito de oferecer diferentes alternativas na representação de dados do trânsito. Por fim, propõe-se uma abordagem para avaliar visualizações de matrizes OD e informações correlacionadas, com o intuito de oferecer um *feedback* adequado aos *designers* de interface e possibilitar a criação de visualizações mais efetivas.

### Palavras-chave

Tráfego Urbano, Matriz Origem-Destino, Visualização de Informações, Avaliação de Usabilidade.

---

## Abstract

---

Gondim, Halley Wesley Alexandre Silva. **Creation of Origin-Destination Matrices Visualizations in the Urban Traffic Scenario with a Focus on Usability Assessment**. Goiânia, 2016. 221p. PhD. Thesis Relatório de Graduação. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

Most of the medium and large cities in the world suffer from the problems related to the growth of the number of vehicles. Congestion, air pollution and weather are some examples of these problems, today constantly reminded of the great damage done to citizens. The use of Information Visualization techniques can serve to support the analysis of these problems and help identify viable and effective solutions for them. On the other hand, the application of Information Visualization to the problems of urban traffic is still a poorly explored area and generally focused on simple aspects of traffic. The present thesis thus addresses the lack of studies in this area, especially in the representation of data related to origin-destination (OD) matrices. In order to do so, a specific classification is proposed for visualizations aimed at the urban traffic scenario, with the purpose of facilitating the identification of works and authors related to the area. In addition, there is the creation of new visualizations, directed to OD arrays, in order to offer different alternatives in the representation of traffic data. Finally, an approach is proposed to evaluate visualizations of OD matrices and correlated information, with the intention of offering adequate feedback to interface designers and enabling the creation of more effective visualizations.

### Keywords

Urban Traffic, Origin-Destination Matrix, Information Visualization, Usability Evaluation.

---

# Sumário

---

Lista de Figuras	<b>13</b>
<b>1</b> Introdução	<b>15</b>
1.1 Objetivos	18
1.2 Organização da Tese	19
<b>2</b> Conceitos Fundamentais	<b>20</b>
2.1 Modelagem e Simulação de Tráfego Urbano	20
2.1.1 Conceitos Fundamentais para Análise do Tráfego Urbano	20
2.1.2 Modelo Quatro Etapas	22
2.2 Visualização de Informações	24
2.2.1 Modelo de Referência	27
2.2.2 Visualizações Efetivas	30
2.2.3 Técnicas de Visualização	31
2.2.4 Avaliação de Visualização de Informações	35
2.3 Avaliação de Usabilidade	36
2.3.1 Técnicas de Avaliação de Usabilidade	37
2.4 Taxonomias de Visualização de Informações	45
2.4.1 Taxonomia de Acordo com o Tipo de Dados e Tarefas	45
2.4.2 Classificação das Técnicas de Visualização de Informações	46
2.4.3 Taxonomia de Tarefas Visuais de Baixo e de Alto Nível	47
<b>3</b> Visualização de Informações Aplicada ao Tráfego Urbano	<b>53</b>
3.1 Visualizações 2D/3D e Transformações Geométricas	54
3.2 Visualizações Hierárquicas	67
3.3 Visualizações por Densidade de Pixel	69
3.4 Ferramentas de Simulação de Tráfego Urbano	70
<b>4</b> Proposta de Classificação para Visualizações do Tráfego Urbano	<b>81</b>
<b>5</b> Visualizações Propostas para Matrizes Origem-Destino	<b>88</b>
5.1 Visualizações Propostas	89
5.1.1 ArcFlow	99
5.1.2 ODFlow	102
5.1.3 ODGraph	104
5.1.4 ODParallel	106

6	Abordagem de Avaliação de Usabilidade de Visualizações de Matriz OD	<b>110</b>
6.1	Descrição da abordagem	111
6.1.1	Prototipação em Papel	113
6.1.2	Avaliação Heurística	113
6.1.3	Ensaio de Interação	126
6.2	Exemplo de Uso da Abordagem de Avaliação da Usabilidade Proposta	132
6.2.1	Prototipação em Papel	132
6.2.2	Avaliação Heurística	136
6.2.3	Ensaio de Interação	139
	Primeiro Ensaio de Interação - (ArcFlow x ODFlow)	140
	Segundo Ensaio de Interação - (ODGraph x ODParallel)	148
6.2.4	Discussões	153
7	Conclusão	<b>155</b>
7.1	Dificuldades Encontradas	156
7.2	Trabalhos Futuros	156
	Referências Bibliográficas	<b>158</b>
A	Questões - Ensaio de Interação (Avaliação I)	<b>176</b>
B	Questões - Ensaio de Interação (Avaliação II)	<b>183</b>
C	Dados do Ensaio de Interação (Avaliação I)	<b>191</b>
D	Dados do Ensaio de Interação (Avaliação II)	<b>196</b>
E	Dados da Avaliação Heurística	<b>202</b>
F	Relatório da Revisão Sistemática sobre Visualização de Informações Voltadas ao Cenário do Tráfego Urbano	<b>216</b>
F.1	Planejamento	216
F.1.1	A - Objetivos principais	216
F.1.2	B - Questões a serem respondidas pela revisão	216
F.1.3	C - População	217
F.1.4	D - Intervenção	217
F.1.5	E - Controle	217
F.1.6	Resultados	217
F.1.7	G - Aplicação	217
F.1.8	H - Estratégias de Busca e Palavras-chave	217
F.1.9	I - Ferramentas e instrumentos	217
F.1.10	J - Critérios de inclusão/seleção e exclusão	218
F.2	Condução do Mapeamento	218
F.2.1	A - Seleção	219
F.2.2	B - Extração	219
F.3	Análise dos Dados	219
F.3.1	A - Avaliação da Qualidade da Seleção	219
F.3.2	B - Questões de Busca	220
F.4	Ameaças de Validade	221

---

## Lista de Figuras

---

2.1	Modelo de referência para a construção de visualizações	28
2.2	Técnica olho de peixe sobre mapas	32
2.3	Técnica <i>Table lens</i>	32
2.4	Técnica <i>Perspective Wall</i>	33
2.5	Técnica <i>Hyperbolic Tree</i>	34
2.6	Técnica <i>TreeMap</i>	34
2.7	Classificação das técnicas de Visualização de Informações	47
2.8	Taxonomia de tarefas visuais	48
2.9	Classificação em alto-nível, em exemplos	51
2.10	Classificação em baixo-nível, em exemplos	52
2.11	Quadro resumo da classificação	52
3.1	Mapa de ruídos de Fulton County, Georgia, com destaques do centro de Atlanta	55
3.2	Mapa de ruídos expresso nas construções	56
3.3	<i>Cascade on Wheels - Walls Map Piece</i>	57
3.4	<i>Cascade on Wheels - Traffic Noise Mixer</i>	58
3.5	<i>Isochronic Singapore</i>	59
3.6	<i>Data Lenses</i>	60
3.7	<i>Every death on every road in Great Britain 1999 - 2010</i>	60
3.8	Modelo híbrido 3D de simulação de tráfego	61
3.9	<i>Visualizing the Circulatory Problems of Lisbon - A</i>	62
3.10	<i>Visualizing the Circulatory Problems of Lisbon - B</i>	63
3.11	<i>Morphing City</i>	63
3.12	<i>Traffic Origins</i>	64
3.13	<i>Pulse of the City</i>	65
3.14	Visualizações envolvendo matrizes OD	66
3.15	Visualização em 3D indicando a concentração de carbono	67
3.16	Visualização utilizando <i>Treemaps</i>	68
3.17	Visualizações utilizando a técnica KDE	69
3.18	Software MAPS	71
3.19	Software SUMO	72
3.20	Simulação de sistemas dinâmicos usando o VisSim	72
3.21	VisSim - metrô de superfície	73
3.22	Software AIMSUN	74
3.23	Software EMME 3 - visualização do volume de tráfego	75
3.24	Software EMME 3 - Visualização de dados referentes a trajetos de linhas de ônibus	76

3.25	Software Dynameq	77
3.26	DRACULA – exemplo de simulação do tráfego	78
3.27	Simulação de um cruzamento com CORSIM	80
4.1	Classificação em alto-nível para visualizações sobre o tráfego urbano.	82
5.1	Visualização proposta (a)	91
5.2	Visualização proposta (b)	92
5.3	Visualização proposta (c)	93
5.4	Visualização proposta (d)	94
5.5	Visualização proposta (e)	95
5.6	Visualização proposta (f)	96
5.7	Visualização proposta (g)	97
5.8	Visualização proposta (h)	97
5.9	Visualização proposta (i)	98
5.10	Visualização proposta (j)	99
5.11	Visualização ArcFlow	100
5.12	Visualização ODFlow	103
5.13	Visualização <i>ODGraph</i>	106
5.14	Visualização ODParallel	107
6.1	Abordagem proposta para avaliação de visualizações de Matrizes OD e de dados do tráfego associados.	112
6.2	Alguns exemplos dos protótipos criados em papel.	133
6.3	Etapa I - Número de Problemas/Melhorias encontradas.	135
6.4	Etapa II - Número de Problemas/Melhorias encontradas.	137
6.5	Etapa II - Número de Problemas/Melhorias encontradas por avaliador.	138
6.6	Etapa II - Número de Problemas/Melhorias categorizadas por gravidade.	138
6.7	Quadro Resumo - ODFlow	142
6.8	Quadro Resumo - ArcFlow	143
6.9	Quadro Resumo - ODGraph	149
6.10	Quadro Resumo - ODParallel	150
6.11	Etapa III - Número de Problemas/Melhorias encontradas.	153

## Introdução

---

Áreas urbanas de muitos países sofrem com o aumento do congestionamento de veículos [45, 21, 186]. Por exemplo, o *Texas A&M Transportation Institute (TTI)* <sup>1</sup> registra anualmente, desde 1982, dados sobre o tráfego urbano em 370 cidades dos Estados Unidos. Assim, em 2015, gastou-se em congestionamentos mais de 3 bilhões de litros de combustíveis, bem como houve a perda acumulada de 7 bilhões de horas (42 horas para cada motorista). Ao transformar esses dados em valores monetários, tem-se a quantia de \$160 bilhões ou aproximadamente \$960 para cada condutor. Já no Brasil, um estudo realizado em 2011 pela Confederação Nacional da Indústria mostrou que 26% da população despendia mais de uma hora por dia em deslocamentos, por exemplo: trabalho e escola. Porém, entre 2011 e 2014, esse percentual atingiu 31%. Estima-se para 2030 um volume de mais de 2,08 bilhões de veículos em todo o mundo [53]. Este número excessivo de veículos somado à má infraestrutura/planejamento da rede viária pode causar consequências graves que vão desde o aumento de custo operacional, congestionamentos e desgaste de veículos até danos à saúde da população e dificuldade no crescimento de um país. Por exemplo, os veículos que se deslocam em baixa velocidade tendem a consumir uma quantidade maior de combustível, e assim produzir um número além do esperado de gases tóxicos, do que veículos que viajam a uma velocidade mais rápida. Isso ocorre porque há uma relação direta entre velocidade, consumo de combustível e emissão de agentes nocivos ao meio ambiente [21, 163]. Portanto, resolver (ou atenuar) o problema do congestionamento de tráfego urbano é importante tanto para o desenvolvimento econômico e social quanto por razões ambientais. Todavia, os problemas enfrentados no tráfego [21] não são simples de se resolver, já que dependem de vários aspectos dinâmicos (por exemplo: urbanismo, distribuição da população e localização dos ambientes de trabalho e de lazer, etc.) que são difíceis de se descrever e modelar em detalhes [34]. Como resultado, o estudo deste tema geralmente envolve a divisão do problema de tráfego em passos ou etapas, a fim de facilitar a sua compreensão, (como é o caso do método quatro etapas, apresentado posteriormente na Seção 2.1.2).

---

<sup>1</sup><http://mobility.tamu.edu/ums/>

Há ainda uma enorme pressão social para que as entidades responsáveis pela gestão do tráfego tomem ações rápidas e assertivas, concentrando-se na melhoria das redes viárias utilizando o mínimo de recursos possível. Entre as ações que visam a mitigar os problemas relacionados ao trânsito estão: ampliar a malha viária por intermédio da adição de novas vias ou realizar melhorias não tão intrusivas pela otimização de alguns elementos do tráfego, como o ajuste dos tempos de semáforo, a mudança dos sentidos de deslocamentos nas ruas e avenidas e a proibição ou permissão de conversões entre as vias. A opção focada na otimização desses elementos do tráfego, além de ser mais econômica, evita os transtornos que seriam gerados pelo impacto de uma obra. Além disso, a otimização pode ser mais facilmente apoiada por ferramentas computacionais que auxiliam na simulação do tráfego urbano sob vários cenários viáveis, com o objetivo de expor os pontos fortes e fracos intrínsecos à malha viária, permitindo a avaliação de projetos que poderão levar a uma redução do congestionamento ou à melhoria do tempo total de viagem dos usuários.

Todavia, informações, dados e cálculos não são suficientes para obter um *feedback* rápido. É preciso dedicar tempo para identificar padrões e informações não triviais. Algumas informações podem ser facilmente perceptíveis quando se possui uma pequena e objetiva quantidade de dados. No entanto, na maioria dos casos torna-se difícil, senão impossível, extrair claramente informações transmitidas sobre a forma textual. Uma das alternativas para aumentar o poder cognitivo sobre esses dados é através do uso de técnicas de Visualização da Informação (VI).

De acordo com Buckland *et al.* [32], a informação pode ser classificada em três grupos: *a informação como processo*, *a informação como conhecimento* e, por último (a definição que se relaciona com a VI), *a informação como objeto*<sup>2</sup>. A VI é uma disciplina que tem por principal objetivo estudar/proporcionar meios que ofereçam suporte visual gráfico para apoiar tarefas de análise em dados complexos. Compreendem-se dados complexos como: conjuntos de dados oriundos de diferentes domínios que podem ser caracterizados pela diversidade de tipos (categóricos, informações embutidas em documentos de texto, dados numéricos, imagens, sensores, vídeos, etc.), grande volume e alta dimensionalidade (dados descritos por muitos atributos).

O uso de técnicas de Visualização de Informação pode contribuir de maneira mais expressiva no processo de análise de dados do que uma simples observação dos dados em forma bruta. Ao dispor os dados de acordo com critérios específicos, acaba-se destacando informações que possibilitam a construção de novos conhecimentos. Diversas pesquisas apontam que a percepção é expandida quando se utiliza recursos visuais. Segundo Card *et al.* [35], o tempo de reconhecimento cognitivo de estruturas gráficas

---

<sup>2</sup>conjunto de objetos com a finalidade de transmitir diferentes informações de formas não convencionais.

é bem menor do que o de informações textuais. Assim, ferramentas computacionais de visualização podem oferecer apoio aos seus usuários em todo o processo de análise das informações envolvidas. Tipicamente, essas ferramentas podem apoiar usuários em três atividades: (1) *Análise exploratória*: o usuário pretende encontrar novos conhecimentos contidos nos dados através de um processo analítico que explora a representação visual em busca de sinais aparentes. Tais sinais podem sugerir indicações sobre tendências/padrões particulares e relações que podem levar a alguma hipótese sobre as visualizações. (2) *Análise confirmatória*: através da exploração visual, o usuário pode evidenciar a validação ou rejeição de uma determinada hipótese. (3) *Apresentação*: representação gráfica das relações, ações e estruturas ou qualquer outro atributo específico das informações.

Como consequência do avanço da ciência, as representações gráficas passaram a transmitir cada vez mais significado, possibilitando a construção de sistemas com um maior número de detalhes e tornando as informações mais ricas e precisas em relação a sua qualidade de apresentação (recursos gráficos semelhantes aos do mundo real) [69]. A VI também está presente hoje em grande parte dos sistemas computacionais de modelagem e simulação de tráfego. Tal presença possibilita o enriquecimento da percepção dos usuários sobre a organização e o fluxo de uma rede, identificando relações não triviais entre os dados e o comportamento do tráfego. Esses sistemas de simulação de trânsito são essenciais na tomada de decisão, pois grande parte dessas informações podem ser percebidas através de visualizações.

Por outro lado, apesar da presença de técnicas de VI em sistemas de tráfego e de grande interesse dos governos e da sociedade na melhoria das condições de mobilidade, principalmente nas áreas metropolitanas, nota-se que poucas pesquisas científicas têm abordado o uso da Visualização da Informação para o caso particular de problemas de tráfego urbano [76, 42]<sup>3</sup>. Há certamente uma vasta literatura sobre estudos sociais e econômicos de problemas de trânsito, modelos matemáticos, algoritmos para simulação de tráfego e análise. No entanto, na maior parte destes estudos, quando são utilizadas visualizações, estas não são o foco principal do trabalho, geralmente ilustram um problema ou um processo específico.

Este resultado é esperado, pois a escolha de uma representação gráfica que seja adequada para os dados e considere os princípios da percepção humana não é uma tarefa trivial, consistindo em um dos principais desafios da Visualização de Informações. Tal dificuldade leva a diversos debates [65, 149, 98, 97], dentre os quais pode-se citar os dez problemas ainda não resolvidos na Visualização da Informação [38]. Isto se dá pela existência de inúmeros dados que se comportam de forma concorrente aos princípios da

---

<sup>3</sup>Aqui, nos referimos a tráfego urbano de forma particular como sendo o deslocamento de veículos diversos nas ruas e avenidas de uma cidade e as interações que acontecem entre estes elementos.

percepção, dificultando assim a construção de representações visuais mais adequadas. Este cenário pode ainda se tornar mais complexo quando se considera o ambiente dinâmico do trânsito de veículos e a análise de conjuntos de dados que variam em relação a dimensões de tempo.

Dentre os trabalhos observados na visualização do tráfego urbano, há um número insuficiente de pesquisas sobre a representação de matrizes Origem Destino (OD). A matriz OD é uma das principais exigências para algoritmos de alocação de tráfego contidos em sistemas de simulação de trânsito. Um dos possíveis motivos para justificar a carência de representações visuais de matrizes OD é a grande quantidade de informações interconectadas vinculadas às mesmas, como os locais de origem e destino (com seus posicionamentos geográficos), os tipos de veículos, as demandas de deslocamento, a escala temporal e as rotas de viagens associadas aos pares OD.

Por se tratar de uma representação complexa, poucos autores oferecem instruções sobre como construir visualizações mais efetivas para matrizes OD. Na grande maioria dos trabalhos, discute-se apenas sobre alguns dos problemas enfrentados e não quais foram as informações/regras que auxiliaram nas construções das visualizações.

## 1.1 Objetivos

Esta tese possui como objetivo principal propor meios alternativos que facilitem a construção de visualizações de matrizes OD. Para isso, definiu-se um conjunto de ações com o propósito de torná-las mais efetivas. Elas podem ser aplicadas em várias etapas, desde a concepção da visualização até a sua validação. Dentre estas ações, há a elaboração de uma classificação específica para visualizações do tráfego urbano, a criação de novas visualizações e, por fim, a definição de uma avaliação de usabilidade.

Inicialmente, com o objetivo de organizar as visualizações voltadas para o tráfego urbano, é criada uma classificação específica para o tema. Seu propósito é auxiliar novos usuários de visualização e profissionais da área a identificarem em quais categorias suas visualizações se encontram, bem como facilitar a identificação de pesquisadores que atuam na mesma área.

Em sequência, propõe-se o desenvolvimento de novas visualizações de matrizes OD com o intuito de fortalecer a área e levantar novos debates sobre a crise da mobilidade urbana atual.

Espera-se também montar uma combinação de técnicas de avaliação de usabilidade a fim de identificar os diversos graus de problemas contidos na construção de uma interface. Tal combinação prevê o uso da prototipação em papel, avaliação heurística e ensaios de interação.

## 1.2 Organização da Tese

O restante desta tese está organizado como segue. O Capítulo 2 apresenta conceitos gerais sobre os modelos de simulação de tráfego, Visualização de Informações e Avaliação de Usabilidade. Ele fornece informações sobre os termos técnicos e conceitos fundamentais utilizados em todo o trabalho. O Capítulo 3 revisa os principais trabalhos sobre visualizações voltadas para o tráfego urbano e descreve sistemas computacionais nesta área que fazem o uso de visualizações. Uma proposta de classificação de VI voltada para o tráfego urbano é definida no Capítulo 4. Ao final, tem-se a aplicação da proposta aos diversos trabalhos da área. Novas visualizações para matrizes OD são descritas no Capítulo 5. O Capítulo 6 introduz uma abordagem para a avaliação de usabilidade de matrizes OD, com uma descrição detalhada de suas etapas. A seção 6.2 mostra a aplicação da abordagem para algumas das visualizações sugeridas nesta tese. O capítulo 7 faz uma análise geral da pesquisa realizada e apresenta as conclusões sobre os pontos fortes e fracos das ferramentas e dos métodos propostos, as principais contribuições do trabalho e sugestões para pesquisas futuras. A parte final desta tese é composta por uma lista de referências bibliográficas utilizadas na pesquisa de doutorado e apêndices com detalhes das avaliações de usabilidade e de uma revisão sistemática realizada.

---

## Conceitos Fundamentais

---

Este capítulo tem como objetivo apresentar conceitos e termos técnicos sobre modelagem e simulação do tráfego urbano, Visualização de Informações e, por fim, Avaliação de Usabilidade.

### 2.1 Modelagem e Simulação de Tráfego Urbano

A presente seção mostra os conceitos básicos sobre modelagem e simulação de tráfego e conceitualiza alguns termos técnicos sobre o trânsito que são utilizados ao longo de todo este trabalho.

As técnicas de simulação de tráfego não são recentes; elas surgiram na área de transportes por volta de 1950. Atualmente, elas são consideradas elementos essenciais para o desenvolvimento de projetos e estratégias de controle de tráfego urbano. A simulação possibilita a comparação de políticas pré-definidas com o comportamento corrente do tráfego. Por consequência, permite a redução de custos do mesmo modo que proporciona uma melhor tomada de decisão.

#### 2.1.1 Conceitos Fundamentais para Análise do Tráfego Urbano

O fluxo de tráfego urbano utiliza as leis da matemática, da probabilidade e da física para descrever o comportamento do trânsito. Fundamentalmente, o comportamento do fluxo pode ser simulado por meio de três modelos: **macroscópicos** [28, 71, 185], **microscópicos** [73, 71] e **mesoscópicos** [33]. O modelo macroscópico de trânsito é baseado em uma analogia entre o fluxo de tráfego e a mecânica de fluídos. Já o microscópico leva em conta o comportamento individual de cada veículo.

O modelo macroscópico apresenta um nível de abstração maior do que o microscópico, ou seja, a quantidade de dados de entrada para o modelo é reduzida. Ele facilita a modelagem de redes grandes e complexas além de demandar um tempo de processamento computacional melhor.

Contudo, o modelo macroscópico apresenta restrições por não apresentar fenômenos ricos em detalhes; como, por exemplo, a descontinuidade de fluxo por meio da inclusão de sinais de trânsito (semáforos) e a competição entre veículos (aproximação, troca de faixas, etc). Note, contudo, que os modelos macroscópicos permitem a configuração diferente das ruas [83]. Já o modelo microscópico permite a exploração de detalhes do trânsito; porém, ele exige um volume maior de informações, o que de certo modo pode tornar o seu uso dispendioso para sistemas de grande porte. Simulações com este tipo de comportamento (micro) são ideais para áreas menores ou sistemas de pequeno e médio porte [140].

Por fim, existem os modelos mesoscópicos. Eles são modelos determinísticos que buscam preencher a lacuna entre os modelos micro e macro. Basicamente, possuem um grande volume de detalhes, mas possuem um menor tratamento das atividades e interações [33].

De acordo com os modelos citados, os sistemas computacionais de trânsito podem levar em consideração as seguintes técnicas para a gestão de alocação: *car-following* representa as interações longitudinais dos veículos na rede, ou seja, calcula-se a velocidade corrente do veículo a partir de sua velocidade desejada, de acordo com a velocidade e distância do veículo posicionado adiante. Dependendo da magnitude do afastamento, o modelo pode ser classificado em três categorias: movimento livre, movimento seguidor e movimento seguidor aproximado. No **movimento livre**, o veículo acelera e desacelera livremente de modo a manter sua velocidade desejada. Ou seja, o veículo está afastado e não sofre influência por parte do outro condutor. Já no **movimento seguidor**, o veículo tem sua velocidade corrente controlada pelo veículo a sua frente. Quando o veículo encontra-se no **movimento seguidor aproximado**, indica uma grande proximidade do veículo logo à frente.

Uma outra técnica bastante utilizada é a *lane-changing*. Ela avalia a movimentação transversal dos veículos na pista, reproduzindo a troca de faixas. É possível dividi-lo em três etapas:

1. identificação e definição do tipo de estímulo para a mudança de faixa (por exemplo, um ônibus acessando um ponto de parada);
2. seleção da faixa alvo; e
3. mudança de faixa caso existam brechas.

**Tabela 2.1:** *Matriz O-D.*

O/D	1	2	...	m	
1	$d_{11}$	$d_{12}$	...	$d_{1m}$	$P_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
n	$d_{n1}$	$d_{n2}$	...	$d_{nm}$	$P_n$
	$A_1$	$A_2$	...	$A_m$	A/P

Inúmeros sistemas de simulação de trânsito implementam os tipos de modelos citados. No capítulo 3 são listados alguns desses sistemas. Interessantes trabalhos foram realizados comparando os diversos *frameworks* de gerenciamento de tráfego, como também a revisão de tipos de sistemas micro e macro<sup>1</sup> [5, 108, 90].

### 2.1.2 Modelo Quatro Etapas

Os problemas decorrentes do tráfego [21] são difíceis de se descrever e de se modelar com riqueza de detalhes [34], pois dependem de vários aspectos dinâmicos (urbanismo, distribuição da população, posicionamento de locais de trabalho e sociais, atividades econômicas, lazer, etc.). Como resultado, o estudo deste tema geralmente envolve a divisão do problema de tráfego em passos ou etapas a fim de facilitar sua compreensão. O Modelo de Quatro Etapas [131] é um exemplo clássico composto dos seguintes passos: geração de viagens, distribuição de viagens, divisão modal e alocação de viagens. Estes passos são definidos a seguir:

1. *Geração de viagens* – representa o número total de viagens geradas a partir de uma origem e a atração para um destino de cada região<sup>2</sup> de estudo. Estes números de viagens estão diretamente ligados às características do terreno (comercial, residencial, etc.), tipos de domicílio (transitório ou permanente), tipo de emprego/renda, valor do imóvel, grau de urbanização da área, número de veículos existentes em uma residência, características dos sistemas de transporte, número de pessoas que trabalham na família, dentre outros. As viagens podem também ser classificadas em duas categorias: viagens baseadas nos domicílios (o domicílio pode estar contido tanto na origem como no destino das viagens) e as que não são baseadas em domicílios.
2. *Distribuição de viagens* – consiste em estabelecer ligações entre as várias regiões para as quais os cálculos de geração de viagens foram realizados. Esta etapa tem o objetivo de distribuir as viagens geradas por cada zona entre suas possíveis regiões de destino. Além disso, informações sobre custos de viagens entre cada par de zonas devem ser consideradas. Entende-se como *custos de viagem* qualquer aspecto que possa interferir no tempo gasto no processo de uma viagem, como por exemplo: estado das ruas, distância percorrida, tempo gasto nos semáforos, paradas obrigatórias, intersecções, entre outros. Uma das formas de se apresentar essas distribuições é através de *matrizes origem e destino* [36], que são frequentemente representadas como matrizes bidimensionais. A estrutura de uma matriz OD pode

---

<sup>1</sup><http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/append3d.html>

<sup>2</sup>Entende-se região como uma área geográfica definida por critérios como: poder econômico, pontos de interesse, etc.

ser vista na (Figura 2.1). Cada célula de uma matriz OD indica o número de deslocamento de veículos ou de pessoas de uma região para outra na rede viária num dado momento (temporal). As linhas e colunas representam as origens e os destinos (em regiões ou pontos da rede), respectivamente. Um valor de matriz na interseção  $i, j$  pode ser referenciado por  $OD(i, j)$ . Também é possível separar os dados em matrizes OD diferentes, de acordo com o modo de transporte (carro, ônibus, etc.), o período do dia (horário de rush, almoço, noite, etc.) e dias da semana [54, 12]. Outros termos também importantes utilizados em matrizes OD são listados logo abaixo.

