

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Letícia Dexheimer

A PEGADA ECOLÓGICA DOS INCIDENTES
RODOVIÁRIOS

Porto Alegre

2012

Letícia Dexheimer

A PEGADA ECOLÓGICA DOS INCIDENTES RODOVIÁRIOS

Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Luis Antonio Lindau, *Ph. D.*

Porto Alegre

2012

Dexheimer, Leticia
A Pegada Ecológica dos Incidentes Rodoviários /
Leticia Dexheimer. -- 2012.
103 f.

Orientador: Luis Antonio Lindau.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, RR-RS, 2012.

1. pegada ecológica. 2. incidentes rodoviários. 3. emissões de GHG. I. Lindau, Luis Antonio, orient.
II. Título.

Letícia Dexheimer

A PEGADA ECOLÓGICA DOS INCIDENTES RODOVIÁRIOS

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Luis Antonio Lindau, *Ph. D.*

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Carla Schwengber ten Caten, *Dr.^a*

Coordenadora PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Christine Tessele Nodari, *Dr.^a*. (PPGEP/UFRGS)

Professor João Fortini Albano, *Dr.* (DEPROT/UFRGS)

Professora Márcia Valle Real, *Dr.^a*. (UFF)

*Dedico este trabalho
à minha filha Sofia,
meu grande amor.*

AGRADECIMENTOS

A Deus

À minha filha Sofia, pela compreensão, paciência e principalmente por seu amor incondicional.

À minha mãe Lia e meu pai José Carlos, pelo apoio, incentivo e paciência, fundamentais para que este trabalho fosse possível.

Ao meu marido Paulo, pelo apoio e compreensão durante o curso.

À UFRGS e a CAPES, por terem subsidiado a infraestrutura científica, tecnológica e os recursos financeiros necessários para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Luis Antonio Lindau, pela ajuda e orientação.

Aos professores Márcia Valle Real, Christine Tessele Nodari e João Fortini Albano, pelas valiosas contribuições dadas ao trabalho.

A empresa Consórcio UNIVIAS, Felipe Brito - Coordenador Técnico e Sidnei Rigo - Gestor de Projetos, pelos dados e pela troca informações que subsidiaram o estudo de caso apresentado neste trabalho.

Ao Engenheiro José Elievam Bessa Júnior da Escola de Engenharia de São Carlos – USP pela disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao futuro Engenheiro William Oliveira, pela brilhante colaboração durante o desenvolvimento do trabalho.

À Verônica, secretária do LASTRAN, pela incansável disposição em ajudar.

Aos Professores Fernando Michel e Luiz Afonso Senna pela amizade e conhecimentos transmitidos ao longo dos anos.

Às minhas amigas Raquel Holz e Ana Larrañaga por estarem comigo durante esta árdua caminhada.

DEXHEIMER, L. **A PEGADA ECOLÓGICA DOS INCIDENTES RODOVIÁRIOS**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RESUMO

Este estudo tem por finalidade modelar a pegada ecológica de incidentes rodoviários que interrompem o fluxo normal de circulação. A pegada ecológica é um indicador que mede o impacto das atividades humanas em quantidades de áreas de terra, água e energia utilizadas para sustentar uma população de determinada região. Em transportes, esse impacto é medido pela área hipotética que deveria ser reservada para a absorção do CO₂ emitido que tem constituído, nos últimos anos, a fatia mais significativa das pegadas ecológicas na maioria dos países. A vantagem de utilizar essa abordagem reside na facilidade de entendimento, na simplicidade e na utilização de uma unidade única de comparação entre emissões de diferentes setores. O método proposto e aplicado neste trabalho proporciona a identificação dos impactos dos incidentes, particularmente acidentes viários e obras de manutenção viária, em termos de pegada ecológica. O estudo de caso constou de uma rodovia de pista simples cujas emissões foram avaliadas com a utilização de simulação de tráfego. Como resultado obteve-se uma pegada ecológica de cerca de 2.180 hectares decorrente dos incidentes ao longo de um ano de operação da via. Este valor corresponde a 4% da pegada ecológica da via em condições normais de operação. Ainda, os resultados indicam que os incidentes com maior impacto sobre o meio ambiente são as obras para a manutenção da rodovia que contribuem com 60% do total gerado pelos incidentes.

Palavras chave: pegada ecológica, incidentes rodoviários, emissões de GHG

DEXHEIMER, L. **ECOLOGICAL FOOTPRINT OF ROAD INCIDENTS**. 2012. Thesis (Doctorate in Engineering) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ABSTRACT

The purpose of this study is to model the ecological footprint of road incidents that interrupt the normal flow of vehicles. The ecological footprint is an accounting framework that measures the impact of human activities considering amounts of land, water and energy areas used to sustain the population of a region. In transportation, this impact is measured by the hypothetical area required to absorb CO₂ emissions from burning fossil fuels that has been responsible, over the last years, for the largest share of the ecological footprint of nations. The advantage of using this approach is the ease of understanding, simplicity and the use of a single unit for comparing emissions from different sectors. The method proposed and deployed in this work enables identifying the impact of incidents, basically road accidents and maintenance works, on the transportation ecological footprint. The case study was composed of a single lane highway whose emissions were evaluated with the use of traffic simulation. We obtained an ecological footprint of 2,180 ha due to road incidents over a period of one year. This corresponds to 4% of the ecological footprint of normal road operations. Results also indicate that the incidents with the greatest impact on the environment are the works for the maintenance of the highway which contribute with 60% of the total value.

Key words: ecological footprint, road incidents, GHG emissions

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento da População Mundial 1950 - 2050	25
Figura 2: Pegada Ecológica por Área Bioprodutiva de 1961 a 2007.....	36
Figura 3: Estrutura de Cálculo da Pegada Ecológica.....	40
Figura 4: Estrutura de Cálculo da Biocapacidade.....	42
Figura 5: Projeto-Tipo para Desvio de Tráfego no Fluxo Oposto em Rodovia de Pista Simples para Bloqueio de Meia Faixa	51
Figura 6: Projeto-Tipo para Desvio de Tráfego com Circulação Alternada em Rodovia de Pista Simples para Bloqueio de Meia Pista	52
Figura 7: Impacto das Obras na Pegada Ecológica.....	53
Figura 8: Procedimento de Atendimento a um Acidente	57
Figura 9: Sinalização de Emergência com Bloqueio de uma Faixa e Circulação Alternada ...	58
Figura 10: Sinalização de Emergência com Bloqueio de uma Faixa e Desvio de Trafego pelo Acostamento.....	59
Figura 11: Impacto do Acidente na Pegada Ecológica	60
Figura 12: Estrutura do Método.....	65
Figura 13: BR 386 no Estado do Rio Grande do Sul	70
Figura 14: Trecho da BR 386 entre Lajeado e o entroncamento com a RS 287	71
Figura 15: Frequência de Ocorrência do Tempo de Obstrução da Pista.....	73
Figura 16 : Bloqueio Parcial de Pista com Utilização de Semáforo	74
Figura 17: Volume de Tráfego em uma Semana Típica	75
Figura 18: Volume Médio Horário de Tráfego.....	76

Figura 19: Volume Horário Médio de Tráfego <i>versus</i> Número Médio de Acidentes (2008, 2009 e 2010).....	77
Figura 20: Frequência Acumulada dos Acidentes ao Longo do Dia (média de 2008, 2009 e 2010).....	78
Figura 21: Composição do Tráfego por Hora do Dia (Média de terça, quarta e quinta-feira). 78	
Figura 22: Representação Gráfica no Momento do Incidente – Bloqueio Total.....	81
Figura 23: Representação Gráfica no Momento do Incidente – Bloqueio Parcial	82
Figura 24: Variação nas Emissões de CO ₂ – equivalente para o Cenário 2	86
Figura 25: Variação nas Emissões de CO ₂ – equivalente para o Cenário 3	86
Figura 26: Variação nas Emissões de CO ₂ – equivalente para os Cenários 4 e 5	87
Figura 27: Participação Percentual da Pegada Ecológica por tipo de Incidente em Um Ano de Operação	90
Figura 28: Pegada Ecológica de Um Incidente nos Diferentes Fluxos para o Cenário 2	91
Figura 29: Pegada Ecológica de Um Incidente nos Diferentes Fluxos para o Cenário 3	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pegada Ecológica por Área (exemplos de alguns países).....	17
Tabela 2: Principais Poluentes Atmosféricos e os Efeitos sobre a Saúde.....	28
Tabela 3: Exemplos de Metodologias para Avaliação da Sustentabilidade.....	30
Tabela 4: Fatores de Equivalência.....	38
Tabela 5: Exemplos de Fatores de Rendimento de Alguns Países.....	39
Tabela 6: Evolução da Pegada Ecológica 1961 – 2007.....	43
Tabela 7: Valores da Pegada Ecológica Apresentado no Trabalho de Chi e Stone (2005).....	45
Tabela 8: Exemplos de Atividades e Prazos para Correção de Não Conformidades.....	49
Tabela 9: Classificação das Ocorrências Segundo a Gravidade.....	71
Tabela 10: Incidência de Acidentes.....	72
Tabela 11: Incidência das Obras.....	74
Tabela 12: Resumo dos Cenários Propostos.....	80
Tabela 13: Desaceleração Máxima Não Emergencial por Tipo de Veículo.....	82
Tabela 14: Taxas de Aceleração por Tipo de Veículo(m/s^2).....	83
Tabela 15: Emissões de CO ₂ eq para Cenário 1 – Uma Hora de Operação em Fluxo Livre ...	83
Tabela 16: Emissões de CO ₂ eq para Cenário 2 – Incidente com Bloqueio Total + Bloqueio Parcial.....	84
Tabela 17: Emissões de CO ₂ eq para Cenário 3 – Incidente com Bloqueio Parcial.....	84
Tabela 18: Emissões de CO ₂ eq para Cenário 4 – Incidente com Bloqueio Parcial.....	85
Tabela 19 Emissões de CO ₂ eq para Cenário 5 – Incidente com Bloqueio Parcial.....	85