- **Zona de tráfego** – é a divisão de regiões no mapa de acordo com características semelhantes como: agrupamento de áreas (comercial, industrial, residencial, etc.), limites entre bairros (geograficamente), etc. As zonas marcam as origens e destinos das viagens, podendo ser chamadas de zonas de produção ou atração.
  - **Centroides/nós** – representa o ponto de origem e/ou destino de uma zona. Os nós estão associados a locais que possuem uma maior movimentação ou uma maior densidade demográfica.
  - **Arestas/arcos** – representam as vias ou ruas. Elas atuam como condutores dos fluxos entre os nós, além de possuírem as características de custo para a travessia (tempo), comprimento, etc.
  - **Custo da viagem** – é ponderado de acordo com as suas características, por exemplo: pedágio, limite de velocidade, quantidade de faixas, etc.
3. *Divisão modal* – é a alocação das viagens pelos diferentes meios de transporte (tais como carros, motos, transporte público, pessoas, dentre outros), possivelmente utilizando uma matriz OD diferente para conter os dados de cada modal. As características que afetam a escolha do modo de transporte estão associadas a fatores socioeconômicos e serviços prestados pelos diferentes meios de deslocamento. Geralmente, são consideradas as seguintes características:
- **deslocamento** – destino, período e a razão da viagem;
  - **usuário** – renda familiar, grau de instrução, quantidade de veículos, etc.;
  - **transporte** – tempo de espera, custo da passagem, lotação, bem-estar, segurança, etc.

Um dos problemas enfrentados na divisão modal é a obtenção de dados para uma simulação correta. De modo geral, existem dois modelos:

- **Determinísticos** – Calculados de acordo com a proporção de viagens de cada modo de transporte. Utiliza-se: *classificação cruzada* (quantidade média do percentual dos diferentes tipos de transporte), *regressão linear* (relação

matemática entre a quantidade de viagens e os aspectos socioeconômicas dos motoristas) ou *curvas de desvio* (são utilizados parâmetros como o tempo e o custo da via, e a renda do viajante);

- **Probabilísticos** – Usam a probabilidade para determinar a porcentagem de viagens para cada modo de transporte.

4. *Alocação de viagens* – Visa estabelecer os volumes de tráfego que utilizam os diferentes trechos da rede viária. De acordo com Ortuzar *et al.* [139] há diversas abordagens de alocação de viagem. Entre elas, destacam-se a denominada “Tudo-ou-Nada” e as propostas baseadas nos Princípios de Equilíbrio de Wardrop.

Na abordagem “Tudo-ou-Nada”, os motoristas não levam em conta os efeitos dos congestionamentos, podendo escolher a mesma rota de um ponto a outro, enquanto outras rotas não recebem qualquer fluxo. Como isso não representa uma visão real do tráfego, tal método é pouco utilizado.

Em 1952, J. G. Wardrop definiu os alicerces teóricos para o equilíbrio da distribuição dos fluxos numa rede com base nos comportamentos dos usuários, sendo mais conhecida como: “Princípios de Equilíbrio de Wardrop” [166, 208, 82]. Dois principais foram descritos:

- No primeiro princípio, todos os motoristas de uma rede são livres e buscam minimizar o seu próprio custo de viagem (tempo e combustível), até atingir o equilíbrio da rede (distribuição dos veículos). Denomina-se este estado de Equilíbrio do Usuário (EU).
- O segundo princípio propõe que todos os motoristas escolham suas rotas de forma colaborativa, buscando minimizar o tempo global de viagem na rede, representando um estado ótimo do sistema. Intitula-se esse estado de Otimização do Sistema (OS).

Modelos matemáticos e métodos têm sido desenvolvidos para computar a alocação de tráfego respeitando esses princípios de variações dos problemas clássicos do tráfego. Além disso, os métodos de alocação podem ser classificados de acordo com diversos aspectos, como ilustrado na Tabela 2.2 [17, 116, 71].

Note que o problema da alocação de tráfego pode ser tratado através do modelo de quatro etapas, no qual o resultado de uma etapa serve como entrada da próxima [131, 158, 81].

## 2.2 Visualização de Informações

Representações gráficas de diversas formas têm sido usadas como instrumentos de comunicação desde os primórdios da humanidade. Atividades e/ou seres vivos eram

<b>Nível de Informação do usuário</b>	
Determinísticos	Usuários possuem todas as informações sobre o estado das rotas.
Estocásticos	Usuários não possuem todas as informações sobre as rotas. Eles podem utilizar também as mais desfavoráveis.
<b>Classes de usuários</b>	
Modal	Apenas um tipo de veículo na rede; uma única matriz de demanda.
Multimodal	Várias classes de veículos ao mesmo tempo. Diversas matrizes de demanda, capacidades e funções de utilidade.
<b>Simetria</b>	
Simétricos	Fluxos dos arcos que se interceptam influem nos tempos de viagem de forma idêntica.
Assimétricos	Fluxos dos arcos que se interceptam influem nos tempos de viagem de forma diferente.
<b>Separabilidade</b>	
Separável	O fluxo do arco interceptor não interfere no tempo de viagem do arco interceptado.
Inseparável	O fluxo do arco interceptor interfere no tempo de viagem do arco interceptado.
<b>Variabilidade de fluxo</b>	
Estático	O fluxo é considerado estável durante o tempo de análise.
Dinâmico	O fluxo é variável durante o período de análise, sendo este dividido em pequenos intervalos

**Tabela 2.2:** Classificação dos modelos de alocação de tráfego.

desenhados nas paredes das cavernas de acordo com a percepção do indivíduo no cotidiano, com a intenção de registrar fatos marcantes ou importantes ocorridos. Esses registros facilitavam também o compartilhamento das informações com outros membros da comunidade.

Atualmente, sistemas computacionais de informação são bastante comuns nas diversas áreas da sociedade. Logo, a possibilidade de se criar, coletar, compartilhar e armazenar dados de diversas fontes tem crescido exponencialmente a cada dia. Além disso, combinar dados heterogêneos, distribuídos e em grande volume dificulta de forma considerável a abstração de informações relevantes. Uma das formas de amenizar este problema é a utilização de técnicas de Visualização de Informações (VI) [59, 35], por meio das quais o usuário pode obter representações visuais que permitam uma maior organização dos dados e abstração de detalhes.

De acordo com Card *et al.* [35], o termo Visualização de Informações é definido como: “o uso de representações visuais de dados abstratos suportadas por computador e interativas para ampliar a cognição”. Já para Chen *et al.* [38] há a seguinte definição: representações gráficas interativas geradas por computador. Logo, os principais objetivos

da VI, segundo Card *et al.* [35], são: descobrir, tomar decisões e explicar um determinado conjunto de informações. A VI passa a ser útil na medida em que aumenta a capacidade de executar essas e outras atividades cognitivas.

Eventualmente, a VI pode mesclar aspectos de interface homem-computador, computação gráfica, mineração de dados, etc. Tal poder pode proporcionar ao usuário uma ampliação da percepção visual. Em consequência, há uma melhora na análise e na compreensão das informações apresentadas [200].

Todavia, criar uma visualização não é uma tarefa sempre trivial. Chen *et al.* [38] e outros autores [65, 149, 98, 97] comentam sobre as dificuldades encontradas (usabilidade, compreensão das tarefas, escalabilidade, etc.) na construção de VIs de um modo geral. Chen *et al.* [38, 40] e Foley *et al.* [65] deram a essas dificuldades o seguinte nome: os dez maiores problemas não resolvidos da Visualização de Informações. Projetar interfaces das mais diversas áreas que sejam efetivas e que apresentem todas as propriedades (gráficos, cores, variáveis, dimensões, etc.) necessárias para o usuário é uma tarefa de elevada complexidade. Além da quantidade de opções a serem consideradas, essas propriedades podem competir pela percepção do observador e dificultar a criação de representações visuais mais efetivas.

Uma das considerações fundamentais a serem realizadas no processo de criar uma visualização é definir qual(is) técnica(s) são empregada(s) em uma certa aplicação ou situação. Esse critério é certamente sujeito aos tipos de informações tratadas e às tarefas que carecem ser realizadas pelo usuário. Para tanto, alguns autores propõem classificações buscando auxiliar projetistas a enquadrarem suas aplicações a alguma das técnicas.

Por exemplo, Shneiderman *et al.* [167] propõem uma classificação por tipo de dados e por tarefas <sup>3</sup>:

- **Tipos de dados** – os dados podem ser classificados como temporais, árvores, redes, unidimensionais, bidimensionais, tridimensionais e multi-dimensionais;
- **Tarefas** – elas são as ações dos usuários com as operações de interações de visão geral, visão detalhada (informações complementares exibidas quando um item da visualização é selecionado), ampliação e redução, filtragem, reconhecimento de relacionamentos (associação entre itens da visualização), manutenção do histórico de ações e extração de informações variadas (permite explorar os dados ou o subconjunto).

Wehrend *et al.* [201] também apresentam um outro exemplo de classificação para VI. Porém, ela está relacionada às ações de análise de dados. A seguir, são apresentadas as possíveis ações:

---

<sup>3</sup>As tarefas de usuários representam um número de ações de alto nível que podem se realizar em uma visualização a fim de manipular informações, objetos e símbolos.

- **localizar** – achar um item de interesse do usuário, podendo informar questões como posição ou situação;
- **identificar** – possui as mesmas características do item "localizar", mas deve-se ter uma descrição do item que não se conhece;
- **distinguir** – possibilita diferenciar e verificar itens;
- **categorizar** – classificar por características semelhantes;
- **agrupar** – ação de combinar itens;
- **distribuir** – ato de dividir itens;
- **associar** – estabelecer relação entre os itens;
- **correlacionar** – observar características compartilhadas entre os itens.

Por fim, Freitas *et al.* [66] identificam tarefas básicas no processo de análise exploratória visual:

- **navegação** – proporcionar a navegação entre os objetos do universo proposto;
- **seleção** – permitir a seleção total ou parcial de objetos;
- **consulta** – pesquisar objetos com base em seus atributos;
- **preparação** – inicializar ou modificar parâmetros;
- **processamento** – englobar simulações, cálculos e monitoramento da visualização;
- **anotação** – permitir adicionar um texto a uma representação visual;
- **armazenamento** – indicar quais representações visuais devem ser armazenadas para uma posterior retomada.

Como existe uma diversidade de técnicas de visualização, nem sempre elas se encaixam corretamente nas classificações existentes [167, 66]. Logo, muitas das representações visuais podem ser consideradas híbridas, por adotarem elementos que permitiriam classificá-las como pertencentes parcialmente ou totalmente a várias categorias mencionadas acima.

### 2.2.1 Modelo de Referência

O desenvolvimento de sistemas para Visualização de Informações pode, consequentemente, se tornar bastante complexo em virtude da busca pelo atendimento de alguns critérios. São estes:

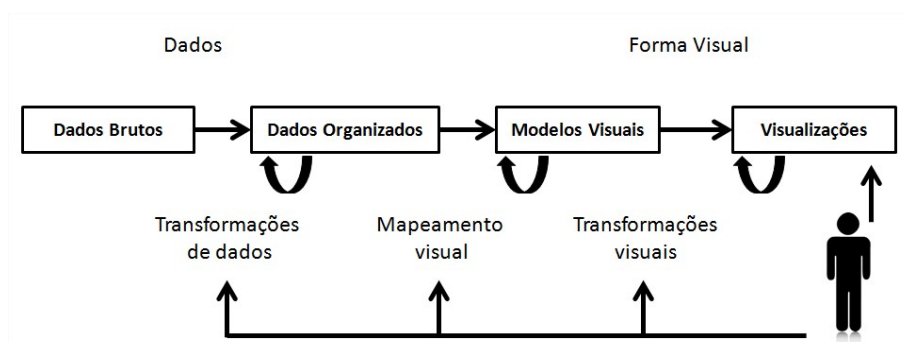
- desenvolver metáforas visuais que possibilitem mapear de forma intuitiva um conjunto de dados de interesse;
- incorporar diferentes tipos de interação a fim de facilitar a manipulação de um conjunto de informações grande e complexo;
- criar algoritmos e interações mais simples.

Esses critérios levam a questões de projeto de interfaces gráficas e avaliação de usabilidade pertinentes ao contexto da interação humano-computador. Outro fator a ser considerado possível, por exemplo, é a complexidade da integração da mesma com sistemas de mineração de dados [64], com o objetivo de auxiliar na identificação de padrões, estruturas e outras informações ocultas no próprio conjunto de dados.

Independentemente destes obstáculos, ao se aplicar técnicas de VI, tem-se inúmeras vantagens resultantes da abstração de dados. Tergan *et al.* [181] e Card *et al.* [35] citam os diferentes pontos pelos quais as visualizações proporcionam uma ampliação cognitiva (maior facilidade na aquisição de conhecimento):

- aumentam os recursos do sistema visual e da memória de trabalho;
- possibilitam a identificação de padrões;
- mitigam a busca por informações por meio de agrupamentos ou relacionamentos visuais, condensando-as, exibindo uma visão geral ou detalhada;
- possibilitam operações de inferência perceptiva;
- ajudam a manipular informações.

Para que esse aumento cognitivo possa ocorrer, é fundamental definir o modo como as estruturas dos dados serão mapeadas em estruturas visuais. Deve-se observar as características dos dados a serem apresentados, das estruturas visuais que podem ser usadas para a representação desses dados, do tipo de interação humano-computador envolvida, bem como respeitar os limites da visão e da cognição humana. Essas características são detalhadas logo a seguir.



**Figura 2.1:** Modelo de referência para a construção de visualizações [35].

Um dos modelos de referência mais conhecidos para construção de VIs é apresentado por Card *et al.* [35] (Figura. 2.1). Esse modelo define um processo em três etapas que saem de dados brutos e progridem até a visualização final. As etapas são definidas a seguir:

1. **Transformações dos dados** – esta primeira etapa visa a organizar de maneira estruturada um conjunto de dados brutos. Tal processo pode contemplar também a

eliminação de dados redundantes ou incompletos, assim como agrupar e filtrar dados e inserir novas informações relevantes (por exemplo, informações estatísticas com média, desvio padrão, etc.). Todos os dados e seus atributos podem ser classificados de acordo com a semântica e com suas dependências de relacionamento a outros dados [173, 35, 200]. Geralmente, o resultado desta etapa é um conjunto de dados organizados em formato de tabelas e com seus atributos classificados nas seguintes categorias:

- **nominais (ou categóricos)** – conjunto de elementos sem ordem específica. Ex. Márcia, José;
- **ordinais** – conjunto de elementos que apresentam essencialmente uma relação de ordem entre si, como, por exemplo, uma listagem de datas históricas (temporal) e dias da semana (quinta, sexta,...);e
- **quantitativos (ou numéricos)** – conjunto de elementos numéricos, passíveis de operações aritméticas sobre eles. Exemplos são: distância entre bairros (espacial), altura e peso de pessoas, etc.

2. **Mapeamento visual** – esta etapa envolve a definição de uma estrutura que evidencie de modo visual os dados nas tabelas. A estrutura visual pode ser dividida em três partes:

- **substrato visual** – é o espaço para a visualização, geralmente representado por eixos, tais como eixos X, Y e Z em um espaço cartesiano.
- **marcas visuais** – são objetos gráficos para a representação dos dados, tais como pontos, linhas e outras formas geométricas.
- **propriedades gráficas das marcas** – são os atributos visuais das marcas, como posicionamento, dimensão, quantidade, ângulo, sentido, coloração, textura e forma, dentre outros.

Pode-se dizer que o mapeamento visual é composto pela associação dos itens de dados a marcas visuais em um substrato visual, bem como dos atributos dos dados às propriedades das marcas.

3. **Transformações visuais** – nesta etapa, é possível modificar e ampliar as estruturas visuais de forma interativa por meio de operações como:

- **controles de ponto de vista** – ampliar, rotacionar, reduzir e deslocar a imagem, com o objetivo de apresentar diferentes visões/perspectivas;
- **distorções da imagem** – criar ampliações de uma região que é alvo do processo de navegação e de exploração.

É importante ressaltar que esse modelo prevê a interação do usuário com todas as etapas de modo a ajustá-las à visualização e assim explorar e entender o conjunto de dados de diferentes perspectivas.

## 2.2.2 Visualizações Efetivas

Nem sempre uma representação visual é adequada para o usuário. De acordo com Mackinlay *et al.* [128], dois aspectos podem ser utilizados para avaliar visualizações e assim dar indícios sobre o seu sucesso: efetividade e expressividade. Uma visualização só é considerada *expressiva* quando é capaz de exibir todos os dados de interesse do usuário sem mostrar dados desnecessários. Por outro lado, a efetividade está ligada à clareza de se entender a apresentação dos dados. Para isso, a visualização deve ser de rápida percepção e proporcionar uma menor taxa de erros na sua interpretação.

Certos problemas podem comprometer a efetividade. Entre eles, destacam-se:

- Composição visual com dados insuficientes ou desnecessários;
- Sobreposição de dados e utilização de escalas de valores diferentes. Isso implica em maior dificuldade na comparação dos dados; e
- Mapeamento dos dados para atributos visuais de forma inadequada.

Por outro lado, algumas regras podem ajudar a aumentar a expressividade e a efetividade das visualizações:

- Utilizar um modelo de referência no desenvolvimento de visualizações [35]. Os modelos de referência auxiliam na decomposição do processo de construção de visualizações em etapas mais fáceis de projetar e gerenciar;
- Eliminar do mapeamento visual marcas, textos e atributos visuais não importantes. Uma boa prática de quantificação de elementos em uma visualização é observar quais questões ela deve responder. Caso seja necessário, deve-se particionar ou utilizar técnicas diferentes para apresentar tais dados;
- Escolher preferencialmente a visualização mais simples para responder um problema.
- Aumentar a quantidade de dados em um espaço disponível. Tal disposição pode auxiliar a compreender melhor o problema como um todo, mas deve-se ter cuidado com uma possível sobrecarga na visualização;
- Utilizar-se de resultados já conhecidos sobre a escolha de marcas visuais e atributos a fim de facilitar na percepção de padrões existentes nos dados. Mackinlay *et al.* [128] sugerem uma sequência de prioridades para a associação entre atributos de dados e atributos visuais, a qual é apresentada no quadro 2.3 a seguir.
- Disponibilizar diferentes formas de interação com a visualização;
- Observar a limitação do sistema visual humano. Logo, deve-se preocupar com transições gradativas a fim de preservar a memória que o usuário possui da imagem. Caso ocorra uma mudança muito rápida ou muito lenta, há uma alta probabilidade do usuário se perder na visualização ou não perceber a mudança.

**Tabela 2.3:** *Sequência de prioridades entre atributos de dados e atributos visuais.*

Percepção	Dados Quantitativos	Dados Ordinais	Dados Normais
Maior	Posição Comprimento Ângulo Inclinação Área Volume Densidade Saturação de cor Croma de cor Textura Conexão Envolvimento	Posição Densidade Saturação de cor Croma de cor Textura Conexão Envolvimento Comprimento Ângulo Inclinação Área Volume	Posição Croma de Cor Textura Conexão Envolvimento Densidade Saturação de cor Forma Comprimento Ângulo Inclinação Área Volume
Menor	Forma	Forma	Forma

### 2.2.3 Técnicas de Visualização

Existe uma gama de técnicas de Visualização de Informações, cada uma com suas próprias características e aplicações. Alguns exemplos simples dessas técnicas são os famosos gráficos de linhas, barra, pizza e mapas geográficos. Há também técnicas que adotam a manipulação de atributos visuais de ícones para transmitir informações. Geralmente, esses ícones são chamados de glifos<sup>4</sup>.

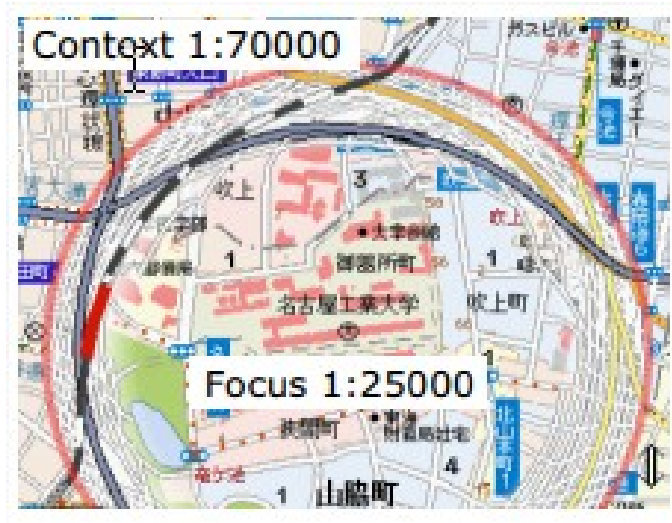
As técnicas de VI podem ainda abordar relacionamentos e estruturas hierárquicas, por meio de uma apresentação de grafos. Isto é passível de aplicação em diversas atividades como, por exemplo, na navegação em um sistema de arquivos de computadores e de páginas na *Internet* e no funcionamento de redes sociais [209, 57, 35, 173].

A seguir, são descritas algumas das técnicas principais de VI que foram empregadas no decorrer deste trabalho.

A expressão "Foco e Contexto" define uma categoria de técnicas de Visualização de Informações que oferece uma visão geral dos dados, ao mesmo tempo em que possibilita destaques em áreas de interesse (foco) por intermédio de distorções da imagem. Como exemplo dessa categoria, pode-se citar a técnica *Fisheye* (Figura 2.2). Ela é uma proposta de Furnas *et al.* [70] e através dela tem-se a atuação de uma lente de aumento teórica ou visual sobre as informações (documentos, figuras, gráficos, etc.). Nesta proposta, a área central ampliada retém a informação em foco (destaque). O restante das informações (o contexto) é mostrado nos lados da região central. Possivelmente, com

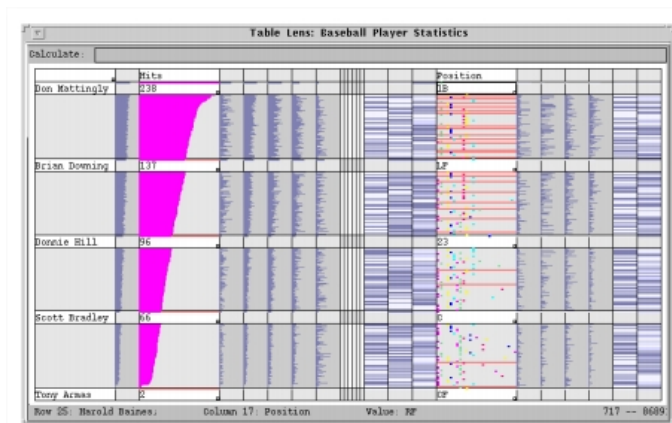
<sup>4</sup>Objeto geométrico que possui como objetivo representar uma entidade ou elemento, cuja forma e atributos visuais dependem de valores dos dados. Um exemplo clássico é o das faces de Chernoff [46].

um certo nível de compressão da imagem a fim de permitir a orientação do usuário na exploração dos dados.

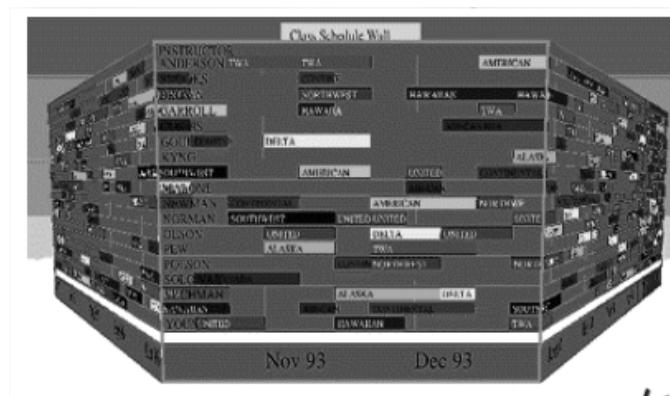


**Figura 2.2:** Técnica olho de peixe sobre mapas [182].

Variações deste conceito podem ser observadas nos conceitos *Document Lens* [153], *Table Lens* [142, 95] (Figura 2.3), *Flip Zooming* [89, 23, 22] e, em particular, no *Perspective Wall* [128]. Este último utiliza paredes em perspectiva como metáfora de *zoom*, buscando evidenciar alguns dados por meio de uma parede principal projetada à frente. As outras paredes, representando o contexto, são apresentadas nas laterais com uma resolução menor. Esta distorção permite gerenciar de forma eficiente a quantidade de informações exibidas juntamente com a possibilidade de realizar uma transição suave dos dados em foco. O *Perspective Wall* está ilustrado na Figura 2.4.



**Figura 2.3:** Técnica Table lens [147]



**Figura 2.4:** Técnica *Perspective Wall* [169]

Uma abordagem semelhante ao Foco e Contexto, mas que não emprega distorções da imagem, é a técnica *Overview+Detail*. Ela apresenta uma visão geral (*overview*) das informações em um formato reduzido, em alguma posição da tela, enquanto uma parte interessante das informações é representada de modo ampliado, ocupando a região principal da tela. Ambas as visualizações trabalham de forma sincronizada. Alguns exemplos desta técnica são a interface apresentada no Google Maps<sup>5</sup> e as diversas ferramentas de apresentação de *slides* ou programas de edição de imagens.

Quando as informações podem ser descritas por meio de entidades e de relações entre as mesmas, é comum o uso de uma modelagem em grafos. Eles possuem uma estrutura simples, composta por um conjunto de vértices e um conjunto de arestas. Os vértices (também chamados de nós) frequentemente representam objetos concretos ou abstratos do cotidiano, enquanto que as arestas representam um relacionamento entre os nós. A modelagem e a visualização de grafos está presente nas mais diversas aplicações e envolve áreas de pesquisa bem consolidadas, como a de teoria de grafos e a de desenho de grafos.

Criados nas décadas de 80 e 90 a partir de algumas abordagens clássicas de desenho de grafos, várias técnicas mais avançadas de visualização de grafos foram desenvolvidas. Um exemplo disso, é a *Hyperbolic Tree* [206, 111, 106], ilustrada na Figura 2.5. Ela consiste de um *layout* radial distribuído em um plano hiperbólico e posteriormente convertido para um disco 2D. Essa técnica oferece aspectos de construção com efeitos semelhantes ao *Fisheye* [70] associado a um mecanismo de navegação para um nó relevante. O nó relevante é destacado no centro da visualização e o contexto permanece visível através da exibição do restante do diagrama com nós suprimidos/reduzidos.

<sup>5</sup><https://www.google.com.br/maps>

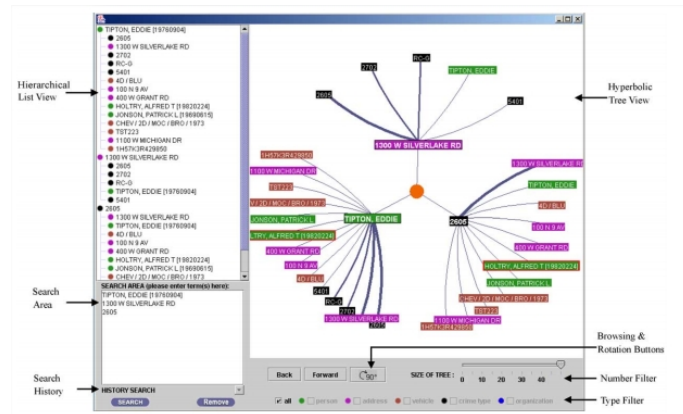


Figura 2.5: Técnica Hyperbolic Tree [206]

Representações hierárquicas podem realizar sucessivas subdivisões de um espaço. Esse é o caso da técnica *TreeMaps* [170, 96, 85, 168] (Figura 3.16). Cada subespaço (célula) do *Treemap* retrata um objeto, e é subdividido com base nos sub-objetos que o compõem. Algumas variações dessa representação são encontradas em interfaces como *Sunburst* [174], *Information Slices* [10] e *Cushion TreeMaps* [193].



Figura 2.6: Técnica TreeMap [170]

As representações também podem estar ligadas ao número de dimensões de uma visualização, por exemplo, quando os dados contêm  $n$  dimensões com ( $n > 3$ ), pode-se adotar uma das seguintes abordagens: (1) associar apenas dois atributos dos dados às coordenadas do substrato espacial (por exemplo, coordenadas  $x$  e  $y$ ) e ajustar o restante dos atributos a outras características como cor e tamanho das marcas visuais. (2) projetar as  $n$ -dimensões em um plano cartesiano, ou (3) adotar outra representação que permita a visualização de múltiplos atributos em uma estrutura.

Uma das técnicas que se encaixa na terceira abordagem, descrita acima, é chamada de Coordenadas Paralelas. Ela representa os atributos (dimensões dos dados) através de linhas verticais com espaçamentos regulares (iguais). Cada linha vertical indica um atributo diferente dos dados, com uma escala de valores mínimos e máximos definidos de acordo com o conjunto de dados em exibição.

Já os dados em si são representados por linhas horizontais. Tais dados são distribuídos nos diferentes atributos (dimensões), de acordo com suas características (numérica, textual, etc.) e são posicionados conforme a escala mínima e máxima de cada dimensão.

É importante notar que, apesar de existirem inúmeras técnicas de visualização [38, 48, 72] e uma contínua preocupação com as características de projeto da área de interação homem-computador (IHC), questões como excesso de dados e atributos visuais diferentes, e oclusão de objetos podem acabar dificultando a interpretação das informações pelo usuário.

A desordem visual é consequência de um impasse da interpretação (pelo usuário) de elementos presentes na visualização, resultando em uma sobrecarga da cognição. Desorientações visuais ocorrem quando há uma troca de pontos de vista e retorno a situações anteriores. Nesse caso, técnicas como foco e contexto [56] podem amenizar a desorientação permitindo que as informações fiquem sempre visíveis, mesmo que em uma versão reduzida.

Por outro lado, tem-se a oclusão de objetos que pode acontecer no momento em que ocorre uma grande concentração de informações sobrepostas. Para atenuar esses problemas, algumas técnicas utilizam atributos da natureza, tais como transparência e sombreamento. Estas medidas proporcionam ao usuário uma interpretação mais clara e precisa da localização dos objetos. Por exemplo, pode-se citar o uso de recursos básicos de manipulação como: translação, mudanças de escala, rotação, etc.

Avaliar as diferentes técnicas de visualização é fundamental para comprovar sua eficiência no auxílio às tarefas de usuários e da capacidade de exibição de informações relevantes. A escolha equivocada de uma técnica pode influenciar negativamente no nível da qualidade da compreensão e interpretação do conjunto de domínio [200, 136]. Por este motivo, deve-se despender tempo com a análise de diversas técnicas a fim de realizar uma escolha mais adequada.

#### 2.2.4 Avaliação de Visualização de Informações

Por volta do início da década de 90 até o fim do ano 2000, as pesquisas relacionadas a VI estavam centradas na criação e na melhoria de técnicas de visualização (algoritmos e operações) [201, 211, 135]. Porém, somente após o fim desse período que houve a introdução de pesquisas relacionadas a avaliação de técnicas de VI [126].

De acordo com Luzzardi *et al.* [126], é possível categorizar a avaliação de VI em três grupos. São eles:

- **avaliação empírica de uma técnica de visualização** – basicamente, é composta por ensaios de interação e contem tarefas a serem realizadas. A execução de tais

tarefas serve como um instrumento de medição da visualização, por meio delas, por exemplo, pode-se avaliar: eficácia, desempenho, etc. Nesta categoria, avalia-se a quantidade de tempo gasto na execução das tarefas, bem como a quantidade de erros. Apesar de serem empíricas há a possibilidade de se incluir métodos mais formais de avaliação, como o uso de testes estatísticos.

- **comparação entre diferentes técnicas de visualização** – tal categoria, visa comparar o emprego de diferentes técnicas de visualização, podendo elas apresentarem os mesmos aspectos visuais ou de tipos de dados. Para isso, a comparação, por exemplo, é realizada por meio da análise de: tempo gasto para realizar uma tarefa, frequência de erros, tempo de resposta, satisfação do usuário, etc.
- **avaliação baseada em critérios específicos para técnicas de visualização** – os trabalhos contidos nesta categoria apresentam/abordam critérios específicos avaliação de técnicas de visualização. Como por exemplo: densidade dos dados, complexidade cognitiva, oclusão de objetos, classificação de tarefas visuais, dentre outros.

Por outro lado, Valiati *et al.* [190] apresentam outra categorização para avaliação de técnicas de VI, podendo elas serem divididas em:

- **trabalhos com critérios quantitativos ou subjetivos** – envolvem a avaliação de critérios como, tipo e quantidade de dados, interações humanas utilizadas, tarefas suportadas e características da visualização (por exemplo, sobreposição de itens), etc.
- **trabalhos empregando métodos de IHC** – as avaliações envolvem a aplicação de técnicas como: GOMS, ensaios de interação, heurísticas, *checklists* e estudos de casos longitudinais (técnicas descritas na seção 2.3).

## 2.3 Avaliação de Usabilidade

Esta seção tem como objetivo apresentar as características e os conceitos básicos de avaliação de usabilidade, bem como mencionar suas vantagens e desvantagens.

Nielsen *et al.* [127] definem usabilidade como a facilidade de interação com uma interface a partir do uso adequado de funcionalidades do sistema. Para isso, deve-se observar as seguintes características: eficiência no uso, facilidade de aprendizado, facilidade na memorização e a redução da taxa de erros.

A usabilidade de interfaces também possui uma ligação direta com a Engenharia de Software. Por exemplo, pode-se citar alguns trabalhos que relacionam os requisitos de sistemas a tarefas de usuários [52, 141, 18]. Um software efetivo deve considerar as necessidades e as expectativas dos usuários, incluindo o uso de suas interfaces [146].

Este mesmo argumento é compartilhado por Scholtz *et al.* [160, 161], no qual ressaltam a importância da usabilidade em um sistema. Logo, a interface deve fornecer subsídios necessários para que o usuário tenha o suporte adequado e efetivo na realização da análise de dados.

A usabilidade está associada à qualidade de *software*, conforme expressam as normas *ISO/IEC 9126* (apreensibilidade, inteligibilidade, operacionalidade, atratividade e conformidade), *ISO/IEC 9241* [52] (eficácia, eficiência e agradabilidade), *ISO/IEC 12119*, *ISO/IEC 14598* e o modelo definido por McCall *et al.* [84].

Logo, pode-se considerar que a usabilidade está diretamente relacionada à ausência de qualquer obstáculo que prejudique o usuário ao tentar completar suas tarefas de forma eficiente e efetiva [102, 149]. De acordo com Hix *et al.* [87, 88], uma interface pode conter obstáculos na usabilidade quando:

- O projetista carece de conhecimentos técnicos em IHC e desconhece as tarefas realizadas pelos usuários;
- A interface é desenvolvida focando-se apenas na perspectiva de atributos funcionais. Além de ocorrer ausência de elicitação e especificação de requisitos de usabilidade no desenvolvimento e falta de processos interativos e incrementais na construção;
- A interface visual não é avaliada de forma eficaz;
- As boas práticas de Engenharia de *Software* e de IHC não são seguidas.

### 2.3.1 Técnicas de Avaliação de Usabilidade

A avaliação de usabilidade segundo Cybis *et al.* [52] tem como objetivo os seguintes pontos:

- Validar a eficácia da interface com o usuário de acordo com a execução das ações pelos usuários;
- Verificar a eficiência da interação em relação aos recursos disponibilizados;
- Considerar a satisfação dos usuários envolvidos no uso da interface.

Há inúmeros modos de se avaliar o uso de uma interface; por exemplo: pela participação de usuários, por estudo de campo e por inspeção. A avaliação com a participação de usuários pode abordar o recolhimento de suas opiniões em relação ao grau de satisfação, bem como analisar o seu comportamento. O estudo de campo visa observar a utilização da interface por um período de tempo no ambiente real de atividade do usuário, semelhante à etnografia. Por fim, a inspeção está focada no grau de conhecimento do avaliador, o qual deve seguir um conjunto de critérios previamente estabelecidos [165]. A seguir, são descritas algumas das técnicas utilizadas no presente trabalho.

## Ensaio de Interação

O ensaio de interação é uma avaliação com a presença de usuários simbolizando o público alvo. Ela é classificada como altamente relevante, já que leva em conta o contato real do usuário com a interface. Pode-se, por meio desta técnica, obter relatos de problemas, bem como detectar defeitos de difícil localização. Baecker *et al.* [14] e Dix *et al.* [55] apontam que, com o uso do ensaio de interação, o usuário é capaz de encontrar desde boa parte de problemas com gravidade simples até alguns problemas sérios.

A técnica exige um local controlado para sua realização, podendo este ser um laboratório ou em campo, tudo de acordo com o contexto do teste (também chamado de sessão) [55]. Existem vários processos ou termos para a realização de ensaios de interação e basicamente utilizam-se os seguintes conceitos:

- O ato de reunir usuários e projetistas de interface é conhecido como "sessão";
- O ensaio de interação pode envolver um ou mais avaliadores observando direta ou indiretamente os participantes na utilização da interface;
- Os avaliadores podem também utilizar recursos extras na captura de informações, como: captura de teclas pressionadas, regiões de maior interação com o mouse, gravações de áudio/vídeo, dentre outros; e
- Geralmente, os projetistas criam tarefas (fáceis ou complexas) que envolvam a interface para que os usuários possam interagir.

Para a construção de um bom ensaio de interação, deve-se preocupar com os seguintes procedimentos:

- Ser capaz de escolher os usuários (seguindo algum perfil) para o teste e, ao menos, um especialista em interfaces para obter uma melhor compreensão e interpretação das ações dos usuários;
- Preparar com antecedência as questões que envolvam o problema a ser avaliado.
- Preparar o ambiente de avaliação (instalação de *software* para garantir a homogeneidade, etc.) e o material a ser entregue ou disponibilizado *on-line* aos usuários. Deve-se treinar previamente os usuários no uso da interface, caso seja necessário;
- Pode ser necessário também instalar ou preparar o ambiente para registrar as informações (câmeras, *software*, etc.); e
- É preciso saber o que fazer com os dados coletados.

As questões propostas (aplicadas na avaliação) podem explorar informações objetivas como: taxas de erro, médias de tempo e quantidade de tarefas concluídas com sucesso ou não respondidas. A opinião dos usuários também pode ser considerada, por exemplo: o grau de satisfação de um item do sistema, usando uma escala Linkert [9], ou o nível de aceitação ou rejeição de um recurso [157].

Esta técnica possui um custo considerável com a preparação do ambiente. Este custo inclui a agregação de um número considerável de usuários em um mesmo local e tempo, impressão de materiais, gestão da avaliação durante sua realização e, posteriormente, a análise dos dados coletados. Apesar disso, ela ainda apresenta as seguintes vantagens:

- permite observar a conduta do usuário ao se interagir com a interface;
- demanda um número reduzido de especialistas em interface;
- possibilita a observação das hipóteses (com base nas tarefas criadas) previamente elaboradas (rejeitadas/confirmadas).

### Avaliação Heurística

A avaliação heurística, criada por Nielsen *et al.* [137], pertence aos métodos de inspeção. Ela permite que o avaliador analise as soluções de IHC com o objetivo de prever decisões erradas sobre o seu *design*. Nela, os avaliadores se colocam no lugar de usuários em diferentes níveis de perfil.

Este é o método mais utilizado e conhecido no universo de avaliação de interfaces [94, 154]. Basicamente, ele utiliza um conjunto de regras de boas práticas desejáveis como guia. Elas norteiam os avaliadores (especialistas de interfaces) enquanto estes interagem com a interface em busca de defeitos e problemas. A avaliação heurística é considerada uma das técnicas de inspeção mais baratas e fáceis de se implementar. Sugere-se em média de 3 a 5 avaliadores por apresentar uma melhor relação entre custo e benefício [136].

A abordagem de avaliação heurística de Nielsen *et al.* [127] resultou da análise de mais de 240 problemas de usabilidade encontrados por vários especialistas. Um resumo dessas heurísticas é apresentado logo abaixo:

- **Visibilidade do estado do sistema:** o usuário deve sempre ser informado do estado atual do *software*, em um período de resposta hábil;
- **Correspondência entre o sistema e o mundo real:** quanto mais familiar for a interface para o usuário, mais fácil será seu entendimento e utilização. Para isso, deve-se observar exemplos do mundo real, como a natureza ou atividades comuns. As ações e representações também devem seguir uma lógica natural;
- **Controle e liberdade do usuário:** a interface deve garantir meios pelos quais os usuários possam sair de estados indesejáveis gerados, por exemplo, a partir da execução de ações erradas ou por engano. A interface deve permitir que se desfaçam ou refaçam determinadas ações;
- **Consistência e padrões:** ao longo de toda a interface, deve-se seguir os mesmos padrões visuais de significado para imagens, botões, ações, etc.;

- **Prevenção de erros:** deve-se atentar ao tratamento de erros de forma antecipada. Por exemplo, é importante preocupar-se com o tratamento das entradas de dados na interface para que não ocorram problemas posteriormente ao longo do funcionamento do sistema;
- **Reconhecer ao invés de memorizar:** não se deve exigir que um usuário se lembre para que serve um elemento que não é reconhecido instantaneamente. Além disso, não se deve exigir que ele memorize as informações em caso de mudanças na interface;
- **Flexibilidade e eficiência de uso:** uma interface deve permitir que participantes experientes maximizem suas ações por meio de atalhos ou tarefas frequentes;
- **Projeto estético e design mínimo:** deve-se apresentar somente informações necessárias e relevantes em qualquer meio de informação;
- **Prevenção de erros:** deve-se ter um bom projeto para evitar que problemas aconteçam;
- **Auxiliar os usuários a reconhecer, diagnosticar e recuperar-se de erros:** é recomendado que as mensagens de erro estejam em uma linguagem simples, apontando as possíveis causas do erro e, quando possível, com sugestões de solução para o problema detectado;
- **Ajuda e documentação:** toda e qualquer interface deve fornecer, de forma fácil e objetiva, informações sobre as principais funcionalidades de interação.

Há outros princípios e heurísticas que também podem ser utilizados como diretrizes, tais como os princípios definidos pelo Xerox PARC [133] ou os critérios ergonômicos propostos por Bastien e Scapin [19].

Os princípios e heurísticas listados anteriormente também podem ser estendidas. Por exemplo, há inúmeras diretrizes para determinados tipos de interação (*Web*, manipulação direta, interfaces via voz) e os diversos domínios de aplicação (comércio eletrônico, bibliotecas, educação à distância, etc.).

Resumindo, os avaliadores utilizam essas diretrizes para inspecionar a interface. Em seguida, os problemas são registrados e ponderados de acordo com sua gravidade [127].

O registro da ocorrência de defeitos pode ser feito manualmente pelo próprio avaliador, mas também pode ser realizado por um observador ou qualquer meio de registro que possibilite uma análise posterior (câmera, áudio, tela, etc.). A gravidade de cada item (listados anteriormente) infringido foi definida por Nielsen [127] conforme a Tabela 2.4:

**Tabela 2.4:** Escala de severidades aplicada na avaliação heurística. [127]

SEVERIDADE	SIGNIFICADO
0	Não é considerado totalmente um problema de usabilidade.
1	Problema apenas estético. Não necessita ser resolvido, a menos que haja tempo extra disponível no projeto.
2	Problema menor de usabilidade. A resolução desse problema deverá ter baixa prioridade.
3	Problema maior de usabilidade. É importante resolvê-lo. Para isto, deve ser dada alta prioridade ao mesmo.
4	Catástrofe de usabilidade. É obrigatório resolver o problema antes do produto ser divulgado.

Espera-se, no final da avaliação (sessão) com esse método, ter uma lista de problemas encontrados com suas respectivas gravidades, juntamente com a descrição das heurísticas violadas e com algum comentário, além do número de ocorrência deste erro [165]. Preece *et al.* [145] propõem que a avaliação heurística seja realizada em três estágios:

- **Sessão preliminar:** informar aos avaliadores quais atividades estes devem fazer. Este primeiro momento assegura uma padronização de orientação a todos os avaliadores;
- **Sessão de avaliação:** inspecionar a interface utilizando como base as informações previamente definidas, juntamente com a heurística estabelecida;
- **Sessão de resultados:** todos os avaliadores discutem a respeito da interface e ponderam os problemas enfrentados juntamente com suas possíveis soluções.

Para Nielsen *et al.* [127], a avaliação heurística envolve as seguintes atividades:

- **Preparação:** estudar as regras de negócios e os tipos de usuários, assim como conhecer as partes da interface que serão avaliadas;
- **Coleta de dados:** registrar os dados de cada indivíduo no momento da inspeção.
- **Interpretação:** percorrer a interface a fim de verificar as violações da heurística e listar os problemas encontrados, exigindo os seguintes dados – local onde ocorre o problema, a descrição, diretriz(es) violada(s), gravidade do problema e recomendações de solução.
- **Consolidação dos resultados:** reavaliar a lista de problemas com o objetivo de validar sua relevância e gravidade.
- **Relato dos resultados:** gerar um conjunto de relatórios.

Logo, apesar de ser uma técnica barata e rápida de se aplicar, ela está diretamente relacionada à experiência dos avaliadores e ao processo que eles utilizaram. De acordo

com Pollier *et al.* [144, 143], os resultados das heurísticas dependem do conhecimento e experiência de cada avaliador e da forma de aplicação do teste. Ou seja, o avaliador é a chave para garantir o total sucesso ou insucesso do método. Aconselha-se também o uso de outros profissionais não especialistas em interface para compor o time de avaliadores, como usuários finais avançados, desenvolvedores de software ou usuários com conhecimentos aprofundados sobre um determinado domínio [127, 204, 189].

### **Conformidade com Recomendações / Checklists**

Neste método, os avaliadores seguem um conjunto de regras (*guidelines*) em sessões particulares para inspecionar uma determinada interface. Essas diretrizes são criadas por meio de um texto composto por questões afirmativas (*guidelines*) ou interrogativas (*checklist*).

A conformidade com recomendações é uma técnica híbrida, caracterizada pela mesclagem de heurística e determinismo. A heurística está ligada às questões oriundas de experiências e conhecimento, enquanto que o determinismo está vinculado aos resultados das verificações.

Essa técnica mostra um resultado satisfatório para questões gerais, pois auxilia quem está avaliando a ter uma visão da interface [94]. Porém, outros autores [127, 94] afirmam que a técnica não deve ser muito extensa, por necessitar de uma grande quantidade de tempo na avaliação. Ela é considerada a técnica que apresenta um menor custo de aplicação [94], pois apresenta as seguintes características:

- não há a necessidade de nenhum avaliador especialista em IHC;
- não se envolve com os usuários reais;

Entretanto, ela é julgada ineficaz na identificação de problemas graves. Por isso, deve-se introduzir especialistas em interface ou aprofundar-se ainda mais nas construções de guias. [94]

Logo, a conformidade com recomendações depende mais da qualidade do *checklist* ou das *guidelines* do que de seus próprios avaliadores para fornecerem os resultados. Ao se construir *checklists* bem abrangentes, os resultados são homogêneos, pois os avaliadores utilizam uma diretriz única. Deve-se atentar para a subjetividade e a exigência técnica na formulação das questões. Uma má gestão das questões pode influenciar negativamente a inspeção [52].

## Percurso Cognitivo

A técnica do percurso cognitivo usa a exploração da interface por meio da teoria cognitiva<sup>6</sup>. Seu funcionamento se dá através da simulação passo-a-passo de tarefas que serão realizadas pelo usuário, bem como da participação dos envolvidos no projeto para responder questões de cada item simulado [24]. A técnica pode oferecer uma visão detalhada da interação feita pelo usuário a partir de tarefas específicas. Portanto, seu principal intuito é avaliar o nível de facilidade de se aprender, por meio da análise da interface [203, 165].

O percurso cognitivo pode ser dividido [203] em duas fases:

- **Preparação** – cada avaliador recebe uma série de orientações como detalhes da interface e dos usuários, e tarefas a serem realizadas juntamente com as sequências de ações, a fim de realizar com sucesso as especificações do desenvolvedor.
- **Análise** – de acordo com o perfil dos usuários, o avaliador irá percorrer uma sequência de ações e concluir se o usuário completará com êxito seu objetivo. Os avaliadores podem também propor histórias de fracasso [6] de acordo com falhas e melhorias identificadas por um projetista/usuário. Eles também podem propor histórias de sucesso [203], representando o desfecho correto de todos os requisitos analisados.

O time do projeto cria suas histórias conforme uma série de perguntas [203], como as seguintes:

- O usuário alcançará o resultado correto?
- O usuário conseguirá deduzir que a ação certa está acessível?
- Ocorrerá a associação da ação e o efeito desejado pelo usuário?
- Caso a ação correta seja feita, o usuário entenderá que o processo está chegando ao fim?

Ao longo da avaliação, é essencial o registro de todos os dados ocorridos (histórias, sugestões, notas e etc.) por meio de câmeras, formulários, gravação de telas ou outros meios. A inspeção pode ser tanto em grupo como individual [203, 165]

O grande problema enfrentado no percurso cognitivo é identificar quais tarefas são representativas, pois elas devem ser obtidas a partir do estudo das necessidades e dos requisitos [203].

A técnica pode ser aplicada ao longo do ciclo de vida do projeto, permitindo assim identificar requisitos incompletos ou insuficientes para a realização dos passos. Ou seja, há sempre a comparação das intenções do projetista/usuário com a realidade.

---

<sup>6</sup>É o desenvolvimento da inteligência dos indivíduos à medida que amadurecem, por meio de etapas.

Entretanto, há um grande consumo de tempo na aplicação desta técnica. Os problemas serão encontrados com base no grupo de cenários desenvolvidos. É essencial que o avaliador domine esta técnica para obter melhores resultados [203]

### Prototipação em Papel

A técnica de prototipação em papel [171] examina a usabilidade de uma interface com potenciais usuários por meio do *design* representado em papel. Este método é rápido e barato, pois permite identificar problemas na usabilidade antes mesmo da etapa do desenvolvimento. O método não cobre todos os detalhes da interface, mas auxilia o especialista a avaliar facilmente soluções parciais.

As atividades envolvidas na prototipação em papel são detalhadas abaixo:

- **Preparação** – definir quais tarefas os participantes irão executar, tais como: criar protótipos em papel da interface, definir e treinar os usuários e executar o teste.
- **Interpretação** – os usuários devem interagir com os protótipos em papel, enquanto o avaliador identifica os problemas. Eles refinam os protótipos para resolver problemas de menor complexidade.
- **Consolidação dos resultados** – definir um grau de prioridade para os problemas não resolvidos e sugerir correções.
- **Relato dos resultados** – gerar uma lista de problemas encontrados juntamente com suas sugestões de correção.

Na preparação da sessão, o avaliador elabora a representação das telas no papel, em geral isto é feito a mão livre, com o objetivo de representar os elementos principais da interface. Além das telas, é possível criar itens que se modificam conforme a ação, por exemplo: menus, resultados de buscas, diálogos, etc.

A coleta de dados, na prototipação, deve ser feita preferencialmente por dois avaliadores: um para observar a interação do usuário, e outro que assume o papel de "computador" e é responsável por simular o sistema. Nesta fase, o avaliador observará o usuário na navegação e interação pelas telas (por meio de toques ou por voz). Pequenas mudanças podem ser realizadas ao longo do teste, como por exemplo, incluir botões. Contudo, deve-se observar partes da interface que funcionaram bem ou mal, quais tarefas obtiveram êxito, os erros cometidos e os comentários feitos pelos usuários.

Após o uso da interface, os avaliadores reúnem-se para executar a atividade de interpretação. Neste momento, é preciso avaliar as anotações, os vídeos e os áudios a fim de identificar os problemas encontrados. Ao final, tem-se uma lista de defeitos da interface que devem ser corrigidos, além das sugestões de melhorias.

Caso o problema possua um grau maior de complexidade, deve-se definir uma priorização (também com base na sua frequência de erro) a fim de resolvê-lo.

## Discussões

Quando o assunto é definir qual a melhor técnica de avaliação a ser seguida, é importante atentar para os seguintes aspectos:

- fatores como tempo e recursos físicos e financeiros devem ser observados, pois são limitadores;
- a escolha da técnica deve ser baseada nas características da interface; e
- o tratamento dos dados deve ser planejado e feito de acordo com a interface.

Por fim, uma técnica isolada não garante sucesso total. Conforme foi explicado anteriormente, algumas técnicas são boas para encontrar problemas gerais de baixa ou de alta gravidade. A combinação destas técnicas pode garantir uma melhor avaliação de usabilidade [52].

## 2.4 Taxonomias de Visualização de Informações

O objetivo desta seção é mostrar um resumo das taxonomias mais conhecidas sobre Visualização de Informações. Tais taxonomias servirão de base para a elaboração de uma proposta voltada para visualizações do tráfego urbano, discutida posteriormente nos próximos capítulos.

O termo taxonomia, em grego, representa o uso de regras para classificar. A classificação visa a obter relações e padrões entre os diferentes tipos de elementos a fim de agrupá-los em um conjunto semelhante. Esta ação permite organizar e identificar os tipos de dados, as técnicas de visualização utilizadas e os tipos de tarefas (conjunto de ações) [175]. De acordo com Tory *et al.* [187], uma taxonomia de visualização pode servir, sobretudo, para dois grandes propósitos: (1) servir como guia de usuários, ou seja, auxiliar usuários fora da área de VI a buscarem ideias e técnicas de visualização; e (2) servir como guia de pesquisadores, auxiliando-os a encontrarem onde a pesquisa se encontra de acordo com um determinado contexto, bem como identificar outros pesquisadores que estão realizando trabalhos similares.

A seguir, serão discutidas algumas das diferentes estratégias para a classificação de Visualização de Informações.

### 2.4.1 Taxonomia de Acordo com o Tipo de Dados e Tarefas

Shneiderman *et al.* [167] descrevem o poder da linguagem visual e seu importante papel frente ao crescimento tecnológico representado por inovações como: o aumento das resoluções de telas, o aumento do poder computacional, o rápido crescimento do número de informações, etc. Os autores comentam sobre a existência de inúmeras

*guidelines* para o *design* de visualizações, mas basicamente todos buscam os seguintes passos: visão geral em primeiro lugar, *zoom* e filtros depois, e por fim vêm os detalhes. O trabalho também apresenta uma classificação das técnicas de VI de acordo com os tipos de dados e de tarefas. Os dados são divididos em:

- **unidimensionais** – tipos de dados lineares como, por exemplo, documentos textuais, listas de nomes, etc.;
- **bidimensionais** – compreendem dados planares ou mapas;
- **tridimensionais** – dados abstratos com três atributos distintos ou objetos do mundo real, tais como moléculas, construções, etc.;
- **temporais** – itens que devem possuir um início e um fim, como o gerenciamento de projetos;
- **multidimensionais** – apresentam múltiplas dimensões (eixos);
- **estruturas em árvore** – demonstram uma coleção de itens que possuem um relacionamento de parentesco uns com os outros, ou seja, definem uma hierarquia;
- **rede** – nem sempre os relacionamentos podem ser capturados por estruturas de árvore, pois os itens podem se conectar com inúmeros outros itens ao mesmo tempo.

Os autores levaram em consideração as ações realizadas pelos usuários no momento da manipulação desses dados. Abaixo, descreve-se cada tarefa identificada:

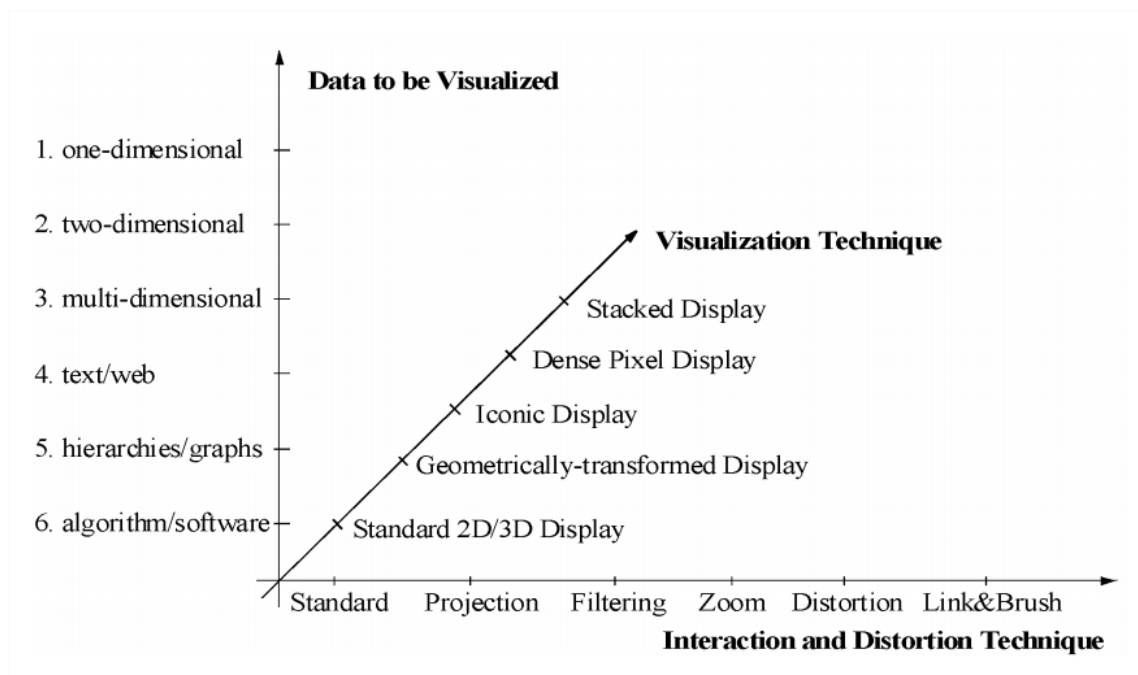
- **visão geral** – permite observar todos os dados;
- **zoom** – facilita a visualização com diferentes níveis de detalhes;
- **filtro** – proporciona a seleção de itens de interesse;
- **detalhe por demanda** – seleciona um item ou grupo e obtém detalhes quando necessário;
- **relacionar** – vê a associação entre os diferentes itens;
- **histórico** – permite o registro e a restauração de ações realizadas pelo usuário;
- **extrair** – retira um subconjunto de informações com base em parâmetros.