Tabela 20: Número de Acidentes para cada Cenário nos Diferentes Níveis de Fluxo e Tempo de Bloqueio Parcial	87
Tabela 21: Número de Ocorrências de Obras para cada Cenário	88
Tabela 22: Pegada Ecológica para o Cenário 1 nos Diferentes Níveis de Fluxo Durante um Ano de Operação	88
Tabela 23: Pegada Ecológica para os Cenários 2 e 3 nos Diferentes Níveis de Fluxo e Tempo de Bloqueio Parcial	89
Tabela 24: Pegada Ecológica para os Cenários 4 e 5	89

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Tema e Justificativa.....	19
1.2 Objetivos.....	20
1.3 Delineamento do Estudo.....	20
1.3.1 Método de pesquisa.....	20
1.3.2 Método de trabalho	21
1.4 Delimitações	21
1.5 Estrutura do Trabalho.....	21
2 SUSTENTABILIDADE E TRANSPORTES	23
2.1 Desenvolvimento Sustentável.....	23
2.2 Transporte Sustentável	25
2.3 Formas de Avaliação da Sustentabilidade	30
2.4 Considerações Finais.....	32
3 PEGADA ECOLÓGICA.....	33
3.1 As Categorias que Compõem a Pegada Ecológica	34
3.2 Fatores de Equivalência.....	37
3.3 Fatores de Rendimento.....	38
3.4 Cálculo da Pegada Ecológica.....	39
3.5 Cálculo da Biocapacidade	41

3.6	Estudos Realizados.....	42
3.7	Vantagens e Limitações.....	45
3.8	Considerações Finais.....	46
4	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	47
4.1	Identificação e Caracterização dos Incidentes.....	47
4.1.1	Análise qualitativa dos incidentes do tipo obras na via	48
4.1.2	Análise qualitativa dos incidentes do tipo acidentes.....	54
4.1.3	Classificação dos incidentes	61
4.2	Avaliação dos Impactos.....	62
4.2.1	Determinação dos volumes de tráfego	63
4.2.2	Composição do tráfego.....	64
4.2.3	Dimensão do incidente	64
4.2.4	Criação de cenários	64
4.3	Considerações Finais.....	64
5	MÉTODO PROPOSTO	65
5.1	Delimitação da área de estudo	66
5.2	Identificação dos incidentes que ocorrem na área de estudo.....	66
5.3	Classificação dos incidentes	66
5.4	Avaliação dos impactos dos incidentes.....	66
5.5	Cálculo da pegada ecológica	67
5.6	Análise dos resultados.....	69
5.7	Considerações Finais.....	69
6	ESTUDO DE CASO	70
6.1	Delimitação da Área de Estudo	70
6.2	Identificação dos Incidentes	71
6.2.1	Acidentes.....	71

6.2.2	Obras	73
6.3	Avaliação dos impactos.....	75
6.3.1	Composição do tráfego.....	78
6.3.2	Dimensão física ocupada pelo incidente	79
6.3.3	Cenários propostos.....	79
6.3.4	Simulação dos incidentes	81
6.4	Cálculo da Pegada.....	85
6.5	Análise dos Resultados.....	89
7	CONCLUSÕES.....	93
7.1	Recomendações para Trabalhos Futuros	94
	REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

No final do século passado, Wackernagel e Rees (1996) desenvolveram um método que permite medir o impacto das atividades humanas sobre a natureza, a Pegada Ecológica. Este método parte do princípio que cada pessoa necessita de uma quantidade de área de terra (área construída, área de pasto, área de cultivo e área de floresta), água (área de pesca) e energia para produzir o que consome ao longo de um ano, e relaciona com o conceito de capacidade de carga que é a capacidade de regeneração dos recursos da natureza de forma a sustentar uma população em determinada região.