## 2.4.2 Classificação das Técnicas de Visualização de Informações

Keim *et al.* [103] definiram, por sua vez, uma classificação para as técnicas de VI. Resumidamente, ela consiste de três eixos, descritos a seguir e ilustrados na Figura 2.7:

- **Dados a serem visualizados** – divididos em 1 dimensão, 2 dimensões, 3 dimensões, texto/hipertexto (são difíceis de modelar numericamente; em sua maioria, tais dados são transformados em vetores a fim de quantificar suas informações), hierarquia e grafos, e algoritmos/*software*.

- **Técnicas de visualização** – visualização 2D/3D, transformação geométrica (multidimensionais), iconográfica (representar dados por meio de desenhos), densidade de *pixel* (representar valores por meio de um *pixel*), empilhamento (representa uma partição de um disco de computador como uma hierarquia, por exemplo: *treemaps*)
- **Interação e técnicas de distorções:** projeção geométrica, filtragem, *zoom*, distorção e *linking and brushing* (permite combinar diferentes técnicas de visualização a fim de reduzir pontos fracos de cada técnica utilizada.)



**Figura 2.7:** Classificação das técnicas de visualização de informações [103]

### 2.4.3 Taxonomia de Tarefas Visuais de Baixo e de Alto Nível

Wehrend *et al.* [201] apresentam uma taxonomia de tarefas de baixo nível e independentes de domínio. A classificação prevê as seguintes ações de usuário:

- **Localizar** – Buscar um objeto que seja previamente já conhecido;
- **Identificar** – Encontrar um objeto. Neste caso, é necessário descrever o objeto, pois não há um conhecimento prévio;
- **Distinguir** – Diferenciar objetos entre si. Por exemplo: a interface pode representar ícones para cada tipo de objeto.
- **Categorizar** – Classificar os diferentes objetos de acordo com suas propriedades em comum;
- **Agrupar** – Reunir/associar objetos de acordo com uma característica.

- **Distribuir** – Dividir objetos em categorias associadas.
- **Ordenar** – Dispor os objetos de acordo com critérios específicos.
- **Comparar dentro de entidades** – Contrastar dados de diferentes objetos.
- **Comparar entre relações** – Comparar objetos e grupos distintos;
- **Associar** – Relacionar os objetos;
- **Correlacionar** – Relacionar os atributos dos objetos, por exemplo, cor, posição e etc.

Um outro exemplo de taxonomia, mas que apresenta um conceito de tarefas visuais, é a proposta de Zhou et al. [211]. A ideia principal é mostrar uma taxonomia bi-nível levando em consideração as intenções dos usuários (alto nível: apontar uma necessidade do usuário como, por exemplo, destacar um objeto) e tarefas visuais (baixo nível: relatar os passos necessários para se atingir o objetivo do usuário por meio de técnicas visuais). As intenções de cada tarefa visual são descritas em duas partes: uma ação (realizações visuais) e um conjunto de instruções para seguir (implicações visuais, que indicam as técnicas visuais). Por exemplo: a tarefa visual *Identify*<?x, ?identifier> pode ser concluída com base em quatro atividades:

- *name* – identificar um objeto usando o nome
- *portray* – identificar um objeto com base em uma imagem
- *individualize* – identificar um objeto utilizando atributos-chave
- *profile* – identificar um objeto de acordo com um perfil.

Logo, a intenção do usuário pode ser descrita por um conjunto de tarefas visuais. Mas tais tarefas visuais são realmente efetivadas com uso de técnicas de visualização. A Figura 2.8 mostra alguns exemplos da taxonomia proposta.

# Relational visual tasks	<b>Correlate</b> <?x1, ..., ?xn> Plot<?x1, ..., ?xn> MarkCompose<?x1, ..., ?xn>	<b>Locate</b> <?x, ?locator> Position<?x, ?locator> Situate<?x, ?locator> Pinpoint<?x, ?locator> Outline<?x, ?locator>	# Direct visual organizing and # encoding tasks
<b>Associate</b> <?x, ?y> Collocate<?x, ?y> Connect<?x, ?y> Unite<?x, ?x-part> Attach<?x, ?x-part>	<b>Distinguish</b> <?x, ?y> MarkDistribute<?x, ?y> Isolate<?x, ?y>	<b>Rank</b> <?x1, ..., ?xn, ?attr> Time<?x1, ..., ?xn, ?t>	<b>Encode</b> <?x> Label<?x> Symbolize<?x> Quantify<?x> Iconify<?x>
<b>Background</b> <?x, ?background> <b>Categorize</b> <?x1, ..., ?xn> MarkDistribute<?x1, ..., ?xn>	<b>Emphasize</b> <?x-part ?x> Focus<?x-part ?x> Isolate<?x-part ?x> Reinforce<?x-part ?x>	<b>Reveal</b> <?x-part ?x> Expose<?x-part ?x> Itemize<?x-part ?x> Specify<?x-part ?x> Separate<?x-part ?x>	Portray<?x> Tabulate<?x> Plot<?x> Structure<?x> Trace<?x> Map<?x>
<b>Cluster</b> <?cluster, ?x1, ..., ?xn> Outline<?cluster> Individualize<?cluster>	<b>Generalize</b> <?x1, ..., ?xn> Merge<?x1, ..., ?xn>	<b>Switch</b> <?x, ?y>	
<b>Compare</b> <?x, ?y> Differentiate<?x, ?y> Intersect<?x, ?y>	<b>Identify</b> <?x, ?identifier> Name<?x, ?name> Portray<?x, ?image> Individualize<?x, ?attr> Profile<?x, ?profile>		

Figura 2.8: Taxonomia de tarefas visuais [211]

Amar et al. [8] afirmam que, apesar da importância, os trabalhos recentes sobre o termo, na sua grande maioria, ainda giram em torno da representação de dados.

Tais representações podem gerar lacunas no apoio à tomada de decisões. Os motivos apresentados são:

- **Affordances<sup>7</sup> limitadas:** as ações oferecidas em sistemas de visualização são, geralmente, equivalentes a simples consultas em banco de dados. Apesar de sua importância, na concepção inicial de análise, uma tomada de decisão necessita de diversos outros recursos.
- **Representações pré-determinadas:** em grande parte, as visualizações não são ágeis. Elas são VIs estáticas e simplistas.
- **Declínio do determinismo na tomada de decisões:** os sistemas não consideram a incerteza dos dados.

Os autores também identificaram lacunas entre a representação e a análise das visualizações. Eles argumentam que grande parte das visualizações são uma espécie de caixa-preta, onde o usuário entra com os dados e aguarda uma saída. Porém, o ideal é inserir mecanismos de mineração de dados que possibilitem uma maior participação do usuário na extração do conhecimento. As lacunas apresentadas estão listadas abaixo e para cada uma delas existem três tarefas que visam a amenizá-las:

- **The rationale gap:** distância entre a identificação de um relacionamento e seu grau de confiança.
  - parametrizar domínio: facilidade de adquirir e transferir conhecimento ou metadados de um conjunto de dados ou domínio;
  - explicação multivariada: permite-se correlacionar múltiplas variáveis e operações matemáticas;
  - confirmar hipóteses: os sistemas devem auxiliar usuários a definir hipóteses, simular prováveis resultados e verificar a veracidade de tais hipóteses.
- **The worldview gap:** relação entre o que é mostrado ao usuário e sua real necessidade.
  - expor incertezas: expor as causas e efeitos de incerteza nas medições dos dados e de suas agregações;
  - concretizar relacionamentos: exibir os elementos que compõem os relacionamentos e os traduzir em resultados palpáveis do mundo real;
  - formular causa e efeito: esclarecer a origem juntamente com suas possíveis causas.

Amar *et al.* [7] também apresentam outra taxonomia, porém esta é baseada em tarefas de baixo nível. De 196 questões formuladas por estudantes da disciplina de VI,

---

<sup>7</sup>é a qualidade de um objeto, ou de um ambiente, que permite que um indivíduo realize uma ação.

foram definidas 10 tarefas. O experimento envolveu ferramentas de manipulação visual como a Eureka, a SeetIT e a Spotfire, entre outras. Abaixo é apresentado este resultado:

- **encontrar o valor:** identificar o item ou dado desejado em um conjunto específico;
- **filtrar:** de acordo com alguns atributos, encontrar dados que podem satisfazer uma dada condição;
- **computar o valor derivado:** a partir de um conjunto de dados, extrair valores consequentes dos mesmos;
- **encontrar o extremo:** identificar itens que representem os valores máximos e mínimos de um conjunto;
- **ordenar:** de acordo com algum critério específico, organizar os dados (por exemplo, posicioná-los em ordem alfabética);
- **determinar a variação:** encontrar a amplitude por meio de um parâmetro;
- **caracterizar a distribuição:** identificar a distribuição dos itens entre o conjunto de dados. Por exemplo, dividir os elementos químicos contidos em um cereal;
- **encontrar anomalias:** reconhecer problemas contidos em um conjunto de dados juntamente com seus relacionamentos;
- **agrupar:** a partir de um conjunto de dados, reunir seus valores com base em critérios de semelhança;
- **correlacionar:** determinar os relacionamentos relevantes entre dois ou mais dados.

Já a taxonomia apresentada por Tory et al. [187] é baseada em modelos de *design*. O termo "modelo de design" é a suposição que os *designers* de visualizações fazem acerca dos dados. Em consequência, constroem algoritmos necessários para atingir as hipóteses ou suposições levantadas. Os modelos de *design* são classificados como discretos ou contínuos conforme as escolhas de algoritmos para a apresentação dos atributos desejados. Por exemplo, um grupo de médicos deseja visualizar imagens para diagnosticar o câncer no cérebro. O objeto de estudo é o próprio paciente que apresenta os sintomas indesejáveis. Em seguida, uma série de exames são realizados e gravados digitalmente como um conjunto discreto de números (os dados). Porém, os dados obtidos podem ser visualizados de diversas maneiras. Os algoritmos visuais adequados vão depender do modo com que os médicos pensam sobre os dados (modelo de usuário). Uma possível visualização é usar um conjunto de fatias 2D (*2D slices*) para determinar se há a presença de um tumor e posteriormente identificar a posição por meio de uma visualização 3D.

Os autores classificam uma visualização conforme:

### 1. Estrutura de auto-nível

- verificar se o objeto é discreto ou contínuo (os dados podem ser interpolados);

- determinar quais foram as exibições (algoritmos) utilizadas para representar determinados atributos.

		Display Attributes		
		Given	Constrained	Chosen
Continuous	Images (e.g., medical)	Distortions of given / continuous ideas (e.g., flattened medical structures, 2D geographic maps, fish-eye lens views)	Continuous (high-dimensional) mathematical functions	
	Fluid / gas flow, pressure distributions	Arrangement of numeric variable values	Continuous time-varying data, when time is mapped to a spatial dimension	
	Molecular structures (distributions of mass, charge, etc.)		Regression analyses	
	Globe – distribution data (e.g., elevation levels)			
Discrete	Classified data / images (e.g., segmented medical images)	Distortions of given / discrete ideas (e.g., 2D geographic maps, fish-eye lens views)	Discrete time-varying data, when time is mapped to a spatial dimension	
	Air traffic positions	Arrangement of ordinal or numeric variable values	Arbitrary entity-relationship data (e.g., file structures)	
	Molecular structures (exact positions of components)		Arbitrary multi-dimensional data (e.g., employment statistics)	
	Globe – discrete entity data (e.g., city locations)			

Figura 2.9: Classificação em alto-nível, em exemplos [187]

A Figura 2.9 apresenta, em exemplos, a classificação de alto-nível. Para cada linha, há as colunas: *constrained* (níveis de regras de negócio), *given* e *chosen* (atributos relacionados à referência espacial de um objeto, podendo eles ser obtidos exclusivamente ou escolhidos dentre várias opções).

## 2. Relacionamento entre a informação e a visualização científica

Os autores também classificam as representações visuais com base na Visualização da Informação e Visualização Científica. Foi observado pelos autores que a visualização científica tende a ocupar a parte esquerda superior da tabela (Figura 2.9), enquanto a visualização da informação, a direita inferior. Porém, foi ressaltado que há a possibilidade de visualizações ambíguas.

## 3. Estrutura de baixo-nível

Similarmente, o modelo de baixo nível é classificado em:

- contínuo – subdivide-se em 4 grandes categorias (escalar, vetor, tensor e múltiplas variáveis) para diferentes dimensões (1D ... nD), conforme mostra a Figura 4.1-(a).
  - discreto – classifica-se conforme a estrutura do dado ou de seu valor. A Figura 4.1-(b) ilustra em exemplos a divisão. O termo "valor" está relacionado ao número de dimensões que a visualização suporta (2D,3D,...). Já, o termo "estrutura" está diretamente ligado ao relacionamento dos dados.
4. **Tarefas visuais** – segundo os autores, Shneiderman et al. [167] mapearam as tarefas que podem ser executadas em uma visualização. Porém, eles não consideraram que muitas dessas tarefas são diferentes em outras áreas. A proposta de Tory *et al.* é exibida na Figura 2.11. Eles apresentam o relacionamento entre os tipos de tarefas e examinam qual tipo é mais adequado de acordo com o modelo de design.

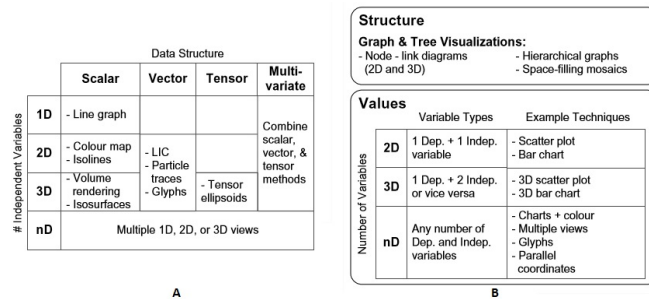


Figura 2.10: Classificação em baixo-nível, em exemplos [187]

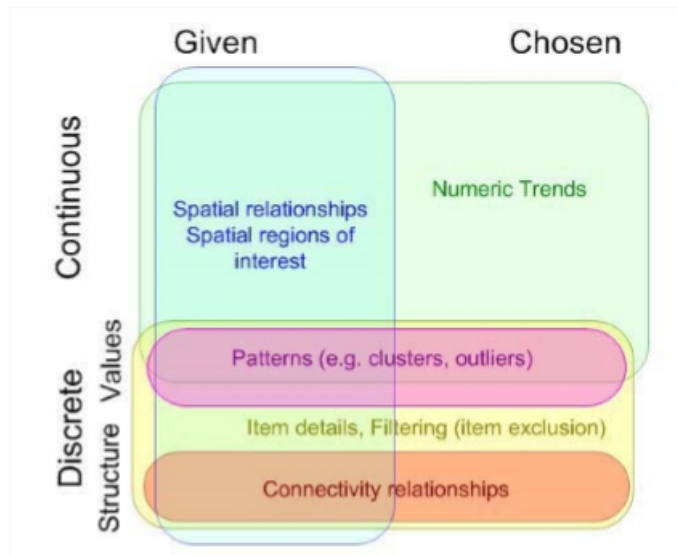


Figura 2.11: Quadro resumo da classificação [187]

---

## Visualização de Informações Aplicada ao Tráfego Urbano

---

Atualmente, são bastante comuns as interfaces gráficas que utilizam a Visualização de Informações e técnicas de interação a fim de dar suporte à análise e interpretação de dados nas mais diversas áreas, inclusive no estudo do trânsito. Entretanto, a grande maioria das visualizações referenciadas na literatura de Engenharia de Tráfego são apoiadas por mapas geográficos [159, 58, 179, 180]. Tais visualizações são comumente baseadas na cartografia: divisão de regiões políticas (cidades, estados, etc.) em áreas poligonais; uso de recursos de linha para representar ruas, avenidas, canais de água e rios, e uso de atributos visuais como cor e textura, para classificar ou destacar elementos de um mapa.

Um outro campo de investigação relacionado que tem contribuído fortemente com a engenharia de tráfego é o de Sistemas de Informação Geográfica (GIS em Inglês) [115, 86, 198, 92]. Dentre suas contribuições estão: as representações em múltiplas camadas sobrepostas, onde cada camada se relaciona a um conjunto diferente de dados; técnicas e ferramentas para armazenamento e recuperação de dados georreferenciados; e técnicas interativas para selecionar visualmente e filtrar camadas de informação.

Além disso, a integração de GIS e sistemas de suporte à decisão levaram ao desenvolvimento de modernos sistemas computacionais de simulação que utilizam dados georreferenciados e representação visual em múltiplas camadas. Isto proporciona um conjunto mais amplo de ações interativas para o estudo e o planejamento das redes de tráfego. Alguns sistemas conhecidos para este objetivo são: SATURN<sup>1</sup>, DRACULA<sup>2</sup>, TransCAD<sup>3</sup>, VISSIM<sup>4</sup>, SUMO<sup>5</sup> e MITSIM<sup>6</sup>.

Neste Capítulo serão apresentados um resumo dos trabalhos que, em seu conteúdo, aplicam técnicas de Visualização de Informações para estudos do tráfego urbano.

---

<sup>1</sup><http://www.saturnsoftware.co.uk>

<sup>2</sup><http://www.its.leeds.ac.uk/software/dracula/>

<sup>3</sup><http://www.caliper.com/tcovu.htm>

<sup>4</sup><http://www.ptv-vision.com>

<sup>5</sup><http://sumo.sourceforge.net/>

<sup>6</sup><http://sourceforge.net/projects/mitsim/>

Tais trabalhos foram obtidos por meio da revisão sistemática, detalhada no Apêndice F.

A fim de contextualizar o andamento das pesquisas sobre visualizações do tráfego urbano, serão apresentados alguns dos projetos mais interessantes (conforme aos critérios definidos na revisão sistemática Apêndice F). A seleção está vinculada à metáfora utilizada e à sua complexidade, ou pelo fato de o projeto ser altamente interativo.

Para uma melhor organização, os artigos estão agrupados de acordo com as técnicas de visualização adotadas. Para isso, foi escolhida a proposta de classificação definida por Keim et al. [103] (visualizações 2D/3D, transformações geométricas, iconográficas, densidade de pixel e hierárquicas), discutida na seção 2.4. Os artigos semelhantes ou que tenham pequenas variações são citados ao fim de cada exemplo.

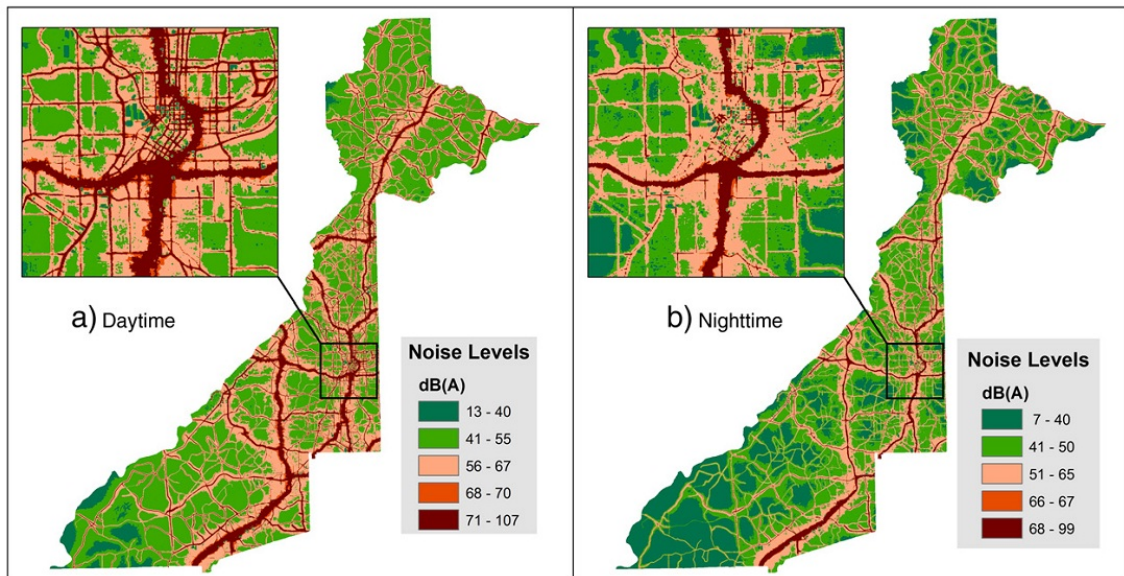
### 3.1 Visualizações 2D/3D e Transformações Geométricas

O trabalho de Seong et al. [163] reforça a importância da observação de níveis de ruído aos quais a população está exposta. Seu objetivo foi modelar um mapa de ruídos a partir do tráfego urbano em Fulton County, Georgia (EUA), além de indicar a quantidade de pessoas que seriam afetadas por estes ruídos. Para este propósito, os pesquisadores combinaram informações do tráfego com dados geográficos e populacionais de diferentes fontes e produziram visualizações com base em um mapa de ruídos <sup>7</sup>

Seong et al. utilizaram os dados de tráfego oriundos do Departamento de Transportes da Geórgia e da Comissão Regional de Atlanta em um modelo de previsão de ruídos. Vários critérios podem afetar a quantidade de ruídos do tráfego, como o tipo de veículo, motor, velocidade do tráfego, tipo de pavimento, distância da fonte de ruído, topologia da cidade e clima. Os autores utilizaram o modelo de ruído de tráfego (TNM) da *Federal Highway Administration* (FHWA), implementado no software *SoundPLAN* para uma melhor estimativa de níveis de ruídos. Eles também obtiveram um conjunto de dados geográficos a partir de outros órgãos do governo para gerar dados de terrenos e de edifícios em 3D das regiões selecionadas. Além disso, um conjunto de dados populacionais ajudou a estimar a quantidade de pessoas expostas ao ruído.

---

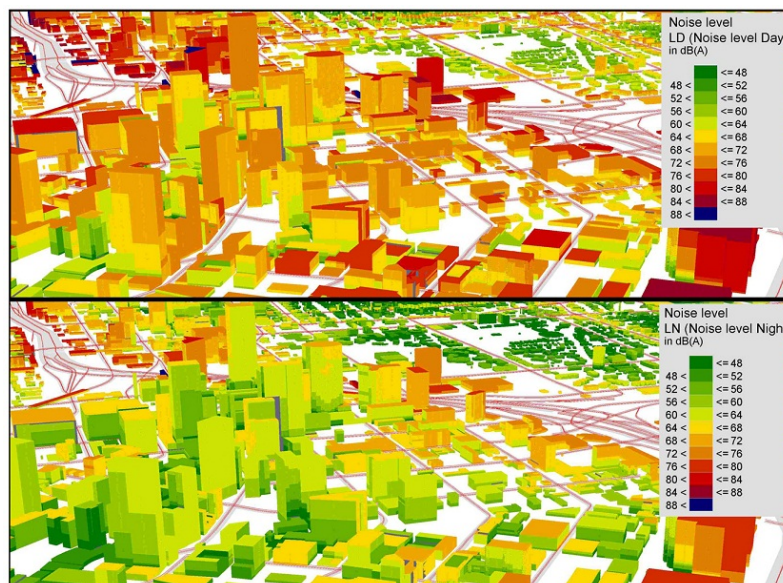
<sup>7</sup>Um mapa de ruídos é uma representação gráfica que mostra a distribuição dos níveis de ruídos em uma região. Em geral, são usados em mapas cartográficos 2D com cores que representam diferentes níveis de sons. Esses mapas são diferentes para períodos distintos do dia ou do ano. São usados em alguns países geralmente para identificar locais que não seguem os níveis tolerados de ruídos. Regulamentações têm sido criadas para avaliar e gerenciar este campo, como exemplo o *Environmental Noise Directive of the European Parliament and Council* (Diretiva 2002/49/EC de 25 de Junho de 2002).



**Figura 3.1:** Mapa de ruídos de Fulton County, Georgia, com destaques do centro de Atlanta [163]

A Figura 3.1 ilustra os mapas de ruído desenvolvidos pelos pesquisadores. Nesta Figura, os níveis de decibéis são representados por cores. Avenidas e estradas com baixo nível de ruído são mostrados em verde. Altos níveis de ruído aparecem em vermelho. O nível de ruído foi redundantemente codificado para a espessura das linhas da rua. Outra proposta de visualização é apresentada na Figura 3.2, em 3D, que mostra com os níveis de ruído do tráfego percebidos nos edifícios da cidade. As visualizações produzidas por Seong et al. enfatizaram a presença de ruídos além dos níveis permitidos ao longo de rodovias, estradas interestaduais e até mesmo na área central da cidade. Este tipo de informação é vital para a melhoria da rede e condicionamento do tráfego. As visualizações, no entanto, não estão livres de problemas. Como visto na Figura 3.1, um problema comum com o uso de espessura de linha como variável visual em mapas cartográficos de tráfego é que as rotas com linhas espessas (representando alto nível de ruídos) podem ocultar rotas com um nível menor de ruído. Algumas vias podem também ser erroneamente interpretadas como tendo o mesmo nível de ruído devido à espessura semelhante no desenho. Já na Figura 3.2, há à obstrução de edifícios por outras construções, complicando a percepção dos níveis de ruído. Neste caso, a rotação da visualização pode-se tornar necessária.

Apesar dos problemas, o mapa de ruído ainda é uma representação interessante sobre o fluxo do tráfego. Em outros projetos relatados neste trabalho, utilizou-se o ruído (sons de várias frequências) como uma variável para indicar a quantidade e os tipos de veículos trafegados e tipo de fluxo de veículos.

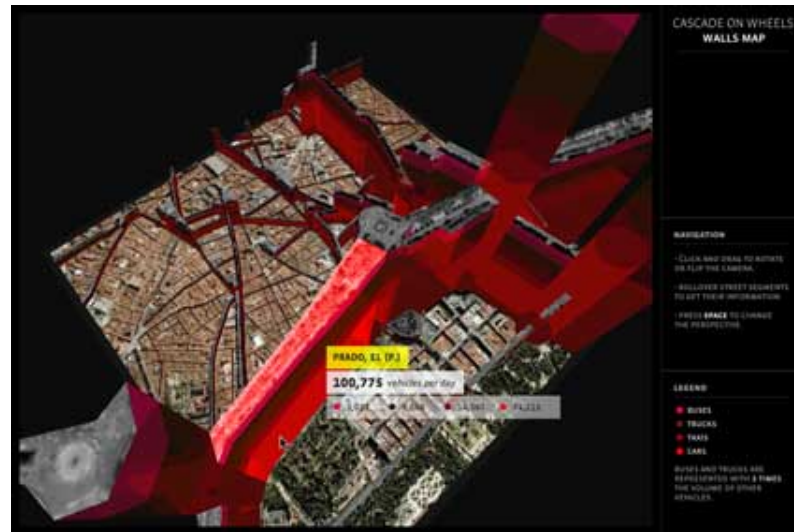


**Figura 3.2:** Mapa de ruídos expresso nas construções no centro de Atlanta no período do dia (imagem superior) e durante a noite (imagem inferior) [163]

Xiaoming et al. [117] empregam a mesma técnica visual especificada anteriormente. Entretanto, a diferença está na entrada de dados, ou seja, os autores não consideraram ruídos, mas sim dados obtidos por outros tipos de sensores. Esta visualização adicionalmente apresenta o fluxo de diferentes tipos de veículos em tempo real.

Outras visualizações sobre ruídos e poluição do ar podem ser encontradas em diferentes artigos: [199, 178, 61, 30, 188, 210, 129].

Ainda na linha de projeção geométrica aplicadas à visualização de dados do tráfego, encontra-se o projeto *Cascade on Wheels* [1]. Trata-se de um projeto que se iniciou durante uma oficina de visualização no Medialab Prado em Madri, 2007. Seu principal objetivo é expressar a quantidade de veículos nas grandes cidades. Duas diferentes visualizações foram desenvolvidas e seus dados foram obtidos a partir do fluxo de diferentes tipos de veículos como táxis, ônibus, veículos leves e pesados, na região central de Madrid em 2006.