O aumento da população mundial e o desenvolvimento da economia em nível global provocaram a utilização de maiores quantidades de materiais e energia para suprir as necessidades de consumo e, como consequência, houve um aumento na concentração de poluentes e na geração de resíduos lançados no meio ambiente. Essa demanda por recursos para manter o padrão de vida de uma população vem se manifestando de forma mais intensa na questão da energia. As pessoas utilizam mais energia para a realização de suas atividades. Essa energia é representada por uma área hipotética, chamada de área de energia ou área de carbono, que deveria ser reservada para a absorção de CO₂. Na Tabela 1, estão apresentados os valores da pegada ecológica, total e por área de cálculo, para alguns países. Observa-se que a área de carbono, tem constituído a maior fatia das pegadas ecológicas da maioria dos países, chegando a representar 70% da pegada ecológica total como no caso dos Estados Unidos e 76% no caso dos Emirados Árabes.

Desde os primeiros cálculos, o setor de transportes teve contribuição significativa na pegada ecológica a partir dos deslocamentos realizados. Importante para o desenvolvimento econômico das regiões urbanas, o setor está entre os que mais consomem energia e mais contribuem para as emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, o transporte urbano e regional é realizado predominantemente pelo modo rodoviário. As viagens motorizadas para transporte de passageiros são realizadas por carro, moto ou ônibus e cerca de 60% de toda a carga transportada no país circula por caminhões (PNLT, 2007). Segundo Real et al. (2009) o consumo de energia em transportes no país cresceu aproximadamente 75% de 1990 a 2007.

Com o aumento das viagens motorizadas houve um aumento na ocorrência de incidentes rodoviários. Os incidentes são eventos que interrompem o fluxo e reduzem a capacidade da via, causando atrasos, filas extensas, maior consumo de combustível e aumento

no número de emissões. Eles podem ser previstos, como no caso das obras para manutenção da via e adequação da capacidade ou aleatórios como os acidentes e os desastres naturais.

Tabela 1: Pegada Ecológica por Área (exemplos de alguns países)

PEGADA ECOLÓGICA (HECTARES GLOBAIS PER CAPITA)							
TOTAL	Cultivo	Pasto	Floresta	Pesca	Área Construída	Carbono	
Mundo	2,7	0,59	0,21	0,29	0,11	0,06	1,44
Africa							
Africa do Sul	2,3	0,42	0,21	0,29	0,06	0,02	1,31
Asia							
China	2,2	0,53	0,11	0,15	0,12	0,09	1,21
India	0,9	0,39	0,00	0,12	0,02	0,05	0,33
Japão	4,7	0,57	0,07	0,27	0,62	0,06	3,13
Arábia Saudita	5,1	0,96	0,20	0,24	0,16	0,07	3,50
Emirados Arabes Unidos	10,7	1,35	0,43	0,47	0,29	0,04	8,10
Europa							
França	5,0	1,10	0,27	0,65	0,24	0,24	2,51
Alemanha	5,1	1,25	0,21	0,61	0,13	0,19	2,70
Itália	5,0	1,15	0,37	0,50	0,21	0,10	2,66
Holanda	6,2	1,85	0,57	0,47	0,17	0,15	2,99
Rússia	4,4	0,89	0,10	0,53	0,13	0,03	2,72
Suíça	5,0	0,81	0,26	0,54	0,10	0,10	3,20
Reino Unido	4,9	0,87	0,27	0,61	0,13	0,15	2,87
América Latina e Caribe							
Brasil	2,9	0,72	0,93	0,57	0,16	0,10	0,43
Cuba	1,9	0,64	0,13	0,11	0,18	0,02	0,76
Mexico	3,0	0,83	0,32	0,33	0,08	0,06	1,37
Estados Unidos e Canadá							
Canadá	7,0	0,95	0,26	1,59	0,12	0,05	4,03
Estados Unidos	8,0	1,08	0,14	1,03	0,10	0,07	5,57
Oceania							
Australia	6,8	0,64	1,78	1,12	0,16	0,02	3,11
Nova Zelandia	4,9	0,74	0,23	1,26	0,31	0,06	2,29

Fonte: WWF (2010)

Os acidentes provocam a morte de cerca de 1,3 milhões de pessoas por ano no mundo, 90% delas em países em desenvolvimento. E ainda outras 50 milhões sofrem lesões graves que pode deixá-los com deficiência para resto da vida. Para países em desenvolvimento os acidentes se apresentam como a pior externalidade do transporte, cujo custo econômico situa-se entre 1% e 2% do PIB (Vasconcelos, 2008).