**Figura 3.3:** *Cascade on Wheels - Walls Map Piece.* Um mapa 2D/3D em que as paredes representam segmentos de ruas com dados do tráfego. Quanto maior é o fluxo de veículos em um segmento de rua, maior é a altura da parede [1]

A primeira visualização, denominada por *Walls Map Piece* (Figura 3.3), mostra os dados utilizando uma metáfora de parede com diferentes alturas. Inicialmente, apresenta-se um mapa de satélite 2D da cidade no qual é possível selecionar ruas e visualizar os seus nomes e dados de tráfego (a quantidade e o tipo de veículos) em um certo dia. Em outro momento, é possível estender a visualização para um mapa 3D, aumentando a altura das ruas conforme o fluxo de tráfego diário. Nesse caso, os segmentos das ruas são transformados em paredes com alturas proporcionais à quantidade de tráfego sobre eles. O usuário pode girar o mapa 3D para visualizar as diferentes faces da parede as quais mostram a quantidade de veículos para cada tipo de transporte, utilizando um gráfico de barras.



**Figura 3.4:** *Cascade on Wheels - Traffic Noise Mixer*. Os sons são emitidos indicando o tipo e a quantidade de veículos em uma dada região [1]

A segunda visualização, chamada *Traffic Noise Mixer*, faz uso de uma camada de áudio combinada a um mapa de satélite (ver Figura 3.4). O usuário pode interagir com a visualização desenhando, arrastando e aumentando regiões circulares sobre o mapa. Sons de diferentes frequências e amplitudes são gerados, representando a quantidade e os tipos de veículos que viajam nessas regiões.

O próximo trabalho, na linha de projeção geométrica, é o projeto *Live Singapore* [107]. Ele foi criado pelo *SENSEable City Laboratory* no MIT e explora o desenvolvimento de uma plataforma aberta para a coleção, elaboração e distribuição de um grande número de diferentes tipos de dados em tempo real que se originam em uma cidade utilizando dados do mundo real, tais como os provenientes de: operadoras de redes de telefonia celular, frotas de táxi, transporte público, portos, aeroportos e outros. A plataforma está estruturada como um *framework* para as comunidades de desenvolvedores. O projeto oferece recursos para análise de dados, ligações entre diferentes dados em tempo real e serviços de *feedback* que podem dar suporte ao planejamento e do gerenciamento da cidade. Algumas aplicações desenvolvidas dentro do projeto *Live Singapore* são discutidas abaixo.

Chen et al. [107, 44] propõem transformações (compressão / distensão) de um mapa de Singapura de acordo com o tempo exigido para viajar entre pares origem-destino da cidade, em uma visualização chamada "Isochronic Singapore"<sup>8</sup> (uma abordagem semelhante tais distorções é o *Morphing City*<sup>9</sup>, descrito posteriormente). Um exemplo da visualização pode ser vista na Figura 3.5 define 290 pontos de controle. Ao selecionar-

<sup>8</sup><http://xiaoji-chen.com/blog/2011/isochronic-singapore/>

<sup>9</sup><http://fmachado.dei.uc.pt/featured/visualizing-traffic>

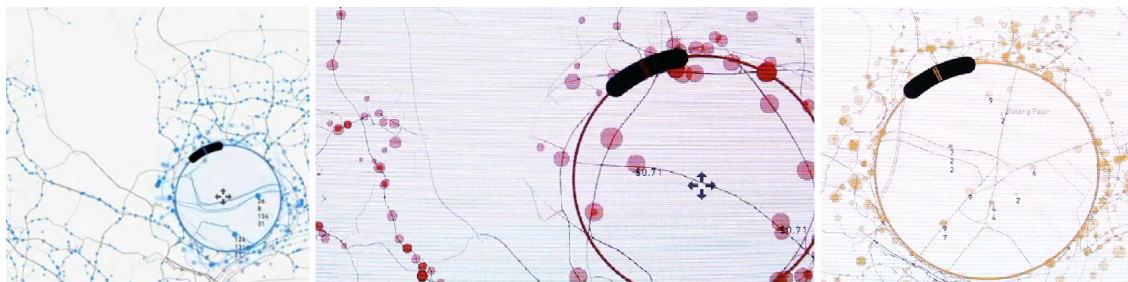
se uma origem, ocorre uma deformação no mapa, sendo que as distâncias entre a origem e todos os outros pontos de destino na rede representa o tempo de viagem entre eles. A visualização também muda automaticamente com a alteração do fluxo do tráfego da rede ao longo do dia. Os dados do projeto foram obtidos de 16.000 posições GPS de táxis em Singapura em agosto de 2010.



**Figura 3.5:** *Isochronic Singapore* - as modificações no mapa ocorrem automaticamente quando o usuário seleciona um ponto de origem [107]

Outra visualização desse projeto é a *Data Lenses*<sup>10</sup>, a qual foi criada para permitir o monitoramento preciso das atividades do transporte público urbano (ônibus) em Singapura. A visualização utiliza um círculo que funciona como uma lente de aumento. Os usuários podem mover as lentes ou alterar suas propriedades como tamanho do raio e ampliação do mapa para uma melhor percepção de uma área densa. Também é possível ajustar as lentes para filtrar várias camadas de informações, como linhas de ônibus em cada parada (em azul), número de passageiros, o embarque e desembarque de passageiros nas paradas (em laranja), e a quantidade de bilhetes pagos em cada parada (em vermelho). O usuário pode alterar ou combinar diferentes camadas para explorar as conexões entre rotas de ônibus, paradas, tempo de espera, número de passageiros e valores de bilhetes. Uma ilustração é exibida na Figura 3.6 com dados reais fornecidos pela *Land Transport Authority*.

<sup>10</sup><http://pmcruz.com/information-visualization/data-lenses>



**Figura 3.6:** *Data Lenses* permite ampliar e filtrar dados do tráfego urbano no mapa [107]

Um outro projeto, dessa vez criado à pedido do *British Broadcasting Corporation* (BBC) resultou em 2011 em um site web chamado "*Every death on every road in Great Britain 1999 - 2010*" [2] o qual apresenta dados e fatos sobre acidentes com lesões e mortes nas estradas da Grã-Bretanha no período de 11 anos. O site tem uma animação inovadora para mostrar o volume e a concentração de acidentes de trânsito. A visualização se assemelha a uma visão aérea noturna de uma região com pontos de luz que indicam os locais em que ocorreram colisões com lesões nas rodovias. Quanto mais brilhante for a região mais colisões ocorreram. Um exemplo dessa animação é apresentada na Figura 3.7. Uma das vantagens da mesma é a capacidade de destacar informações importantes (localização e densidade de acidentes de automóveis), escondendo os dados de infra-estrutura de rede irrelevantes.

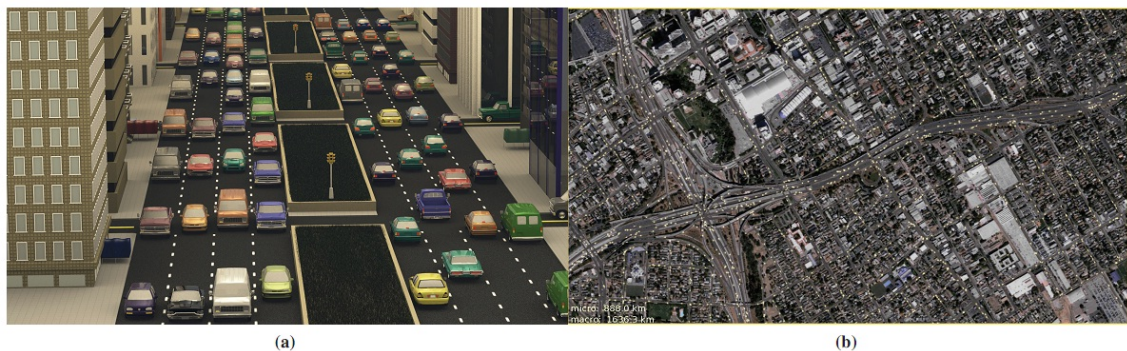


**Figura 3.7:** *Every death on every road in Great Britain 1999 - 2010*. Visualização de acidentes nas estradas na Grã-Bretanha no período de 1999 to 2011. Onde pontos luminosos indicam acidentes [2]

Entre exemplos de visualizações semelhantes à anterior, encontra-se a proposta

por Michio *et al.* [134]. Eles registraram o fluxo de 200 pessoas em diferentes tipos modais (carro, moto, metrô, etc.) por uma semana através de aplicativos de celular. Chen et al. [41] também apresentam uma visualização equivalente, porém destacam a dificuldade de se modelar grandes malhas viárias. Neste contexto, propuseram um sistema de auxílio ao usuário para modelagem de grandes malhas viárias utilizando *stress fields* (semelhante a uma grade por meio na qual o usuário pode arrastar, posicionar, criar, alterar ou apagar os nós de acordo com características do mapa tais como ruas, avenidas, áreas verdes, lagos, etc.).

Projetos que abordam visualizações 3D são bastante comuns nesta área, por o trabalho de Sewall et al. [164]. Esses autores apresentam um modelo híbrido que combina escalas de simulação macroscópica e microscópica (baseado em agentes) para o desenvolvimento de visualizações de larga escala em tempo real [11, 71]. O modelo híbrido permite um nível de granularidade baixo na simulação da rede em uma região de interesse, enquanto mantém a simulação do restante da rede com o método macroscópico. Nessa abordagem, uma rede grande pode ser dividida em diversas regiões pequenas e cada uma pode ser simulada por qualquer um dos métodos, microscópico ou macroscópico. Os dados do tráfego a partir de métodos diferentes podem ser intercalados.



**Figura 3.8:** *Modelo híbrido 3D de simulação de tráfego - (a) Visualização interativa 3D do tráfego urbano; (b) Visualização com realidade aumentada [164]*

Os pesquisadores descrevem duas visualizações interativas de tráfego. A primeira apresenta uma visualização de alta qualidade em 3D de regiões da cidade e de seus respectivos fluxos de veículos. Isto é ilustrado na Figura 3.8 (a). Já a segunda visualização, mostrada na Figura 3.8 (b), apresenta uma visão ampliada da rede usando o que eles chamam de uma abordagem de “realidade aumentada”, no qual imagens aéreas estáticas de satélite são ampliadas com animações de veículos em movimento nas ruas e avenidas, com base em dados produzidos pela simulação ou usando dados reais coletados anteriormente.

Os usuários podem selecionar e ampliar uma região e se concentrarem nela usando essas visualizações. Ao fazer isso, apenas as áreas visíveis (e talvez outras nas

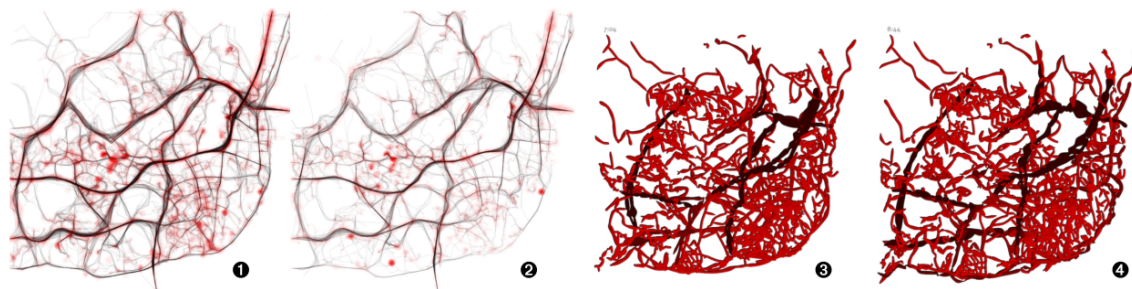
proximidades) são simuladas pelo método microscópico, sendo que as regiões fora da tela continuam a empregar a simulação macroscópica.

Um outro exemplo, comparado às visualizações que utiliza o auxílio da realidade aumentada de Sewall et al. [164] é a de Kim et al. [105]. Percebe-se que a diferença entre elas é que o trabalho de Kim et al. projeta imagens reais captadas por câmeras de vídeo sobre o mapa, permitindo que o usuário realize algumas mudanças de ângulo sem alterar a proporcionalidade ou o sentido da via. [63, 152, 31].

Além disso, frameworks para representações 2D e 3D podem ser encontrados em [50, 26, 109, 15, 120, 130, 121, 93, 77, 176, 118].

O uso da técnica de desenho de grafos é a base para o próximo projeto desenvolvido a ser descrito, chamado CityMotion<sup>11</sup>. Ele foi concebido por membros da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra em parceria com o MIT e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto entre 2007 e 2010. O objetivo desse projeto foi desenvolver uma infraestrutura de conhecimento, modelos computacionais e aplicativos que possibilita o acesso a informações em tempo real sobre o estado do transporte urbano, assim como previsões sobre seu futuro.

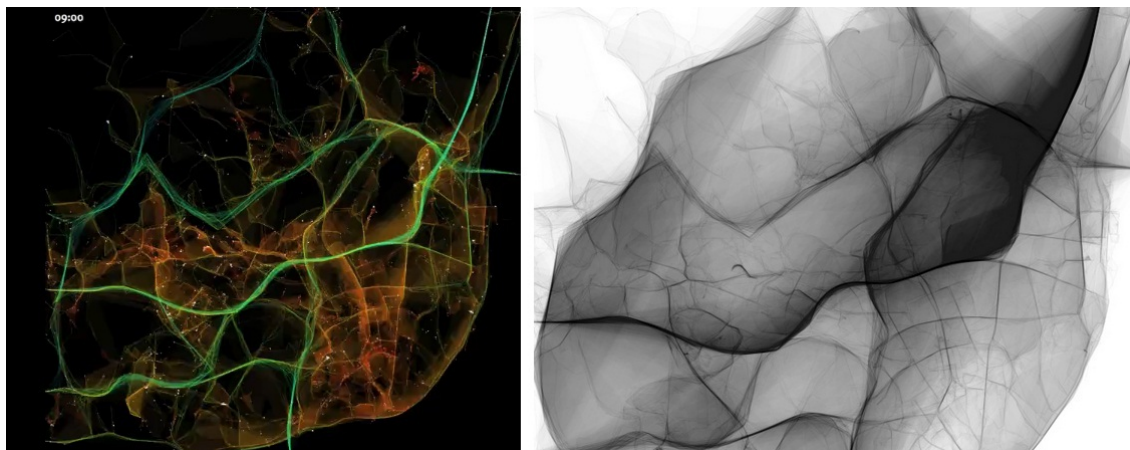
Dentro os vários sub-projetos do CityMotion destaca-se o “*Visualizing the Circulatory Problems of Lisbon*” [51], que visava o desenvolvimento de visualizações alternativas para identificar gargalos em uma rede de ruas com base em uma metáfora ao sistema circulatório de seres vivos. Para tanto, o cenário foi Lisboa em 2009, com dados de 1.534 veículos. Os autores criaram dois tipos diferentes de visualização que seguem princípios da biologia básica. Na primeira visualização, mostrada na Figura 3.9 (item 1) e (item 2), é apresentada a formação de coágulos sanguíneos (como círculos vermelhos) representa zonas de trânsito lento e o diâmetro dos coágulos é inversamente proporcional à velocidade.



**Figura 3.9:** *Visualizing the Circulatory Problems of Lisbon* (A) – As imagens (1) e (2) representam coágulos em Lisboa no período de 9 da manhã até as 19 horas, respectivamente. As imagens (3) e (4) mostram vasos sanguíneos em Lisboa no período de 7h e 04min às 8h e 44min da manhã [51]

<sup>11</sup><http://www.mitportugal.org/transportation-systems/intelligent-transportation-systems.html>

Na segunda visualização (Figura 3.10 (item 3) e (item 4)), espessura e tamanho dos vasos sanguíneos mudam de acordo com o número de veículos e a velocidade de trânsito médio em cada via. Além disso, em ambas as visualizações, o tráfego em baixa velocidade tende a escurecer o vaso sanguíneo relacionado, representando assim a estagnação do sangue. Em contraste, se a velocidade de tráfego é elevada, o vaso sanguíneo é pintado de uma cor mais clara e também tem a sua espessura reduzida no segundo tipo de visualização.



**Figura 3.10:** *Visualizing the Circulatory Problems of Lisbon - (B). A velocidade da via é representada pela coloração; imagem à esquerda. Enquanto a representação da imagem à direita se dá através de sombreamento [51]*



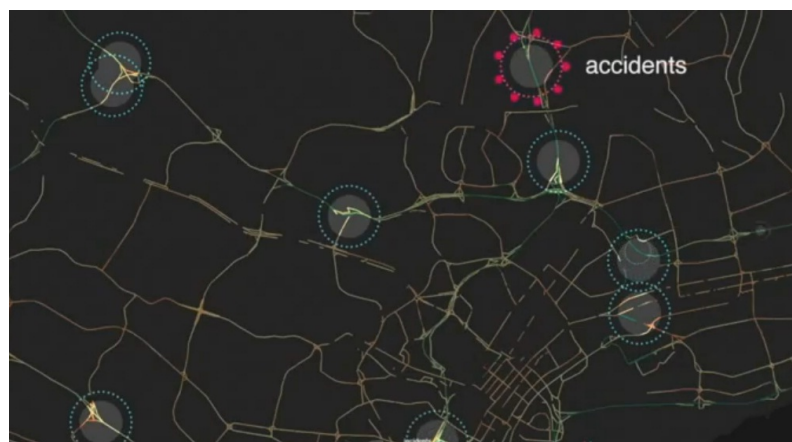
**Figura 3.11:** *Morphing City – do lado esquerdo da imagem ocorre uma deformação do mapa conforme as condições do trânsito. Esta mesma deformação pode ser visualizada ao lado (superfície plana) [49]*

Algumas variações nas metáforas utilizando o sistema circulatório<sup>12)</sup> são mos-

<sup>12)</sup><http://pmcruz.com/information-visualization/traffic-in-lisbon-condensed-in-one-day>

trados na Figura 3.10. Na imagem à esquerda, as cores das artérias mudam de acordo com a velocidade do tráfego. Fluxos rápidos são identificados por cores esverdeadas (frias) e fluxos lentos são apresentados em coloração avermelhada (mais quente). A intensidade de tráfego também é mostrada pela dilatação (largura crescente) das artérias. Uma outra alternativa (imagem à direita) utiliza uma escala de cinza com tons escuros representando o tráfego pesado. Outra visualização do projeto *CityMotion* é a *Morphing City* [49] (Figura 3.11), a qual apresenta um mapa cujas linhas (ruas) são deformadas (comprimidas ou distendidas) se a velocidade do fluxo corrente nas mesmas é menor ou maior que a velocidade média global. As cores também auxiliam na interpretação do mapa, visto que atribuem-se cores frias a deformações que comprimem o mapa, enquanto as cores quentes são aplicadas para as expansões. A visualização *Morphing City* permite uma rápida identificação de pontos críticos, ou seja, de áreas em que ocorre tráfego intenso e que são destacadas por cores mais quentes e parecem se expandir em comparação com outras rotas.

O projeto *Traffic Origins* [3] propõe uma visualização que objetiva identificar eventos nas estradas que normalmente causam congestionamento. Essa informação pode ser combinada com modelos de simulação para uma melhor compreensão das condições de tráfego e previsão de seus impactos em uma possível interrupção na rede. Como resultado, políticas mais robustas de respostas a acidentes podem ser criadas. Três tipos de eventos podem ser automaticamente destacados na visualização proposta em *Traffic Origins* com o uso de lentes: acidentes (em vermelho), o tráfego intenso (em azul) e veículos quebrados (em laranja). Como mostrado na Figura 3.12, após a identificação de uma região do mapa onde um desses eventos ocorreu, a visualização também realça a cor das ruas adjacentes (dentro do círculo) para melhorar a percepção da velocidade e do fluxo de tráfego. A vantagem desta visualização é apenas focar a atenção dos usuários para as ocorrências importantes, dadas por eventos circulosados com informações coloridas.



**Figura 3.12:** *Traffic Origins* – círculos indicam eventos que ocorreram (acidentes, trânsito pesado e veículos quebrados) [3]

Um outro trabalho é o "*Pulse of the City*" [150] desenvolvido por Jonathan Reades<sup>13</sup> que mostra o uso de linhas ferroviárias do transporte público de Londres, por meio de uma animação. A animação apresenta linhas ferroviárias ao longo de um mapa cartográfico com um fundo escuro. Conforme as viagens no sistema começam, os segmentos de linha ferroviária aumentam de espessura de acordo com a utilização. Se um segmento ferroviário no qual havia vários passageiros por algum motivo se torna menos utilizado, sua espessura encolhe ao tamanho normal. A animação abrange vários dias e períodos do dia, incluindo horas de *rush*. O efeito visual resultante é de um sistema circulatório que pulsa com sangue. A Figura 3.13 apresenta uma versão<sup>14</sup> mais nova dessa animação.



**Figura 3.13:** *Pulse of the City* – a animação mostra em vermelho as linhas de trem. Esta visualização é semelhante ao funcionamento de vasos sanguíneos que podem aumentar ou reduzir sua espessura de acordo com o fluxo de pessoas [150]

Boyandin et al. [29], criaram uma representação de dois mapas replicados lado a lado com um *heatmap* ao centro (Figura 3.14 (a)). O mapa da esquerda contém os nós de origem enquanto o mapa da direita ilustra os nós destinos. O *heatmap* no centro da visualização conecta por linhas os dois mapas registrando, por meio de cores, o volume de demandas de viagens OD. As cores mais quentes representam um grande fluxo, já as cores frias, o contrário. Essa proposta de visualização foi adotada porque permite reduzir o número de cruzamento de linhas conectando pares OD.

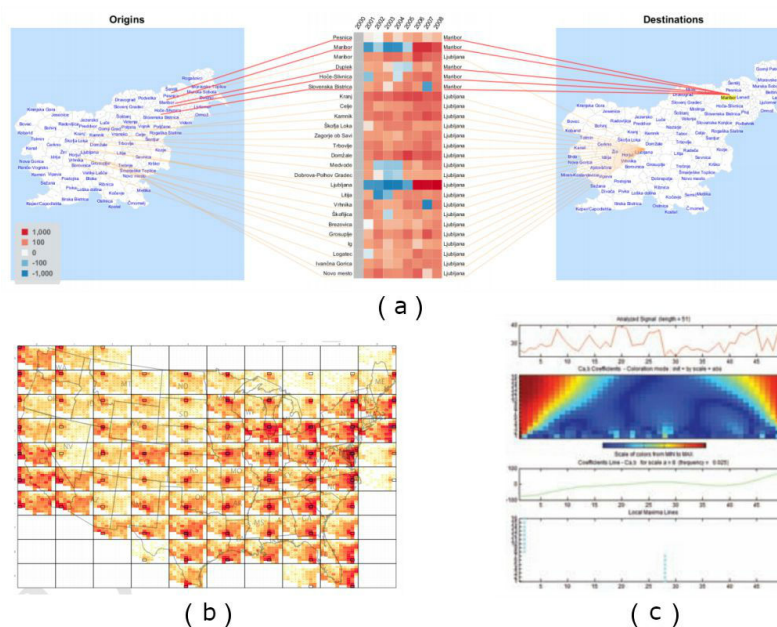
Wood et al. [205] desenvolveram uma representação que utiliza mapas e agrupamento de regiões OD em duas camadas (Figura 3.14 (b)). Primeiramente, eles dividiram o mapa em forma de uma grade com cada célula representando uma origem. Dentro de

<sup>13</sup><http://vimeo.com/user11576485/pulseofthecity>

<sup>14</sup><http://simulacra.blogs.casa.ucl.ac.uk/2012/05/pulse-of-the-city-reboot/>

cada célula, há uma outra imagem reduzida do mesmo mapa representando os pontos de destino. Regiões do mapa menor, na célula, são destacadas com cores para indicar que há uma relação entre a origem (célula) e o ponto em questão. A intensidade da cor representa o volume de deslocamento entre origem e destino.

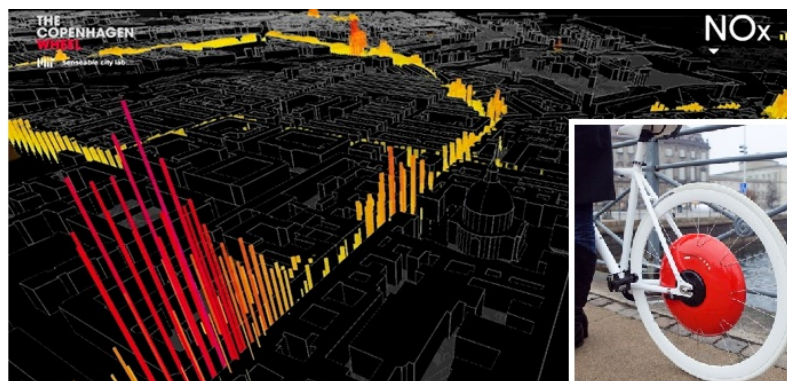
Gunay et al. [78] (Figura 3.14 (c)) representaram uma matriz OD através de uma transformada *wavelet* contínua. Os autores criaram uma pequena malha viária e estabeleceram 16 diferentes cenários para a distribuição do fluxo. O objetivo do trabalho foi identificar quais cenários são mais efetivos para diferentes características como velocidade e congestionamento.



**Figura 3.14:** Visualizações envolvendo matrizes OD [29, 205, 78]

Ao se tratar de coleta de dados de tráfego, é preciso mencionar o projeto *Copenhagen Wheel* [110], que foi desenvolvido pelo *MIT SENSEable City Lab* com o objetivo de mostrar a importância da preservação do meio ambiente através de transportes não poluentes. O projeto consiste em uma espécie de roda elétrica (denominado “hub”), que transforma qualquer bicicleta comum em uma bicicleta elétrica, possuindo motor, baterias, GPRS e sensores de torque, umidade, dióxido de carbono, temperatura e ruído. A roda pode capturar a energia dissipada na frenagem, como também convertê-la para as baterias mais tarde. Ela pode ainda capturar o níveis de poluição, congestionamento do tráfego e condições das estradas em tempo real. Enquanto o ciclista segue sua rota, o sensor envia as informações coletadas para um iPhone a cada dois segundos via Bluetooth e os dados também podem ser compartilhados com outras pessoas. A Figura 3.15 mostra uma das possíveis visualizações que podem ser geradas com os dados recolhidos pelo dispositivo. Neste exemplo, utilizando um mapa em 2D, as barras verticais coloridas apresentam o nível de NO<sub>x</sub> (monóxido de nitrogênio). Como os dados são capturados

e enviados a cada 2 segundos, a visualização apresenta espaços entre cada medição. A imagem no canto superior direito da figura ilustra uma bicicleta adaptada com o dispositivo de *hub* (em vermelho).



**Figura 3.15:** Visualização 3D indicando a concentração de carbono de uma rota coletada pelo Hub [110]

Apesar dos muitos tipos de visualizações que podem ser produzidos com dados provenientes do dispositivo *Copenhagen Wheel*, a importância dessa pesquisa para o presente trabalho é mostrar uma forma simples, relativamente barata e estimulante de coletar dados de tráfego.

Uma outra abordagem para coleta de dados distribuídos que tem se tornado muito popular é o *crowdsourcing*. *Software* e estudos sobre a aplicação deste conceito estão presentes nas mais diversas áreas [202, 91]. Com base no escopo deste trabalho, um bom exemplo é o *crowdsourcing* Waze/Google, o qual é um aplicativo para dispositivos móveis que permite compartilhar informações do tráfego tal como a localização de congestionamento, acidentes, objetos na pista, além de dicas e avisos sobre blitz. Constata-se que o uso do aplicativo possibilita a escolha de melhores rotas [43, 177].

## 3.2 Visualizações Hierárquicas

Wood *et al.* [170] exploram o uso de *treemaps* para a representação do tempo-espaço no tráfego urbano. O estudo centra-se em um conjunto de dados que consiste no posicionamento georreferenciado de 90 milhões de veículos de uma frota de entrega. Os dados foram coletados durante 18 meses e cada local contém sua posição geográfica (dada por GPS), *timestamp*, tipo de veículo (incluindo van, van grande, moto, moto grande e bicicleta) e velocidade de deslocamento. O objetivo deste estudo foi demonstrar que as visualizações do tipo *treemap* podem auxiliar na identificação de padrões de dados e na seleção de informações.

Os pesquisadores apresentam duas abordagens para a visualização do conjunto de dados. Na primeira Figura 3.16, um mapa da cidade é dividido em uma grade de regiões

quadradas (1km). Cada célula da grade é atribuída a um *treemap* que apresenta apenas os dados para essa região. O conjunto de dados também é hierarquicamente organizado como antes. A diferença é que o primeiro nível hierárquico é a região geográfica dada pelas células. O tamanho de todas as células é sempre o mesmo e, portanto, cada *treemap* tem de ser adequadamente construído para se encaixar nas mesmas. Além disso, a intensidade da cor é agora utilizada para descrever o volume ou a velocidade média em cada pequeno quadrado no nível mais baixo da hierarquia (na Figura 3.16, por exemplo, a cor representa a velocidade média). A ferramenta foi desenvolvida para permitir que o usuário utilize níveis de *zoom* e também navegue pelo *treemap* a fim de analisar uma célula em detalhe. Além disso, as duas abordagens podem ser combinadas pelo recurso de *zoom*. A imagem do lado direito da Figura 3.16 mostra um mapa detalhado de uma célula chamada *Farring*.