Além da dor e do sofrimento imputado às famílias das vítimas, também provocam impactos econômicos, sociais e ambientais à sociedade como um todo. A quantificação dos impactos econômicos e sociais tem sido amplamente estudada na literatura de modo a fornecer subsídios à formulação de políticas públicas que visem à redução dos acidentes e suas consequências. Dando sequência a esses estudos, identificou-se a necessidade de quantificar os impactos ambientais dos acidentes como uma forma de auxiliar a justificar investimentos em segurança viária que promovam a sustentabilidade de regiões.

Esta necessidade está respaldada pela recomendação do Banco Mundial que, em resposta à crise global de segurança viária, sugere que iniciativas mais amplas sobre a agenda de mudanças climáticas globais sejam integradas aos estudos de segurança. Há um forte reconhecimento que existem co-benefícios trabalhando as questões de segurança viária, congestionamentos, poluição do ar e segurança energética em prol do aumento das oportunidades para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (World Bank, 2009). Essas oportunidades podem vir em termos de mudanças políticas, econômicas e sociais. A pegada ecológica, por ser um indicador que representa o impacto de uma atividade, setor, organização ou mesmo um país sobre o meio ambiente pode auxiliar a justificar a implementação de políticas que promovam a sustentabilidade do sistema como um todo.

As obras são serviços necessários à manutenção das condições operacionais da via e incluem os serviços de conservação rotineira e recapeamento. Estas atividades bloqueiam partes da pista por curtos períodos de tempo, mas ainda assim reduzem a capacidade da via podendo causar grandes congestionamentos e ainda podem aumentar o índice de acidentes. Estes eventos podem ser programados de modo a minimizar os impactos decorrentes e melhorar a sustentabilidade das regiões.

A literatura apresenta diversas metodologias para avaliação da sustentabilidade a partir da quantificação dos impactos ambientais das atividades (Ness et al., 2007). Todas têm por objetivo subsidiar a formulação de políticas públicas que promovam o desenvolvimento sustentável e podem ser usadas conforme a necessidade e as características dos estudos a serem desenvolvidos.

1.1 TEMA E JUSTIFICATIVA

O tema desta tese é a análise dos incidentes rodoviários no âmbito da questão ambiental. Os impactos sobre o meio ambiente são analisados utilizando a abordagem da Pegada Ecológica.

A literatura é abrangente no desenvolvimento de trabalhos que analisam a ocorrência de incidentes de rodoviários. Alguns temas considerados são redução de capacidade das vias, análise do comportamento dos motoristas quanto à mudança de faixa e aceitação de *gap*, mudança de rota a partir de informações fornecidas por avançados sistemas de informação de tráfego, avaliação de riscos de acidentes através de auditorias de segurança viária, identificação de pontos críticos nas vias para priorizar ações que reduzam a taxa de acidentes e sua gravidade, entre outros (Alvarez & Hadi, 2010). No caso dos acidentes, um ponto bastante abordado é a questão do custo. Alguns autores propõem métodos para quantificar os custos considerando itens como perda de produção associada à morte das pessoas ou a interrupção temporária de suas atividades custos médicos e reparação dos veículos acidentados (IPEA, 2003).

Estas questões são muito importantes do ponto de vista das políticas públicas, haja visto que as perdas individuais, sociais e econômicas são elevadíssimas, constituindo alto preço para a sociedade. Porém, integrar iniciativas que melhorem a qualidade ambiental aos estudos de segurança pode trazer benefícios na redução dos gases de efeito estufa (World Bank, 2009). Essa recomendação do Banco Mundial ocorre devido à constatação de que, apesar das estatísticas crescentes com relação às mortes e lesões causadas por acidentes de trânsito, ao longo dos anos a segurança viária tem sido quase totalmente ignorada como uma questão de desenvolvimento sustentável (Comission for Global Road Safety, 2011). No caso de obras de implantação de rodovias, ou mesmo de ampliação da capacidade, muitas exigências ambientais têm sido feitas por órgãos internacionais para a obtenção de financiamentos. Porém, quando a via entra em operação, as questões ambientais estão diretamente associadas ao impacto operacional causado pelo incidente. Esse impacto é representado pelo excesso de veículos em vias com trânsito parado devido ao congestionamento, pelo tempo que as vias ficam bloqueadas tanto para obras quanto para remoção de vítimas e de veículos envolvidos em acidentes e a limpeza para a volta da operação normal.

Do ponto de vista acadêmico, a principal contribuição desta tese é proporcionar um método que permita a avaliação do impacto do incidente no meio ambiente com foco na sustentabilidade da região. Do ponto de vista prático, a importância desta tese reside no fato de que os resultados da avaliação podem ser utilizados no planejamento de transportes para justificar investimentos, como por exemplo, em segurança viária, em recursos para o atendimento às ocorrências ou em ampliação de capacidade de rodovias.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um método que permita modelar a pegada ecológica dos incidentes rodoviários. Como decorrência do objetivo principal, pretende-se, adicionalmente, alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os impactos ambientais dos incidentes rodoviários e sua contribuição à Pegada Ecológica;
- Modelar a parcela da Pegada Ecológica do transporte que corresponde aos incidentes rodoviários;
- Desenvolver um estudo de caso para ilustrar a aplicação do método.

1.3 DELINEAMENTO DO ESTUDO

1.3.1 *Método de pesquisa*

Do ponto de vista da natureza da pesquisa, a tese é de natureza aplicada uma vez que propõe uma metodologia para aplicação prática dirigida à avaliação ambiental dos incidentes rodoviários. Do ponto de vista da abordagem do problema pode ser vista como uma pesquisa qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa subsidiou a elaboração do método e a análise quantitativa, através de técnicas estatísticas e simulação de tráfego, possibilitou a obtenção dos dados utilizados no cálculo da pegada ecológica. Com relação ao objetivo da pesquisa, a tese envolve uma pesquisa exploratória uma vez que aborda levantamento bibliográfico e

entrevistas com especialistas para o desenvolvimento de um método de cálculo que permite modelar uma parcela do indicador Pegada Ecológica.

1.3.2 *Método de trabalho*

Definido o objetivo do estudo, o método de trabalho pode ser resumido em cinco etapas detalhadas a seguir. A primeira etapa compreende a revisão teórica onde foi analisado o método de cálculo da pegada ecológica e sua adequação ao estudo. A segunda etapa engloba o desenvolvimento do método proposto neste trabalho. Os incidentes foram divididos em dois grupos de análise: (i) os acidentes, que são eventos aleatórios e cujo impacto operacional na rodovia depende da agilidade do atendimento às vítimas; e (ii) as obras, que são eventos programados e cujo impacto operacional na rodovia pode ser minimizado através do adequado planejamento e sinalização. Em seguida são identificados os impactos de cada tipo de incidente na pegada ecológica. Com isso foi possível analisar as variáveis que devem ser inseridas no método de cálculo. A terceira etapa envolve a proposição do método cuja abordagem auxilia no diagnóstico ambiental dos incidentes sendo adequado para utilização no planejamento e operação de rodovias. Na quarta etapa é desenvolvido um estudo de caso em uma rodovia de pista simples, com duas faixas de operação e com fluxo bi-direcional. Na quinta etapa estão contempladas as conclusões e recomendações do estudo.

1.4 **DELIMITAÇÕES**

Este trabalho se propõe a modelar uma parcela que compõe o indicador pegada ecológica para incidentes de tipos: obras e acidentes. Os incidentes foram analisados para rodovia de pista simples, com duas faixas de operação e com fluxo bi-direcional. O método permite aplicação em outros tipos de vias ou de incidentes com as devidas adaptações.

1.5 **ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O capítulo 2 aborda a questão da sustentabilidade apontando os principais conceitos e formas de avaliação com a apresentação dos indicadores mais utilizados para este fim. Além disso, apresenta a relação entre transporte

e meio ambiente, identificando os impactos negativos da atividade na qualidade de vida das pessoas.

O capítulo 3 consta de uma revisão teórica sobre o indicador Pegada Ecológica. São apresentados o conceito, os principais componentes, o método de cálculo e alguns estudos realizados utilizando esta abordagem.

O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do método realizado a partir de uma análise qualitativa dos incidentes e seu impacto na pegada ecológica.

O capítulo 5 propõe um método para o cálculo da Pegada Ecológica dos incidentes rodoviários descrevendo as etapas e as recomendações para sua utilização.

No capítulo 6 é realizado um estudo de caso para exemplificar a utilização do método. São apresentados os resultados obtidos, seguidos de sua análise. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações do trabalho.

2 SUSTENTABILIDADE E TRANSPORTES

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Durante as décadas de 50 e 60 do século passado o termo desenvolvimento sempre esteve associado com crescimento econômico e industrialização sem que fossem considerados os danos ambientais deles advindos (Fogliatti et al., 2004).

Bernardes e Ferreira (2003) lembram que durante o século XIX se desenvolveu uma compreensão das relações entre a sociedade e natureza, onde se achava que a natureza seria uma fonte ilimitada de recursos à disposição do homem. Com base nesta concepção, desenvolveram-se práticas, por meio do processo de industrialização, onde a acumulação se dava através da exploração intensa dos recursos naturais, com efeitos perversos para a natureza e para os homens. Achava-se que o crescimento econômico não teria limites e que o desenvolvimento significaria dominar a natureza e os homens.