Na segunda abordagem, (Figura 3.16), os dados são organizados hierarquicamente na seguinte ordem: tipo de veículo, dia da semana (de segunda a domingo) e hora do dia (24 horas no total). No nível mais baixo dessa hierarquia, cada retângulo *treemap* tem uma área proporcional ao volume de veículos (de acordo com o tipo correspondente de veículos, dias da semana e horas) e a intensidade na coloração indica a velocidade média destes veículos.



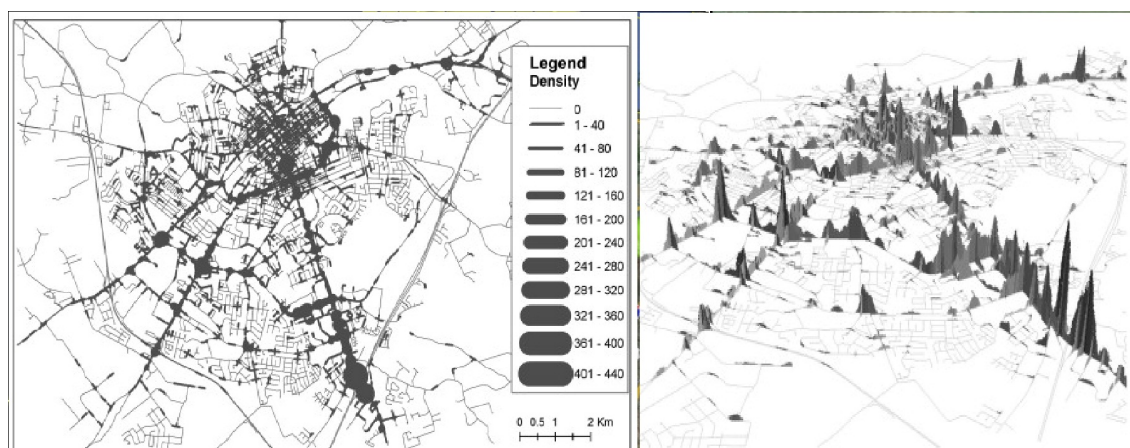
**Figura 3.16:** Uma área de Londres dividida em células quadradas de 1km (esquerda). Em cada célula há um *treemap* ordenado hierarquicamente conforme os dados dos veículos. A imagem da direita é um *zoom* de célula de *Farring*. Cores frias indicam que os veículos viajam abaixo da velocidade média. [170]

De forma isolada, a primeira visualização é útil para uma visão completa dos conjuntos de dados e para uma comparação geral entre os tipos de veículos. A segunda, por outro lado, mostra como o tráfego ocorreu em cada região, permitindo assim uma comparação entre as seções da rede. Segundo os autores, a proposta de uso de *treemaps*

foi efetiva ao resumir grandes conjuntos de dados e também ao auxiliar na identificação de padrões e áreas críticas (com alta densidade de tráfego e baixa velocidade) na rede. Apesar da utilização estar relacionada a uma frota restrita (entrega), suas abordagens podem ser aplicadas a quaisquer outros dados de tráfego de uma maneira simples.

### 3.3 Visualizações por Densidade de Pixel

O trabalho apresentado por Xie e Yan [207] visa a classificar padrões espaciais de acidentes de trânsito nas estradas. Ele traz uma variação da técnica de *Kernel Density Estimation* (KDE), permitindo a suavização de pontos sobre um espaço geográfico 2D. A nova abordagem foi implementada no ambiente ArcGIS da ESRI e testada com dados de acidentes de trânsito obtidos a partir de 2005 em Bowling Green, Estado de Kentucky, EUA, fornecidos pelo Departamento de Polícia do Estado de Kentucky. Os pesquisadores descobriram que o novo KDE foi mais eficaz do que o método padrão para estimar as densidades de acidentes de trânsito.



**Figura 3.17:** Visualizações utilizando a técnica KDE – a imagem à esquerda indica a densidade de acidentes através da espessura das ruas. E a imagem da direita apresenta os dados em 3D, utilizando altura como densidade [207]

A fim de ajudar a compreender os resultados, os autores utilizaram a visualização sobre um mapa, como se mostra na Figura 3.17. A imagem da esquerda destaca a densidade de acidentes variando a espessura das estradas nas posições em que existem muitos acidentes. Através de um processo de suavização, os pontos na rede são expandidos e conectados (cada ponto significa um acidente) e caso uma região possua um aglomerado de pontos, pode-se afirmar que existe um número maior de acidentes que ocorreram na referida área. A imagem da direita, por outro lado, apresenta os mesmos dados, mas utiliza uma perspectiva em 3D para mostrar a densidade dos acidentes de trânsito (quanto

maior a densidade, maior será o pico por uma área). Outras visualizações com variações no KDE podem ser encontradas em [79, 124, 197, 132, 172].

### 3.4 Ferramentas de Simulação de Tráfego Urbano

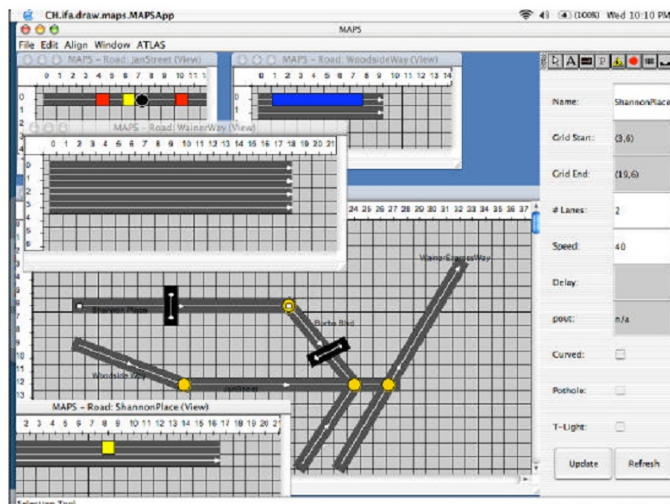
Abaixo, são descritas algumas das ferramentas de *software* mais conhecidas no cenário de simulação de tráfego urbano juntamente com algumas de suas telas.

#### ATLAS

ATLAS (*Advanced Traffic Specifications Language*) é uma linguagem de especificação definida para a simulação do tráfego urbano seguindo o paradigma *Cell-Devs* [195]. Apesar da linguagem ser de alto nível, sua forma de entrada de dados é tediosa, como também sua saída não possui uma interface amigável, por exemplo, desenhos em *ASCII*.

Ainda assim, o trabalho de Borho *et al.* [26] amplia ATLAS nos seguintes pontos: (1) auxiliar a modelagem da rede através de componentes como ruas, semáforos, rotatórias, faixas de modo visual no estilo clique e arraste (como ilustra a Figura 3.18). (2) possibilitar a leitura da simulação (arquivos ATLAS) de forma visual. Para isso, os autores desenvolveram um *front-end* de *software* que permite ao usuário desenhar uma cidade completa em pequenas seções (ruas, interseções, etc.) e transforme a modelagem visual em arquivos ATLAS. Este *front-end* é conhecido como MAPS. Um outro software foi desenvolvido para permitir ao usuário compreender os resultados da simulação em uma interface visual amigável (3D simples), conhecido como VRML GUI.

ATLAS (em seu conceito original) define demandas de veículos por meio de rotas aleatórias. Ou seja, não há o papel de uma matriz OD. As rotas são montadas por meio da escolha aleatória de vias em cada intersecção. Entretanto, o trabalho de Borho *et al.* [26] expande esse conceito. A expansão inclui matrizes ODs com diferentes métodos de estimação e parametrização (data, tempo e tipos de veículos). ATLAS não apresenta visualmente a demanda de tráfego.

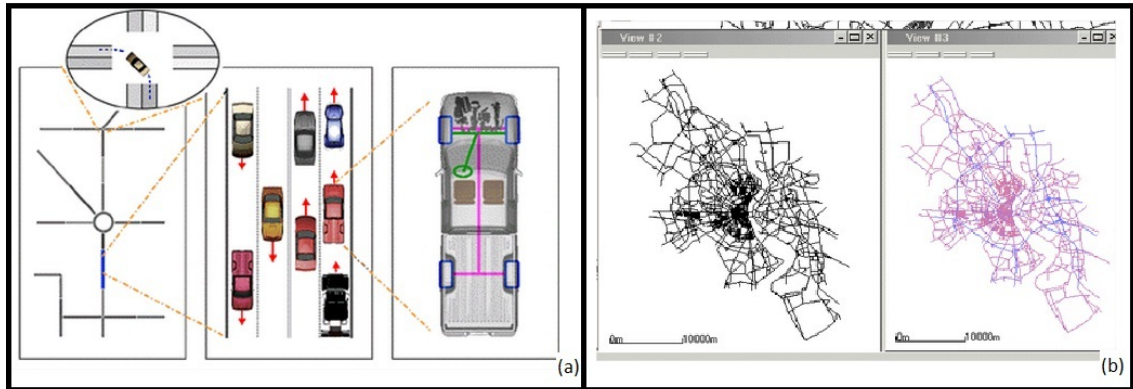


**Figura 3.18:** Software MAPS – no software é possível definir de forma visual ruas com múltiplas direções (retângulos pretos com linhas brancas), cruzamentos (círculos em amarelo), semáforos (quadrados vermelhos), obras na pista (quadrados amarelos), estacionamentos (retângulos em azul), etc, permitindo também a inserção de velocidades e curvatura das rua [26]

### SUMO (Simulation of Urban MObility)

O SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) é um software de código-livre de simulação de trânsito [20, 109]. Ele oferece recursos de simulação: macroscópica, microscópica, sub-microscópica e multimodal. Alguns desses recursos são ilustrados na (Figura 3.19). Os tipos de veículos suportados na simulação multimodal são transporte público e metrô, além disso, ele considera pedestres em seus cálculos.

SUMO permite a geração explícita de rotas, bem como a importação de matrizes OD. Para isso, ele utiliza o software *OD2TRIPS* para computar rotas a partir das informações inseridas nas matrizes OD. As informações contidas incluem: características físicas do veículo, pontos de origem e destino. SUMO não possui uma representação visual específica para matrizes OD.



**Figura 3.19:** *Software SUMO - a figura (a) apresenta os diferentes níveis de simulação, sendo o primeiro o modelo mesoscópico (dentro da oval), em seguida o macroscópico (situado abaixo do mesoscópico), microscópico e sub-microscópico. A figura (b) apresenta a simulação da cidade de Cologne [20]*

## VisSim

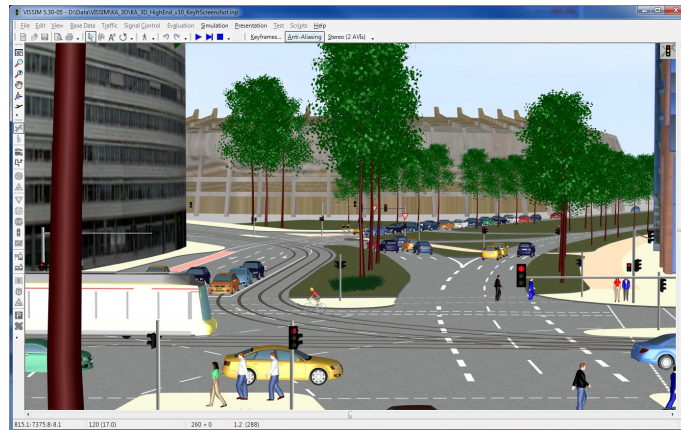
VisSim [4] é uma linguagem de diagrama em blocos para simulação de sistemas dinâmicos.

Através dos recursos de simulação do VisSim, é possível examinar o impacto do planejamento do tráfego considerando diferentes cenários e otimizando processos ainda na fase inicial do planejamento. Simulações macroscópicas fornecem informações sobre o volume do tráfego e as intervenções sobre a rede de transporte. (Figuras 3.20 e 3.21).

VisSim permite a inserção do número de viagens e a modalidade do veículo entre cada par OD, em um dado intervalo de tempo. O software também não possui uma representação de matrizes OD.



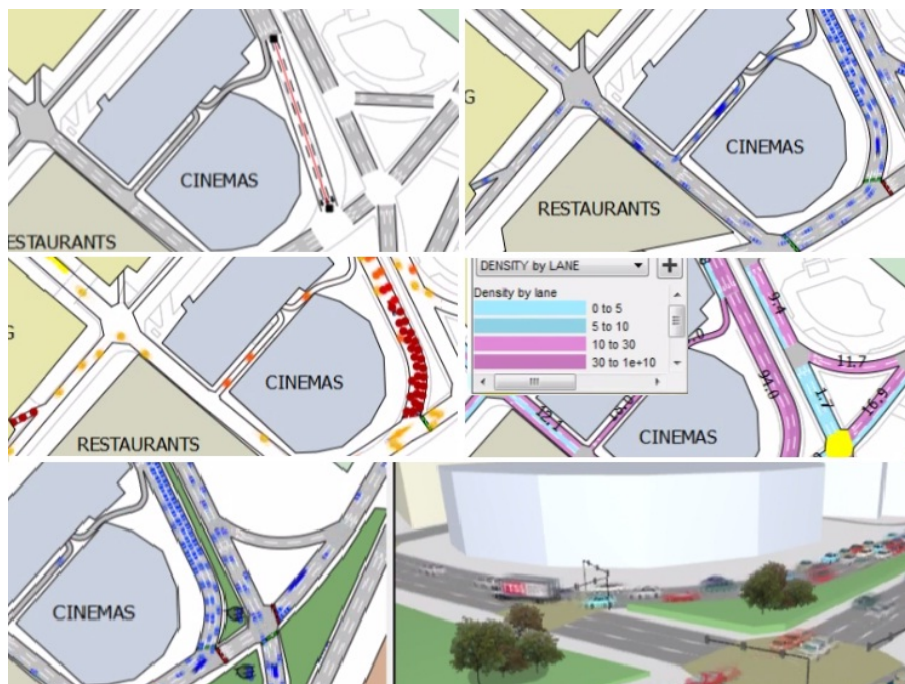
**Figura 3.20:** *VisSim - pode-se observar a simulação com diferentes tipos de veículos, como também o fluxo de pessoas. Os veículos podem trafegar por várias faixas e obedecer certas políticas semafóricas [4]*



**Figura 3.21:** *VisSim - metrô de superfície* [4]

## AIMSUN

Desenvolvido no *Laboratório de Investigación Operativa y Simulación*, o AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban e Non-Urban Networks*) [15, 155] é um simulador de tráfego microscópico e mesoscópico capaz de trabalhar com diferentes tipos de tráfego como redes urbanas, estradas, rodovias, rótulas e vias de grande fluxo. O simulador foi projetado e implementado com objetivo de analisar o tráfego e auxiliar engenheiros na concepção e avaliação de sistemas de tráfego [16]. Imagens de telas desse *software* podem ser observados na Figura 3.22.



**Figura 3.22:** *Software AIMSUN – nas imagens acima temos o modelo meso em 2D, e mais abaixo, em 3D, o modelo micro. A primeira imagem demonstra a inserção de uma nova rua, conectando-a a duas ligações. As demais imagens retratam diferentes formas do fluxo de veículos (perceptível apenas em uma impressão ou visualização colorida). Pode-se demonstrar apenas veículos como pontos azuis, ou pode-se representar o fluxo com alteração na coloração caso exista um congestionamento e por fim pode-se expor as ruas através de numeração e coloração conforme sua densidade [16]*

O AIMSUN permite armazenar diferentes tipos de edições e comparações de cenários distintos. Também é possível acomodar vários cenários em uma mesma rede, como: plano de controle, horários de transporte público e ações de gestão de tráfego. Pode-se encontrar no site do AIMSUN um diversificado estudo de caso <sup>15</sup> ao redor do mundo, entre eles um projeto para as Olimpíadas de 2016 no Rio de Janeiro.

As demandas no AIMSUN podem ser definidas, em intervalo de tempo, de duas maneiras: por fluxo em trechos <sup>16</sup> (tipo de veículo e de atributos, classe de veículos, fluxo (demanda) no trecho para cada tipo de veículo, etc.) ou por meio de uma matriz OD (definição de origens e destinos, tipos de veículos e suas classes). AIMSUN não apresenta uma tela específica para exibição de demandas.

<sup>15</sup><http://www.aimsun.com/wp/?cat=3>

<sup>16</sup>pequenas partes de uma via

### EMME 3

EMME 3 é um software multiplataforma de alocação de demanda de tráfego que possui um ambiente integrado com recursos para o desenvolvimento de modelagem de rede viária, administração, visualização e análise, e de dados e emissão de relatórios. [120, 101].

O *software* permite a realização de consultas (símbolos, texto, nós, segmentos de trânsito e cruzamentos) personalizáveis. Uma de suas funcionalidades é a comparação de diversos cenários, além da seleção de elementos individuais para comparação. Já o seu editor de rede possui precisão geométrica para modelagem de complexas curvas, evitando a utilização de nós intermediários (nós falsos) na modelagem da malha.

Ele oferece também alocações personalizadas, permitindo desde alocações incrementais até estratégias estocásticas de equilíbrio de usuário. O EMME 3 permite a aplicação de restrição de tráfego para bicicletas, caminhões, etc, e a inclusão de privilégios a certas classes de veículos. O software possibilita a gestão do transporte público (atribuição de horários, agendamento, etc.). Imagens das telas do EMME 3 são apresentadas nas Figuras 3.23 e 3.24.



**Figura 3.23:** *Software EMME 3 – exemplo de visualização de gráfico de pizza, definição de volume de trânsito (largura da rua) e também itinerários como as linhas verdes e vermelhas [120]*



**Figura 3.24:** Software EMME 3 - cada segmento da rota mostra a quantidade de passageiros em pé ou sentados. O gráfico de barras de coloração vermelha indica um número além da capacidade normal [120]

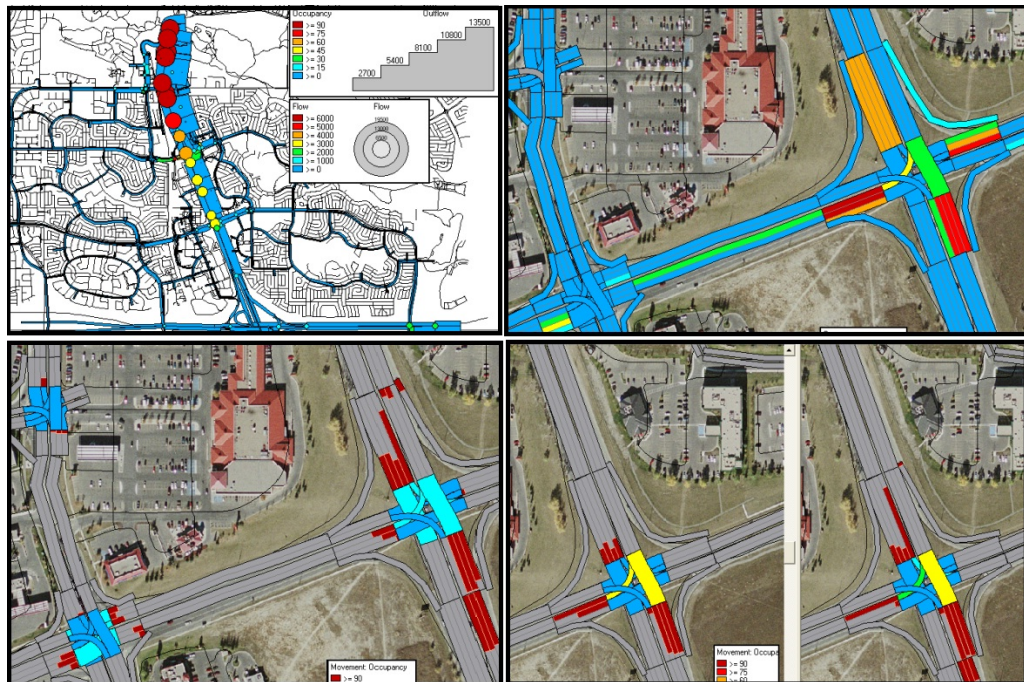
## Dynameq

Dynameq (*Dynamic equilibrium*) [184, 130] é um simulador baseado em um modelo de alocações dinâmicas de tráfego (DTA). Ele possui basicamente dois tipos de componentes: (1) fluxo de tráfego, que simula todos os aspectos de um processo de dirigir, como decisões para aceleração e desaceleração, semáforos, interações com outros veículos, mudança de faixas e manobras; e um (2) modelo de roteamento que reproduz a escolha da rota pelo motorista em uma malha viária a fim de atingir seu objetivo.

O Dynameq implementa um modelo microscópico que representa o tráfego como um fluido e é baseado na hidrodinâmica ou *gas-kinetic*.

As seguintes funcionalidades estão disponíveis no sistema: planejamento e gerenciamento de estradas, rampas, fechamento de faixas para manutenção; estratégias com diferentes classes de veículos, como proibição e reserva de faixas para caminhões; e evacuação ou o roteamento de tráfego, em resposta a um acidente ou construções (que causem interdições nas vias) podem causar.

Dynameq apresenta a demanda de tráfego como uma matriz OD, uma para cada classe de veículos com registro de tempo. Entretanto, o *software* não possui uma representação visual de demandas.



**Figura 3.25:** Software Dynameq - cores quentes indicam uma grande concentração de veículos, assim como os retângulos próximos aos cruzamentos indicam a existência de filas ou tráfego intenso [184]

A Figura 3.25 apresenta algumas das possíveis visualizações no Dynameq. A largura das barras e a coloração avermelhada, na parte superior da imagem, representam o aumento de fluxo.

## DRACULA

O DRACULA (*Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation*) foi desenvolvido pelo Instituto de Estudos em Transportes da Universidade de Leeds - Reino Unido, e sua última atualização ocorreu em julho de 2008 [122, 121, 156].

A abordagem da simulação de tráfego implementada pelo DRACULA é um modelo microscópico, estocástico, discreto no tempo e contínuo no espaço, que representa veículos através de rotas pré-estabelecidas.

O software permite simular a evolução do tráfego, observando períodos com ênfase em escolhas individuais e na movimentação individual de veículos. A evolução dos veículos na rede é estimada através de modelos de *car-following* e *lane-changing*, considerando o comportamento desejado dos motoristas, a sinalização e o controle nas interseções e arcos.

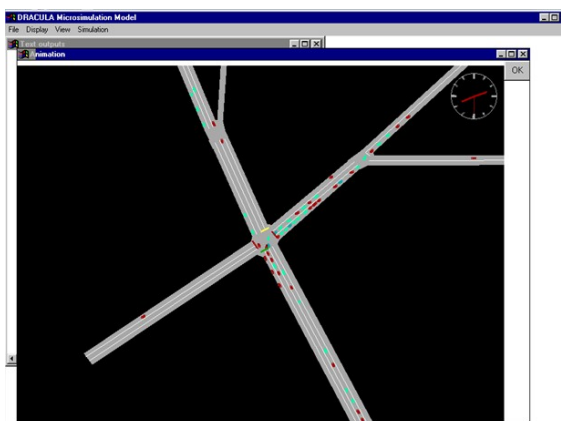
O DRACULA também possui a modelagem de três tipos de interseção: semafórica, prioritária e rotatória. Ele permite ainda a simulação com vários tipos de veículos,

como carro, ônibus, táxi, etc. E cada tipo de veículo possui suas características como tamanho, tempo de reação do motorista, aceleração normal e máxima, e desaceleração normal e máxima.

No que se refere à modelagem da rede viária, o DRACULA permite pistas de mão dupla, pista de único sentido, ruas com duas pistas, conversões proibidas, restrição de acesso, e pista bloqueada parcialmente ou totalmente por espaço de tempo.

Sua plataforma possibilita a troca de dados com o modelo macroscópico SATURN [156] (Figura 3.26).

DRACULA também não possui uma representação visual de matrizes de tráfego.



**Figura 3.26:** DRACULA – exemplo de simulação do tráfego, onde os traços são veículos [122]

## SATURN

SATURN (*Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks*) é um *software* de alocação de tráfego que incorpora uma estrutura de simulações de interseções viárias. O modelo foi criado no Instituto de Estudos em Transportes da Universidade de Leeds, no Reino Unido. E é composto, basicamente, por módulos: um de simulação, que modela o comportamento dos cruzamentos do sistema, e o outro de alocação de tráfego, que escolhe as rotas a serem utilizadas [192, 93].

Segundo Liu et al.[123], o SATURN permite a construção de um modelo de simulação macroscópica, mas pode assumir o comportamento de um modelo mesoscópico. Alguns artigos [27, 17, 191] apresentam as etapas para construção de modelos no SATURN e apresentam cinco passos: (1) concepção do modelo, (2) codificação e coleta de dados, (3) calibração, (4) validação e (5) modelagem.

Os dados da rede viária têm como base conversões (fluxo de saturação, faixas disponíveis e prioridade entre fluxos opostos), arcos (comprimento, velocidade e o número de faixas) e interseção ou faixas (o tipo de interseção que pode ser: prioridade, semafórica, rotatória e as coordenadas cartesianas).

O SATURN oferece uma série de recursos como:

- alterações no *layout* de cruzamentos – introdução de rotatórias e canalização de fluxos;
- mudanças nos tempos da programação e otimização semafórica;
- criação de novas vias como também a alteração do sentido das mesmas;
- construção de vias elevadas e túneis;
- análise de impactos no tráfego devido à implantação de novos polos geradores de viagens (escolas, indústrias, etc.); e
- atualização e estimação de matrizes a partir de contagens volumétricas.

O SATURN oferece a alocação de tráfego segundo alguns princípios, como "tudo-ou-nada", equilíbrio de Wardrop, alocação de tráfego para múltiplas classes de usuário, alocação puramente estocástica e equilíbrio do usuário (SUE – Stochastic User Equilibrium). O princípio de escolha de rotas (padrão) é baseado no Princípio do Equilíbrio de Wardrop [162]. O algoritmo de composição de rota é o algoritmo de Frank-Wolfe [114, 68].

O modelo exige dois conjuntos de dados do período modelado: a descrição da rede viária e a quantificação da demanda na forma de matriz origem-destino. A demanda de tráfego no SATURN é expressa na forma de matriz origem-destino. O *software* não apresenta uma interface visual para a demanda de veículos.

## CORSIM

O CORSIM (CORridor SIMulation) foi desenvolvido pelo FHWA (Federal Highway Administration) no final da década de 70 [80]. Ele é responsável pela simulação microscópica dos modelos da família TRAF (conjunto de ferramentas de simulação sobre o tráfego), sendo basicamente composto pelos programas FRESIM (vias expressas) e NETSIM (redes urbanas) [77].

O CORSIM possui como objetivo combinar os dois modelos citados sob um programa simples de controle [113]. Algumas funções internas do modelo CORSIM permitem a avaliação de importantes parâmetros de tráfego, tais como o atraso, o tempo de viagem e o comprimento de fila, entre outros. (Figura 3.27).



**Figura 3.27:** Simulação de um cruzamento com CORSIM [80]

O FRESIM e o NETSIM podem ser codificados e conseqüentemente simulados a partir de simples dados de entrada. Esses dois modelos são os principais suportes do programa TSIS (Traffic Software Integrated System). É importante observar a existência do modelo TRAFVU, que realiza a interação gráfica do programa TSIS, tendo como objetivo exibir uma animação da rede viária e conseqüentemente analisar os resultados das simulações de uma forma mais rica em termos de detalhes [113, 25].

O volume de tráfego é registrado por matrizes OD em um delimitado espaço de tempo. Para cada registro, pode-se indicar o tipo de veículo. Todavia, o software não representa visualmente essa informação.

## **PETGYN**

O software PETGYN (Problema de Equilíbrio de Tráfego em Goiânia) [99, 100] possibilita a modelagem e simulação do tráfego urbano. O sistema foi desenvolvido pelo departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Goiás. O PETGYN permite a tomada de decisão de possíveis alterações na malha viária. Tais alterações incluem, mas não limitadas a estas: criar ou remover vias, alterar sentido de fluxo, adicionar ou remover faixas, limitar velocidades, ponderar a temporização de semáforos, etc. Atualmente, o PETGYN recebeu inúmeras melhorias, como exemplo, novos métodos de estimação de matrizes OD (inclusive multimodal), novos modelos matemáticos de simulação e otimização de algoritmos para alocação de tráfego. O software PETGYN irá incorporar as principais visualizações geradas por este trabalho.