A fragilidade e vulnerabilidade dos ecossistemas só foram percebidas pelos países desenvolvidos diante de grandes acidentes ambientais que marcaram as décadas seguintes como o da Baía de Minamata no Japão, o acidente do Bhopal na Índia e o acidente na Usina Nuclear de Chernobyl, na extinta União Soviética, o vazamento de petróleo da EXXon Valdez no Alasca, entre outros (Fogliatti et al., 2004 e Jappur, 2004). Estes fatos provocaram significativas mudanças nas visões de mundo e iniciaram um processo de conscientização de que as questões ambientais eram importantes no processo de desenvolvimento e que o planeta não suportaria os impactos ambientais gerados pela velocidade com que isso acontecia podendo levar à exaustão dos recursos naturais. Assim, em 1972 a Conferência de Estocolmo sobre o meio ambiente humano preconizou a necessidade de buscar caminhos alternativos para o crescimento considerando as dimensões ambiental e humana.

Nesse contexto, em 1980, o documento intitulado *World's Conservation Strategy* (IUCN, 1980) da *International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources* (IUCN) aborda pela primeira vez o termo desenvolvimento sustentável com foco centrado principalmente na dimensão ambiental. Sete anos depois, em 1987 um relatório denominado *Nosso Futuro Comum*, também conhecido por Relatório Brundtland, desenvolvido pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento apresenta o conceito de

desenvolvimento sustentável como sendo aquele que atende as necessidades das gerações presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades (CMMAD,1998). Este conceito ficou difundido internacionalmente e popularizou-se na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, chamada de ECO-92, onde vários documentos foram aprovados, todos visando à realização e à efetivação do desenvolvimento sustentável por parte das nações. Em 2002 ocorreu uma nova conferência mundial, em Johannesburgo, África do Sul, a Cúpula Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável, também conhecida como Rio +10 que teve como intuito principal avaliar o andamento das metas fixadas em 1992, bem como verificar os resultados obtidos pelas nações participantes de modo a propor alterações para que os objetivos ambientais fossem atingidos.

A importante participação de chefes de estado nas conferências demonstra que a preocupação dos governantes com questões relativas à sustentabilidade é grande, e vem aumentando consideravelmente desde a década de 90. Porém, há um grande desafio a ser vencido, o aumento da população mundial. O relatório da Divisão de População do Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas mostra que em 1950 havia 2,5 bilhões de pessoas no mundo, enquanto hoje existem 6,8 bilhões e estima para 2050 uma população de mais de 9 bilhões de pessoas (ONU, 2010). Estes dados são apresentados na curva de crescimento da população da Figura 1. O aumento da população mundial leva a um aumento das necessidades de consumo e o consequente aumento da atividade econômica medida pelo Produto Mundial Bruto (GWP) que vem crescendo em média 4% ao ano (ONU, 2007). Nos países desenvolvidos, embora a taxa de crescimento populacional seja baixa, a demanda energética para a manutenção do padrão de vida dos indivíduos é bastante alta (Pereira, 2008). Esta combinação de superpopulação e estilo de vida humano é um dos fatores críticos limitantes para se atingir a sustentabilidade (Daily e Ehrlich, 1996).

Dando sequência ao engajamento mundial pela sustentabilidade do planeta, está prevista para 2012 uma nova conferência promovida pela Organização das Nações Unidas (ONU) a Rio +20, cujo principal desafio será propor alternativas para suprir de forma sustentável as necessidades de uma população mundial de 9 bilhões de habitantes em 2050. O encontro tem como tema a economia verde no contexto do desenvolvimento sustentável e da erradicação da pobreza, pois economia e meio ambiente não podem ser separados das questões sociais.