---

## Proposta de Classificação para Visualizações do Tráfego Urbano

---

Percebe-se que grande parte dos trabalhos que apresentam visualizações do tráfego urbano, analisados no capítulo anterior, são fortemente centrados em abordagens de projeção geométrica. Porém, suas visualizações podem, em geral, até serem reclassificadas de forma diferente pela mesma taxonomia adotada. A reclassificação é possível porque uma visualização nem sempre apresenta somente uma técnica, mas sim um agrupamento delas; ou seja, as visualizações podem ser híbridas, ocupando várias classes ao mesmo tempo, dificultando assim a sua classificação. De acordo com Tory *et al.* [187], há uma lacuna entre as atuais classificações de VI, visto que, em sua maioria, são genéricas e não conseguem atender todas as necessidades de algumas áreas. Os autores assim defendem a necessidade de se criar taxonomias específicas para áreas que apresentem regras e características muito exclusivas.

Como o tráfego urbano apresenta diversas particularidades, decidiu-se criar uma classificação alternativa para visualizações voltadas a este cenário. A abordagem utilizada segue a linha das classificações de alto-nível e, com isso, espera-se facilitar a comparação entre as VI, bem como identificar possibilidades de pesquisa ainda pouco exploradas<sup>1</sup>.

A classificação proposta originou-se dos trabalhos levantados no Capítulo 3, de conversas oriundas dos *stakeholders* (definidos no Capítulo 5) bem como das perguntas que as visualizações propostas deveriam responder (também no Capítulo 5). Tais contribuições forneceram informações necessárias para identificar como elementos principais de uma classificação as origens dos dados, os tipos de dados necessários e as principais operações/tarefas realizadas em sistemas computacionais voltados ao cenário do tráfego urbano. Basicamente, propõem-se três elementos (também ilustrados na Figura 4.1) para:

- **Origem dos dados.** Uma representação visual pode conter inúmeros dados. Entretanto, tais informações podem ser oriundas de diversas fontes e isso reduzir a

---

<sup>1</sup>Uma versão inicial desta classificação e sua aplicação para comparar artigos na área aparecem também no trabalho [76].

<b>Origem dos Dados</b>	<i>Crowdsourcing</i>
	Medições Públicas
	Estimativas
<b>Tipo de Dados</b>	Matriz OD
	Infraestrutura de rede
	Flexibilidade de elementos da rede
	Fluxo
	Alto nível de significância dos dados
<b>Tarefas Alvo</b>	Apresentação dos dados
	Entrada de dados
	Simulação e exploração

**Figura 4.1:** Classificação em alto-nível para visualizações sobre o tráfego urbano.

confiança e a exatidão das informações apresentadas [8]. Por tanto, foram definidos três diferentes tipos de origem de dados:

- ***Crowdsourcing***: a informação de cada indivíduo é captada e armazenada juntamente com os dados de outros usuários. Este conjunto de dados, se bem explorado, pode identificar padrões, tendências e diversos outros tipos de informações. Por exemplo, o aplicativo Waze visa contribuir para uma melhor vazão do fluxo de veículos, utilizando-se de informações dos próprios usuários enquanto trafegam pelas vias. Essa estratégia de origem de dados é sem dúvida a mais barata e consegue atingir inúmeras pessoas e locais em um curto espaço de tempo. Atualmente, esse campo ainda é pouco explorado, mas parece ser promissor uma vez que *hardware* e *software* estão a cada dia mais acessíveis.
- **Medições públicas**: os dados podem ser oriundos de sensores, câmeras ou até de estudos de campo (entrevistas, contagens volumétricas, etc.). Esta abordagem é a mais comum dentre as diversas formas de se abstrair informações sobre o tráfego. Apesar disso, ela também é a mais cara, pois implica em

gasto com instalações, mão de obra especializada e manutenção (sensores e câmeras, etc.). Seu outro grande problema é a área de cobertura, já que são observadas somente regiões de interesse ou que possuam um grande número de tráfego. Há de se considerar que as informações geradas nessa abordagem são mais confiáveis. A confiança aqui citada é em relação ao rigor do método aplicado de coleta e compilação dos dados, o que garante maior coerência a perenidade das informações. Em contra posição, no *crowdsourcing*, se um usuário reportar um engarrafamento e nenhum outro usuário (do mesmo *software*) passar em seguida na mesma localidade, esta informação será inútil, pois terá pouca velocidade ou ficará rapidamente desatualizada (não é possível saber o estado real do trânsito).

- **Estimativas:** a origem dos dados pode variar conforme os itens listados anteriormente, mas o seu diferencial está na quantidade e qualidade de informações consideradas. Essa opção é bem vinda quando se dispõe de poucas informações como, por exemplo, da medição de fluxo em algumas avenidas principais e em alguns horários do dia. Por meio de estatísticas, pode-se chegar a valores aproximados da real condição do tráfego em outras localidades e/ou horários.
- **Tipo de dados:** as visualizações são agrupadas de acordo com o principal tipo de dados sobre tráfego que elas apresentam. Estes tipos incluem, mas não estão limitados aos seguintes: matrizes OD (representação de demandas modais ou multimodais e variação temporal), infraestrutura fixa de rede (estrutura que necessite de intervenção física, por exemplo: ruas, estradas, pontes e cruzamentos), elementos flexíveis de rede (que podem ser mudados com pouca ou nenhuma intervenção de infraestrutura, tais como a direção da pista, limites máximos de velocidade, configurações de sinal de trânsito, restrições de conversão, autorização ou proibição de estacionamento ao longo da via, pedágios, etc.), as medições de fluxo ou estimação do fluxo, e dados de alto nível significativo (tais como, informações sobre acidentes de carro e buracos na via, entre outros eventos). Pode-se ver que esses dados podem ser naturalmente organizados em níveis de uma forma de múltiplas camadas hierárquicas, como é feito geralmente em sistemas de informação geográfica. Portanto, pode-se classificar ainda uma visualização de tráfego de acordo com o fato de ter sido concebida para apresentar uma determinada camada de dados ou uma combinação das mesmas.
- **Tarefa alvo:** neste caso, as visualizações são classificadas de acordo com o tipo de tarefa que se destinam a apoiar. Tais tarefas são operações que os usuários podem realizar sobre as visualizações. Elas podem variar desde a exibição dos dados, interações até o uso de simulações (pode envolver o uso de vários cenários). Para isso, definiu-se três tipos de tarefas. A primeira é simplesmente apresentar

os dados de tráfego para a compreensão global e para a identificação de padrões. Trata-se de mostrar os dados e, possivelmente, permitir a interação de controle nos atributos da visualização ou a aplicação de filtros. O segundo tipo de tarefa é a entrada de dados. Embora os componentes de interface do usuário, como caixas de diálogo, tabelas e campos de texto, sejam usados para entrada de dados em um sistema de tráfego, cogita-se uma maneira mais intuitiva e visualmente orientada de entrada de informações por meio da manipulação direta dos elementos de uma visualização. O terceiro tipo de tarefa é simular e explorar o comportamento (micro, meso ou macroscópico) do tráfego através da exploração de múltiplos cenários das condições da rede viária e do trânsito. A simulação é muito comum em sistemas de apoio à decisão para a engenharia de tráfego, sendo frequentemente combinada com a possibilidade do usuário explorar mudanças alternativas na malha viária e nos demais elementos do tráfego a fim de obter melhores resultados. Pode-se dizer que trata-se de uma agregação das duas tarefas anteriores a fim de permitir que o usuário atinja um objetivo mais complexo. Da mesma forma que o primeiro e o segundo critérios de classificação, este terceiro não é mutuamente exclusivo em suas opções. É permitida a presença de duas ou todas as três tarefas alvo simultaneamente.

As visualizações foram divididas conforme a classificação proposta e o resultado se encontra na Tabela 4.1. De acordo com esta informação, pode-se ver que existe a necessidade de novas investigações de métodos de visualização interativa para determinadas tarefas e tipos de dados de tráfego. Além disso, uma série de técnicas emergentes em IHC não têm sido geralmente utilizadas por pesquisadores que trabalham neste domínio. Foram identificadas também várias limitações das atuais abordagens: sobreposições visuais, manipulação de grande volume de dados, processos dinâmicos (tempo e modos de transporte) e tomada de decisão.

É importante notar que, para muitas tarefas e tipos de dados do tráfego urbano, as técnicas de visualização que foram estudadas se revelaram ineficazes ou ineficientes. Por exemplo, uma forma tradicional de se exibir a orientação do fluxo nas ruas e de conversões permitidas ou proibidas em cruzamentos é por meio de desenho de setas. No entanto, quando a rede é grande, torna-se praticamente impossível visualizar esses detalhes em um mapa cartográfico. Um *zoom* interativo pode atenuar tal problema, mas às custas de comprometer a percepção da rede completa. Além disso, ele não permite a visualização simultânea de forma eficaz de múltiplas regiões em detalhe na rede. Entretanto, existem pesquisas inovadoras como a de Sewall *et al.* [164] que utiliza a realidade aumentada ao longo de um mapa 2D para apresentar animações de veículos em movimento. Isto possibilita uma melhor percepção da direção do fluxo enquanto preserva um nível de *zoom* geral. Por outro lado, a abordagem de Sewall *et al.* exige alto poder de processamento, não exibe as características da rede em regiões onde há ausência de fluxo, e não fornece

uma boa visualização da orientação do fluxo em interseções com muitos cruzamentos e conversões permitidas.

A abordagem Flowstrates [29], como outro exemplo, melhora a compreensão das matrizes de origem-destino, mas tem várias limitações. Ocorrem muitas sobreposições visuais quando o número de pares OD são selecionados. Ela também não mostra como as demandas OD são traduzidas em fluxo de tráfego real, especialmente quando se considera uma rede de tráfego urbano com muitos caminhos de fluxo possíveis.

Em geral, as visualizações existentes sofrem dois problemas principais: a sobreposição visual na medida em que o tamanho do conjunto de dados aumenta, e uma incapacidade de apresentar diferentes tipos de dados de forma integrada (estruturas de rede, matrizes OD, rotas e volume de fluxo de tráfego, etc.). É também difícil desenvolver uma visualização robusta que produza resultados visuais aceitáveis para todos os cenários do tráfego, uma vez que estão sendo considerados sistemas dinâmicos, nos quais pequenas mudanças de estrutura de rede podem resultar em comportamentos de fluxo de veículos totalmente diferentes.

Por fim, a maioria das propostas de Visualização de Informações do tráfego urbano desenvolvidas até o momento supõem uma plataforma convencional de interação humano-computador, formada por *mouse*, teclado, monitor e, eventualmente, um *tablet* ou tela sensível ao toque. Pouquíssimos pesquisadores têm investigado o uso de novas abordagens de IHC para essa área como, por exemplo, o uso da realidade aumentada, computação móvel e ubíqua. Exemplos raros, nesse caso, incluem os trabalhos realizados no projeto *Copenhagen Wheel*.

Alguns exemplos interessantes estão surgindo nos processos de coleta de dados de tráfego. Por exemplo, o projeto *Copenhagen Wheel*<sup>2</sup> que consiste em uma roda elétrica (chamada "hub") que transforma qualquer bicicleta comum em uma *e-bike* híbrida com um motor, baterias, GPRS, e sensores de umidade, dióxido de carbono, temperatura e ruído. Enquanto um ciclista segue a rota, os sensores coletam informações e as enviam para um dispositivo a cada dois segundos via *Bluetooth*.

Assim, há também um amplo espaço para inovação na coleta e na visualização interativa de dados do tráfego urbano usando interfaces não convencionais. Este aspecto, contudo, não é explorado no presente trabalho ficando assim como sugestão para pesquisas futuras.

---

<sup>2</sup><http://senseable.mit.edu/copenhagenwheel/>

**Tabela 4.1:** Proposta de classificação para visualizações voltadas para o tráfego urbano

Artigos com visualizações	Origens			Tipos de Dados				Tarefas Alvo			Ano	
	Crowdsourcing	Medições Públicas	Estimativas	Matriz OD	Infraestrutura de Rede	Elementos Flexíveis de Rede	Fluxo	Alto nível de significância dos dados	Apresentação dos Dados	Entrada de Dados		Simulação e Exploração
[118]	x			x					x			2015
[117]	x			x			x	x	x			2015
[134]	x			x			x		x			2015
[172]	x			x				x	x			2014
[210]	x			x			x	x	x		x	2013
[124]	x			x			x		x			2012
[132]	x			x	x		x		x		x	2012
[163]	x			x			x		x		x	2011
[164]	x			x	x		x		x		x	2011
[107]	x			x			x	x	x		x	2011
[29]	x			x			x		x			2011
[79]	x			x			x	x	x			2011
[61]	x			x			x	x	x		x	2010
[205]	x			x	x		x		x			2010
[105]	x				x		x	x	x		x	2009
[197]	x			x			x		x	x	x	2009
[188]	x			x			x	x	x			2009
[170]	x						x		x			2008
[207]	x			x			x	x	x		x	2008
[41]	x			x	x				x			2008
[196]	x			x				x	x		x	2008
[129]	x			x			x	x	x		x	2007
[178]	x			x			x	x	x	x	x	2007
[125]	x						x	x	x			2006

---

[47]	x		x	x			2005	
[199]	x		x	x	x	x	x	2005
[60]	x	x		x	x	x		2004
[26]	x		x	x	x	x	x	2003
[30]	x		x		x	x		2003
[50]	x		x	x	x	x	x	2000
[104]	x	x			x		x	1998

---

## Visualizações Propostas para Matrizes Origem-Destino

---

Matrizes, em geral, têm sido representadas visualmente por diversas técnicas, dentre as quais pode-se destacar: *Scatterplot Matrix* [62, 194], *Proseccion Matrix* [37], *HyberSlice* [37], *Hyberbox* [37], *Table Lens* [148], entre outros.

Apesar dessas técnicas serem interessantes, elas não atendem todas as demandas de uma visualização de matriz OD, pois, de maneira geral, não possuem informações de posicionamento geográfico. Além disso, os deslocamentos de veículos (ou de pessoas) em um par OD não são diretamente ligados de um ponto a outro na rede viária, como uma linha de voo. Eles seguem por caminhos ou rotas que geram efeitos no tráfego. Logo, é importante observar a relação entre a matriz e o seu efeito no trânsito.

Por outro lado, no estudo de revisão bibliográfica da área, apresentado no Capítulo 3, através da Tabela 4.1 e sumarizado no Apêndice F foi verificado que existem poucos trabalhos de visualização aplicados ao tráfego urbano, inclusive para matrizes OD. Grande parte dessas visualizações também não se preocupam com aspectos dinâmicos (temporais) e multimodais, nem com a densidade de dados. Apesar de haver contribuições nesses trabalhos, ainda persistem as mesmas dificuldades [38, 39, 98, 97, 183] de se criarem novas visualizações, descritas no Capítulo 3. Em nenhum trabalho anterior, houve uma proposta que auxiliasse outros pesquisadores na construção de novas visualizações para o tráfego urbano, em especial para matrizes ODs.

Inicialmente, com o objetivo de auxiliar outros pesquisadores na construção de novas visualizações de matrizes OD, definiu-se a elaboração de perguntas, às quais as visualizações poderiam responder ou conter algumas das características desejadas. As perguntas levantadas foram obtidas por meio de duas etapas. A primeira etapa consistiu da leitura de trabalhos relacionados à área (discutidos em capítulos anteriores). Ou seja, identificou-se os principais problemas e características descritos em cada trabalho. A segunda etapa envolveu o levantamento dos requisitos essenciais para a análise de matrizes OD por meio de diversos especialistas da engenharia de tráfego urbano da região de Goiânia, tais como: da Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos (CMTC), da Secre-

taria Municipal de Trânsito (SMT), do Núcleo de Pesquisa em Transportes (NPT-UFG), do Curso de Engenharia de Transportes da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UFG, além de colegas pesquisadores pertencentes ao grupo de trabalho do projeto PET-Gyn (Problema de Equilíbrio do Tráfego – Goiânia). Tal levantamento de informações contou com um total de sete *stakeholders*. Como resultado desse trabalho, foram identificadas então 13 perguntas principais que poderiam guiar o desenvolvimento de novas visualizações voltadas ao entendimento das condições do tráfego urbano e de sua associação com as matrizes Origem-Destino. Essas perguntas são apresentadas abaixo:

- P01 – É possível observar o volume do fluxo de veículos?
- P02 – É possível observar o posicionamento geográfico dos pares OD?
- P03 – A visualização possui escala temporal?
- P04 – É possível verificar o modo de transporte/veículo na representação?
- P05 – É possível identificar se a matriz é esparsa ou densa?
- P06 – É possível observar as rotas de tráfego geradas entre os pares OD?
- P07 – A visualização apresenta recursos de interação, como filtros, que auxiliem na seleção de pares OD de interesse?
- P08 – É possível filtrar a exibição de informações de acordo com o estado do trânsito (congestionamento, maior fluxo e menor fluxo)?
- P09 – A metáfora utilizada é de fácil compreensão?
- P10 – A visualização apresenta mais de uma representação visual?
- P11 – A representação suporta uma grande quantidade de dados?
- P12 – O mapa possui informações suficientes para que o usuário possa identificar a região de interesse?
- P13 – A visualização oferece algum recurso que ajude o observador na identificação e na realização de tarefas (como textos ou ícones ou formas alternativas de acionar um menu suspenso contextualizado)?

Com essas perguntas em mente, foram então elaboradas diversas propostas de visualizações para matrizes OD. A seguir, são apresentadas as visualizações propostas com uma breve descrição.

## 5.1 Visualizações Propostas

As visualizações descritas a seguir combinam técnicas de VI já existentes com diferentes mapeamentos visuais a fim de facilitar a adição de novas informações<sup>1</sup>. As VIs propostas contemplam a percepção dos seguintes itens: pontos de origem e respectivos

---

<sup>1</sup>De acordo com os trabalhos publicados [76, 74, 75]

destinos, tipos de transporte envolvidos, horários e dias da semana, volume da demanda de veículos e áreas com congestionamento.

Uma sequência de círculos numerados foi introduzida nas visualizações para permitir a referência no texto a componentes visuais específicos. Outro ponto a se observar é que algumas das visualizações, descritas a seguir, não possuem mapas. Eles foram suprimidos para facilitar a explicação/representação da visualização. O termo “agregado” será usado para lembrar ao leitor que a representação visual é apenas um recurso de interação de um mapa geográfico.

Antes de iniciar a apresentação de cada visualização, pode-se adotar as seguintes definições para as representações de Matriz OD e para o Fluxo. Logo, espera-se que, ao se referenciar esses termos, tenha-se em mente os seus respectivos atributos.

- **Matriz OD**

- Atributos: origens, destinos, relação de par OD, volume de produção de viagens (para cada origem), volume de término de viagens (para cada destino), volume da demanda de deslocamento (para cada par OD), sentido do deslocamento (da zona A para zona B), tipo modal ou de veículo, dias e horários aos quais a matriz se refere.

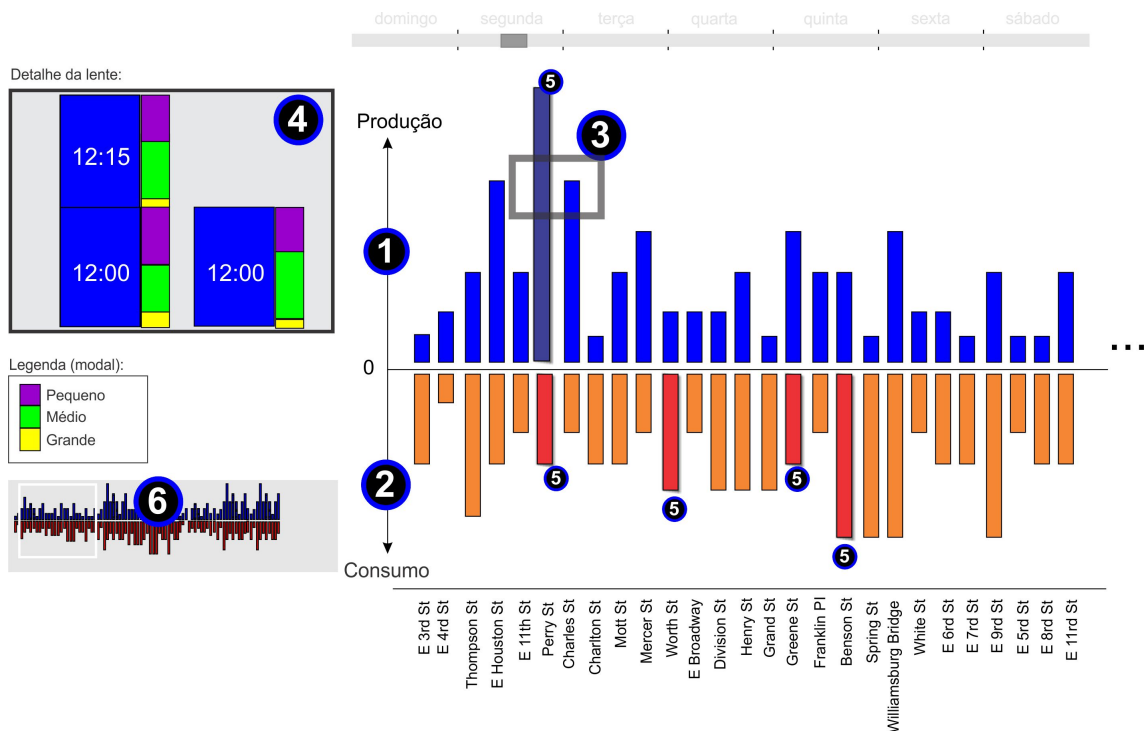
- **Fluxo** – deslocamento dos veículos na malha viária.

- Atributos: rota ou caminho do fluxo (sequência com uma ou mais ruas/avenidas que o fluxo percorre), pares OD relacionados, volume total de veículos trafegando na rota ou por par OD e/ou por modalidade ou tipo de veículo, sentido do fluxo, etc.

Um resumo do mapeamento visual e do funcionamento de cada visualização é apresentado a seguir. Ao final, serão apresentadas algumas tabelas indicando, respectivamente, uma síntese das principais características e as perguntas que cada visualizações foi capaz de responder/atender.

A visualização mostrada na Figura 5.1 é agregada e utiliza um gráfico de barras espelhado a fim de refletir os volumes de deslocamento totais de origem (produção - item 1) e de destino (atração - item 2) para cada zona da malha viária em um determinado intervalo de tempo (barra de tempo na parte superior da imagem). A modalidade de veículos pode ser vista através da ampliação do gráfico de barras, conforme exemplo (item 3 e 4). Note que, uma estreita barra segmentada (item 4) é posicionada logo à direita da barra em seleção. A coloração da barra indica os diferentes modos de transporte que trafegam entre os pares ODs. É possível observar também uma representação compactada do gráfico de barras *Overview* mostrado no item 6. Tal técnica pode auxiliar o usuário a explorar uma grande quantidade de dados. Os recursos de interação, disponíveis na

visualização, envolvem desde a seleção de origens, o que destaca seus respectivos destinos ou vice-versa (itens 5) até a navegação temporal, pelos dias da semana e horários do dia (item 4), por meio da barra de tempo localizada na parte superior da visualização. Zonas com nenhum deslocamento de origem e destino podem ser omitidos.



**Figura 5.1:** Visualização proposta (a)

A Figura 5.2 mostra uma representação (agregada) clássica de matriz OD (item 1). Porém, ao invés de números, cada célula (item 2) da matriz possui uma miniatura de um *treemap*, indicando a demanda e a modalidade de veículos para cada dia da semana. Ao se selecionar uma célula, um *treemap* (item 3) apresenta os dados sobre o volume de deslocamento de veículos entre o respectivo par OD. O *treemap* exibe os volumes através de uma hierarquia que começa com o dia da semana e depois termina com o fluxo por classe de veículos. Em particular, foi usada, na Figura 5.2 uma classificação simplista de veículos de grande porte (GP), Médio Porte (MP) e Pequeno Porte (PP), mas outra divisão poderia ter sido empregada. Uma coloração foi associada a cada faixa de demandas, conforme mostra a legenda de cores (situada a direita na parte inferior da imagem). A tonalidade das cores podem variar conforme o intervalo das faixas, por exemplo: a cor amarela pode variar de 500 a 2000, onde o valor mínimo tende a ser um amarelo claro, enquanto que o valor máximo da faixa tende a ser mais escura.

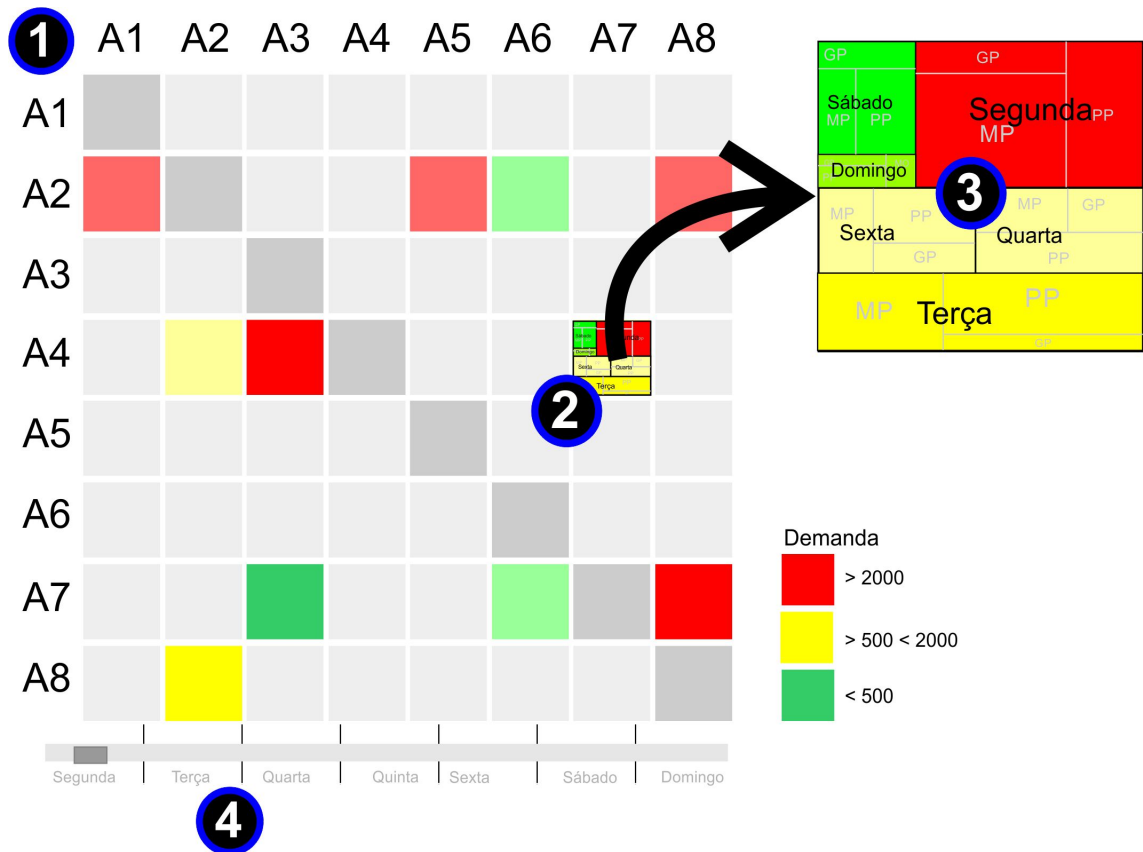
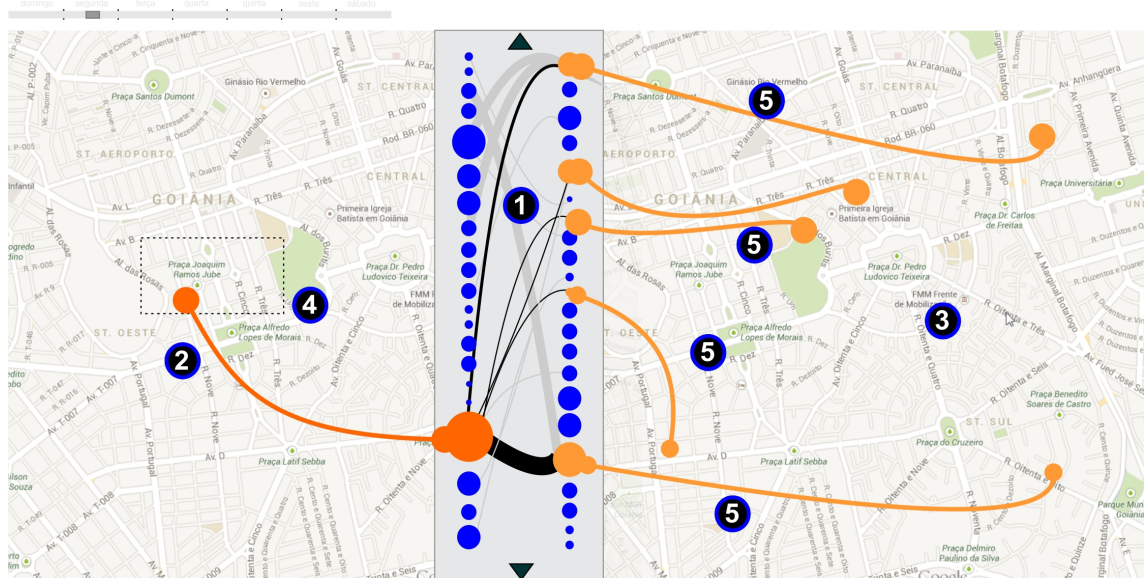


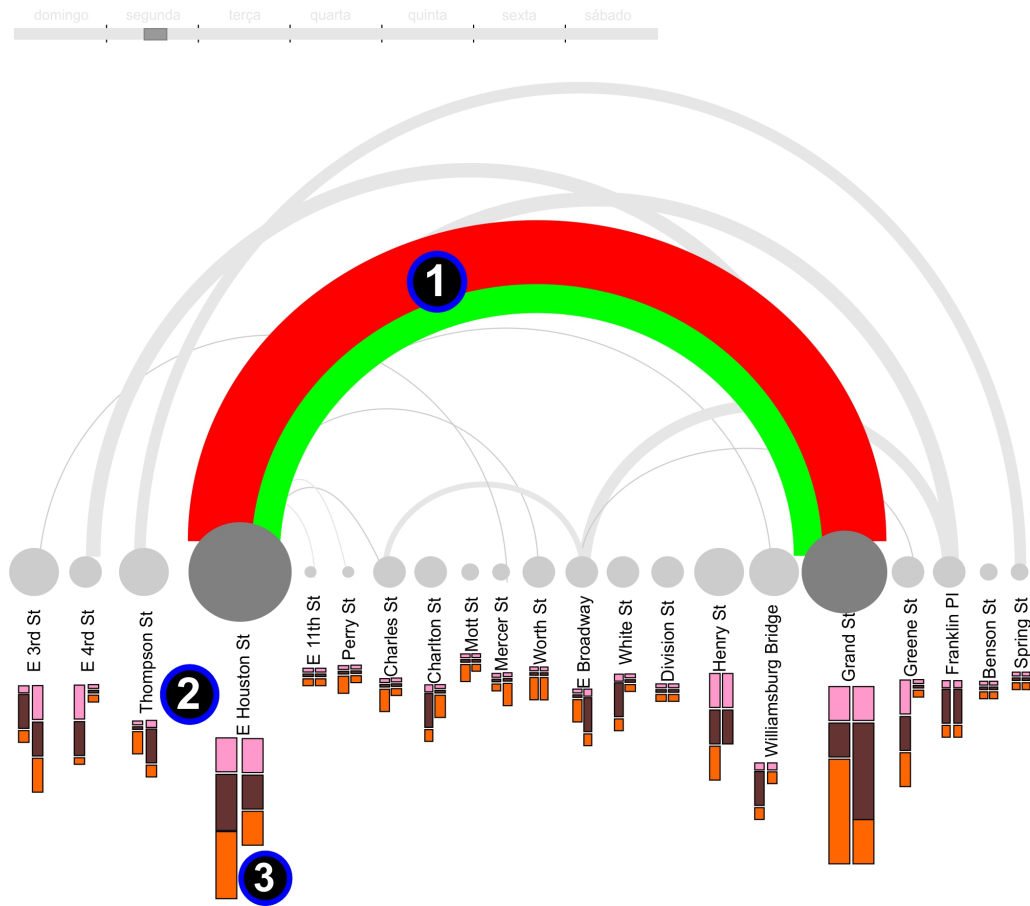
Figura 5.2: Visualização proposta (b)

A Figura 5.3 é uma variação da abordagem de Boyandin *et al.* [29] (ver Capítulo 3), no qual dois mapas são empregados para visualizar separadamente as origens (esquerda) e destino (direita), reduzindo assim a quantidade de cruzamentos entre linhas (nos mapas). Sua diferença principal está na utilização de um grafo bipartido, ao centro, indicando as ligações entre os pares OD (item 1), enquanto que na abordagem original utiliza-se um *heatmap*. Ao se selecionar uma região de interesse (item 4) o ponto de origem (item 2) e os respectivos destinos (itens 5) são realçados. Tanto a espessura das linhas internas e quanto as áreas dos círculos (item 1) indicam o volume da demanda. A técnica de *Edges bundles* pode ser utilizada para compactar o volume de linhas quando as matrizes ODs são muito densas. Acredita-se que a presente abordagem é mais natural, ao seguir o par OD através do grafo do que utilizando um *heatmap*.



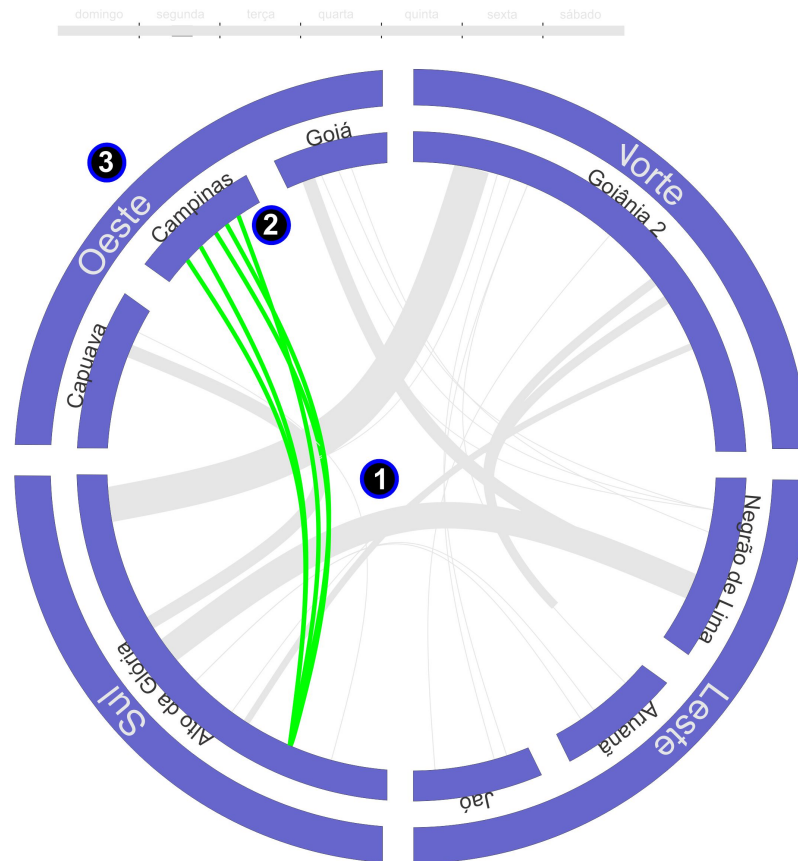
**Figura 5.3:** Visualização proposta (c)

A Figura 5.4 adota um diagrama de arcos (agregado) para apresentar as demandas entre os pares ODs (item 1). Na visualização, cada zona de origem e/ou destino é representada por um círculo (item 2). Tais círculos são ordenados pela proximidade geográfica de cada zona. A atração e a produção de demandas podem ser observadas em um mesmo arco (item 1), a parte superior indica origem, enquanto que a inferior destino. A coloração dos arcos está diretamente relacionada ao grau de congestionamento da via. Abaixo de cada círculo, há um rótulo (item 2) que descreve o nome da zona e mais abaixo tem-se duas barras segmentadas (uma para a origem e outra para o destino, respectivamente) (item 3), representando a contribuição modal de veículos para o par OD (rosa – pequeno, marrom – médio e laranja – grande porte).



**Figura 5.4:** Visualização proposta (d)

A Figura 5.5 exibe um *Radial Table* (agregado) com o uso da técnica *Edge Bundling* (item 1) para concentrar os relacionamentos entre os pares OD (item 2). Nesta representação, há o uso de hierarquia geográfica (itens 2 e 3). A hierarquia pode variar desde grandes regiões (item 3) até pequenos trechos de uma via (circunferências mais internas). A espessura das linhas está relacionada à quantidade de veículos trafegando entre os pares OD em um dado momento. Todavia, a técnica *Edge Bundling* pode agrupar tais linhas e criar uma que melhor as represente. Já a coloração das linhas indica a predominância do nível de congestionamento entre os pares OD (verde–leve, amarelo–moderado e vermelho–intenso). Os recursos de interação possíveis para a visualização são: a seleção dos pares OD sobre a hierarquia desejada (conforme o exemplo do item 2) ou por seleção dos pares OD de forma livre, escolhendo linha por linha.



**Figura 5.5:** Visualização proposta (e)

A Figura 5.6 é composta basicamente por mapas. As origens de tráfego podem ser indicadas na parte inferior da imagem (item 1), em pequenos quadrantes, enquanto os destinos são distribuídos em pequenos círculos no mapa maior (itens 2). A linha representa o par OD que liga os quadrantes aos pequenos círculos, que são os destinos. A espessura dessas linhas indica a demanda de veículos, ao passo que as barras coloridas segmentadas, posicionadas abaixo dos pequenos quadrantes (item 1), representam os diversos meios de transporte. Como no caso anterior, é possível empregar a técnica *Edge bundles* para manter a visualização ainda legível quando o volume de pares OD se tornar consideravelmente maior.

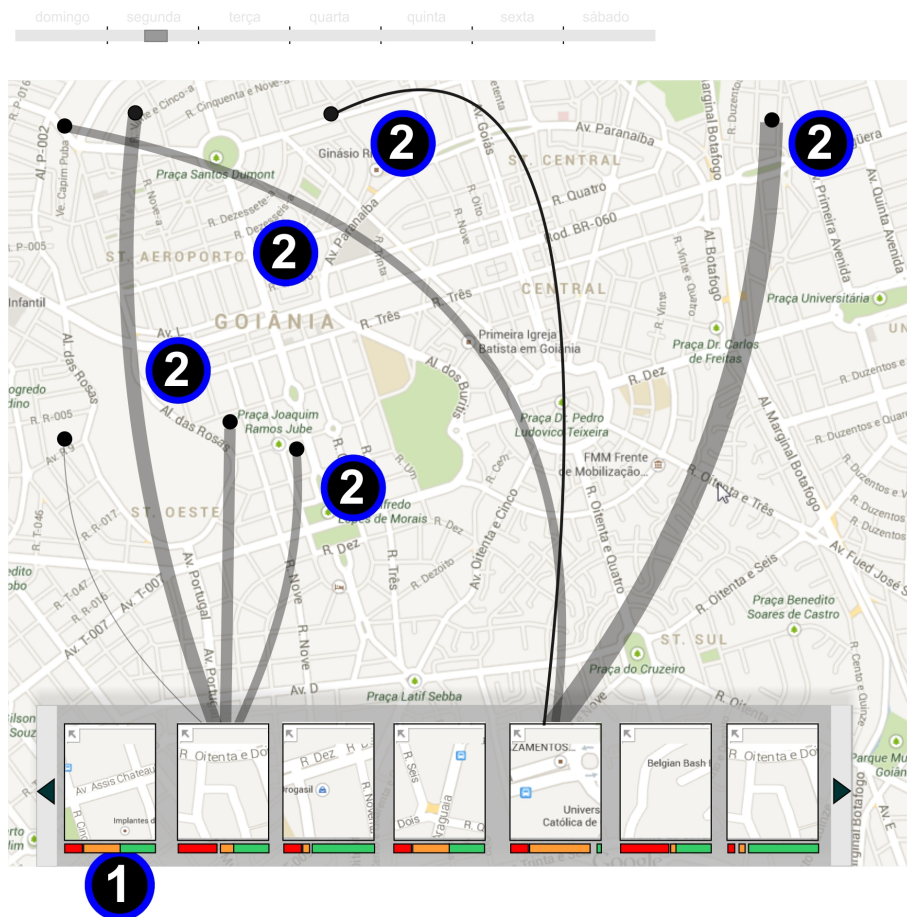
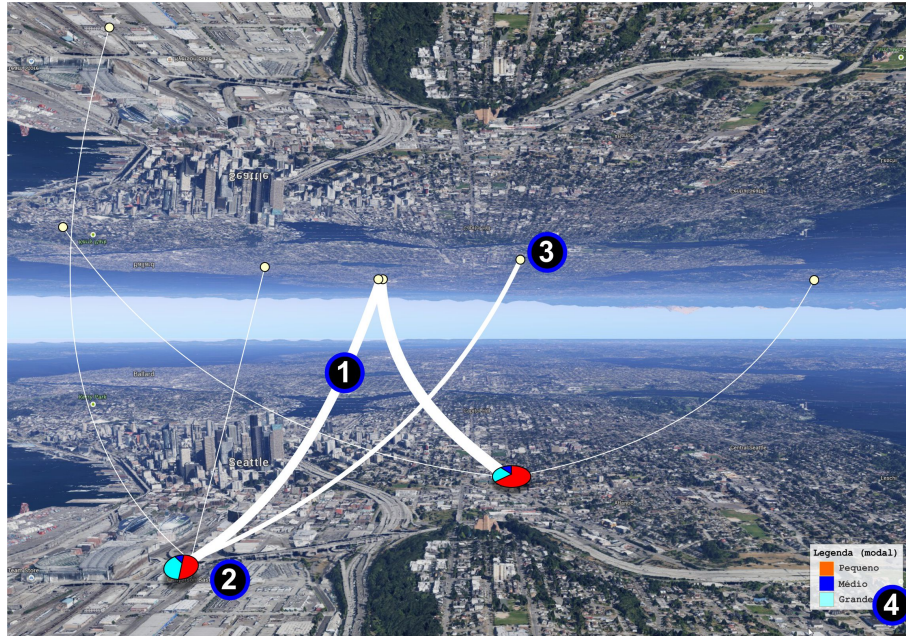


Figura 5.6: Visualização proposta (f)

Já a Figura 5.7 apresenta as relações origem-destino através de dois mapas geográficos posicionados em 2.5D<sup>2</sup>, sendo um o reflexo do outro (a ideia foi inspirada no filme *Another Earth*<sup>3</sup>). A origem é retratada no mapa inferior, enquanto o destino se posiciona na parte superior do mapa. A espessura das linhas (item 1) está relacionada à demanda de veículos que trafegam pelos pares OD (itens 2 e 3). Por outro lado, um gráfico de pizza (item 2) posicionado nas origens, indica a demanda dos diferentes tipos de transportes. Cada modalidade de transporte é descrita pela legenda à direita do mapa (item 4). Essa abordagem visual também foi criada com o intuito de minimizar a sobreposição de linhas à medida que os pares OD aumentam.

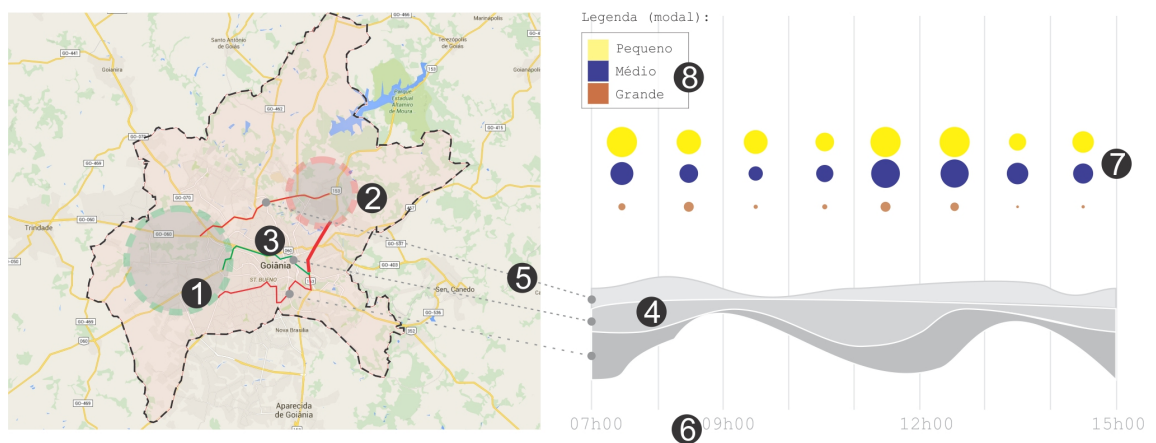
<sup>2</sup>O termo 2.5D indica a utilização de ambiente 3D representando em um plano

<sup>3</sup><http://www.imdb.com/title/tt1549572/>



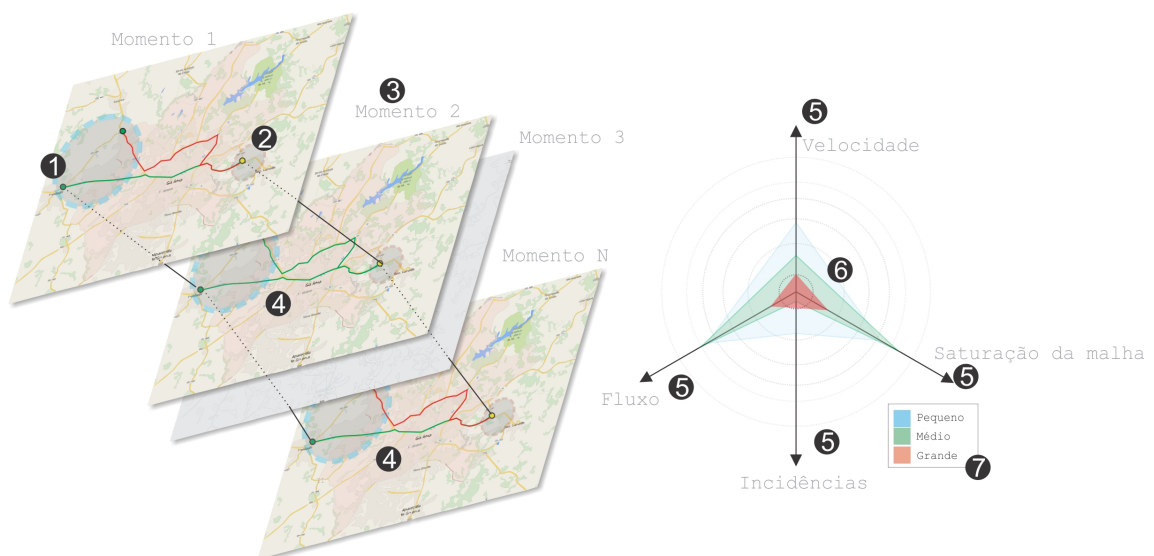
**Figura 5.7:** Visualização proposta (g)

A Figura 5.8 mostra um mapa com a visualização clássica de fluxo de veículos (semelhante à camada de tráfego do GoogleMaps). Na imagem, o volume de veículos e a velocidade de deslocamento são destacadas, respectivamente, por intermédio da espessura e da coloração das ruas. Para uma melhor interação com o mapa, foram adicionados círculos (verde representa origem – item 1, enquanto vermelho, o destino – item 2) de seleção de pares OD (item 3). Ao selecionar uma dada região no mapa (combinação dos itens 1 e 2), um *Stream Graph* apresenta a demanda de veículos (item 4) dos respectivos pares OD selecionados (item 5) em um determinado intervalo de tempo (item 6). O tipo de transporte também é representado no item 7, onde o diâmetro dos círculos representa a média da quantidade de deslocamento referente ao tipo de transporte (item 8) para um dado momento. A principal vantagem da visualização é permitir que o usuário analise a demanda de veículos por intervalo de tempo.



**Figura 5.8:** Visualização proposta (h)

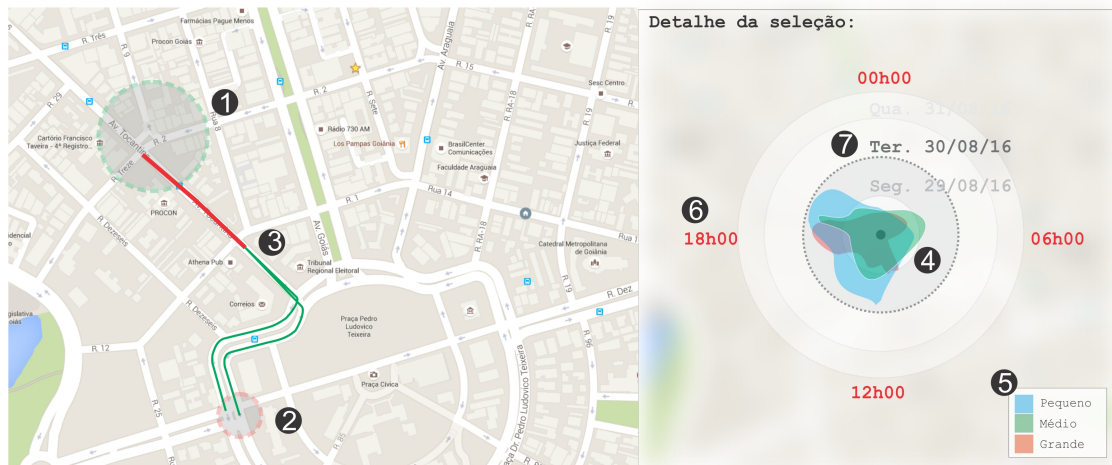
A Figura 5.9 apresenta um empilhamento de mapas que apontam para uma mesma região de interesse. Porém, seu objetivo é mostrar a evolução do tráfego em diferentes momentos do dia (item 3) de acordo com os pares OD selecionados (itens 1 e 2). Por intermédio da visualização, é possível notar que ao longo do tempo o tráfego pode sofrer mudanças em seu comportamento (coloração e espessura das linhas – itens 4). Logo, para que o usuário perceba tais mudanças, foi adicionada uma animação de transição entre os mapas, semelhante à troca de janelas de um sistemas operacional, pressionando as teclas Alt + Tab. Por outro lado, a fim de agregar mais valor à visualização, foi introduzida a técnica *Radar chart*, como detalhamento do mapa em destaque. Através da visualização, é possível identificar quatro eixos (itens 5): fluxo de veículos, média de velocidade atual, saturação da malha viária (congestionamento) e a quantidade de incidências de eventos no tráfego, que podem alterar o seu comportamento (acidentes, bloqueio de pista, inundações, etc). As regiões poligonais coloridas (item 6) mostram a área dos diferentes tipos de veículos (pequeno, médio e grande porte) usando a coloração definida no item 7.



**Figura 5.9:** Visualização proposta (i)

Por fim, a Figura 5.10 mostra o uso de mapas com as mesmas definições e funcionalidades do mapa da visualização (h) (Figura 5.8). Porém, foi adicionada a técnica (*Radar chart*) para representar a demanda de veículos em uma escala temporal. De acordo com a seleção de pares OD (itens 1, 2 e 3), é possível observar os diferentes tipos modais por intermédio da coloração das figuras geométricas (itens 4 e 5). Tais figuras podem variar de forma ao longo do tempo, neste caso expressa em horas (semelhante a representação das horas em um relógio – item 6). A interface permite visualizar os diferentes dias da semana por intermédio da seleção dos anéis (item 7). Por exemplo, o item 7 mostra a seleção do registro das demandas de terça-feira. Perceba que o anel

selecionado apresenta-se em destaque em relação aos demais. A proposta permite a comparação da demanda dos diferentes tipos modais ao longo de uma escala temporal.

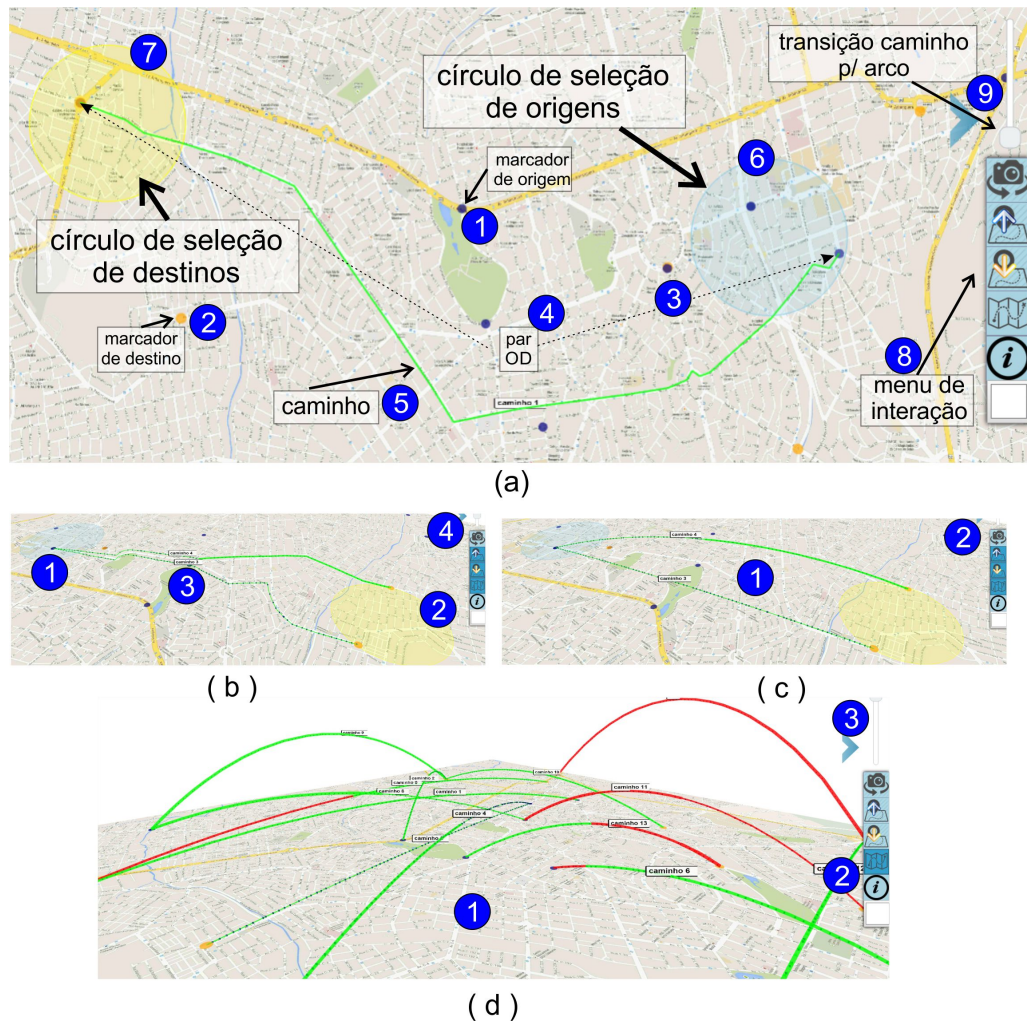


**Figura 5.10:** Visualização proposta (j)

A seguir, são apresentadas outras quatro novas visualizações. Elas são explicadas com um maior nível de detalhes já que são utilizadas nas avaliações descritas nos capítulos seguintes. A escolha das mesmas está relacionada ao momento da aplicação das avaliações de usabilidade. Ou seja, as visualizações foram selecionadas de acordo com o seu grau de maturidade e de desenvolvimento.

### 5.1.1 ArcFlow

A primeira visualização, denominada ArcFlow, pode ser vista na Figura 5.11 e consiste basicamente de um mapa geográfico com linhas indicando o fluxo entre pares ODs. O *ArcFlow* possibilita ver como as demandas de viagem se decompõem em fluxo de tráfego na malha viária. Na primeira visualização, há apenas um mapa geográfico com pares ODs e suas respectivas rotas sobre a malha viária (Figura 5.11 (a)). Na segunda visualização, há o mesmo mapa, mas com os pares OD sendo mostrados como arcos em 2.5D (Figura 5.11 (d)). A relação entre pares ODs não é necessariamente de um ponto para outro, uma vez que uma demanda de deslocamento de fluxo pode ser atendida por várias rotas diferentes simultaneamente. O *ArcFlow* permite que o usuário possa transitar suavemente de uma representação com rotas sobre um mapa (Figura 5.11 (b)) para uma representação 2.5D (Figura 5.11 (d)), através de arcos. Logo abaixo, tem-se uma descrição detalhada dos itens principais da visualização.



**Figura 5.11:** Visualização ArcFlow  
Principais funcionalidades.

Pequenos marcadores, em formato de círculos, são utilizados para descrever os pontos OD. A coloração azul (item 1), laranja (item 2) e azul e laranja (item 3) (da Figura 5.11 (a)) indicam, respectivamente, pontos de somente origem, somente de destino e de origem e destino simultaneamente. Caso haja um par OD na malha viária com demanda de deslocamento (item 4), este é descrito pelas suas rotas conectando os respectivos marcadores (item 5). Os segmentos que compõem os caminhos são coloridos, de acordo com a velocidade de deslocamento da via. Se a velocidade trânsito na via é maior que a metade da velocidade máxima permitida, a coloração será verde, caso contrário, vermelha. A espessura da linha está relacionada à capacidade ou volume de veículos que realmente estão em trânsito na via. No lado direito da visualização, há um menu (item 8) de interação por meio do qual o usuário tem a possibilidade de ativar uma rotação automática do mapa, habilitar ou desabilitar um recurso para selecionar manualmente um subconjunto de origens ou destinos, e exibir informações sobre as principais ações que podem ser feitas na visualização.