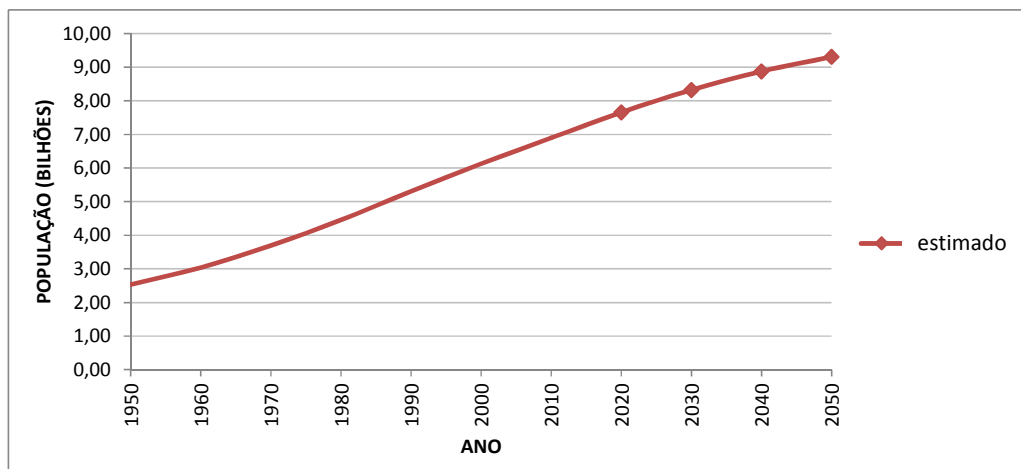


Figura 1: Crescimento da População Mundial 1950 - 2050

Fonte: Dados obtidos no relatório (ONU, 2010)

É importante salientar que, conceitualmente, o desenvolvimento sustentável deve englobar o crescimento da economia, mantendo a qualidade do ambiente e atendendo às necessidades básicas de todos os indivíduos. O crescimento econômico deve ter como base a manutenção da qualidade de vida dos indivíduos e a qualidade do ambiente deve ser obtida com a utilização racional dos recursos da natureza nos processos produtivos. Buscar a sustentabilidade ambiental sem proporcionar uma mudança social não trará benefícios de longo prazo. O interesse das nações em promover essas mudanças pode dar início a uma nova forma de gestão, baseada no equilíbrio entre desenvolvimento, a utilização dos recursos e a manutenção da diversidade biológica e cultural.

2.2 TRANSPORTE SUSTENTÁVEL

Ao longo dos anos, o transporte sempre esteve associado ao desenvolvimento social e econômico das regiões. Por conta disso espera-se que nas próximas décadas aumente a demanda por transportes em todo o mundo, e mais rapidamente nos países em desenvolvimento em função do crescimento da sua renda (Banco Mundial, 2010). Apesar de trazer muitos benefícios à sociedade, possibilitando a circulação de pessoas e mercadorias, esta atividade gera impactos negativos, também chamados na literatura de externalidades sócio-ambientais, que acabam por reduzir a qualidade de vida nas cidades e a sustentabilidade do setor.

Os efeitos negativos do transporte estão ligados a um conjunto de fatores que envolvem o modo predominante para os deslocamentos, a infraestrutura existente e a operação do sistema. O transporte urbano e regional é realizado, em sua maior parte, pelo modo rodoviário no qual estão incluídos os automóveis e as motos, o transporte público de passageiros e o transporte de carga. Nas últimas décadas houve um crescimento do transporte motorizado individual circulando em um sistema cuja infraestrutura não foi preparada para absorver esta mudança. A estrutura atual de regiões urbanas é o resultado de uma evolução dinâmica que abrange, em muitos, casos vários séculos. Cada etapa do desenvolvimento foi feita sobre a infraestrutura existente e com uma determinada finalidade. Naturalmente, no passado, nem os níveis de motorização, nem a consciência de sustentabilidade eram relevantes como o são hoje em dia (Macário, 2009). Operar um sistema de transportes que agregue os veículos motorizados, não motorizados e os pedestres, todos em uma perspectiva de crescimento, é um desafio a ser vencido. Criar novas vias ou mesmo aumentar sua capacidade física não é uma alternativa viável na grande maioria dos casos. Assim, o aumento da oferta de transportes é dependente do adequado planejamento e regulamentação do espaço viário.

O transporte ineficiente, resultante de um processo não planejado gera como externalidades sócio-ambientais a poluição do ar, poluição sonora, acidentes, aumento dos congestionamentos, aumento do consumo de combustíveis e energia, perda de tempo em deslocamentos e maior custo operacional dos veículos. Os mais citados na literatura são: poluição do ar e sonora, acidentes e congestionamentos (Bovy, 1990; Button, 1993; Miller & Moffet, 1993; Verhoef, 1994; Litman, 1996).

A poluição do ar está relacionada ao uso de veículos motorizados e depende diretamente do modo de transporte (carro, moto, ônibus ou caminhão), do tipo de combustível (gasolina, diesel, metanol ou etanol) e da velocidade do veículo, e indiretamente das emissões ao longo de todo o processo produtivo - produção, estocagem e transporte para os fornecedores finais. Os poluentes ainda podem ser separados de acordo com a abrangência do impacto. O dióxido de carbono - CO₂ e o material particulado - MP, por exemplo, estão ligados aos problemas globais. O primeiro atua na destruição da camada de ozônio, aquecimento e exaustão dos recursos naturais não renováveis. O segundo, afeta diretamente o clima do planeta através da dispersão e absorção da radiação solar e indiretamente atuando como núcleo de condensação nos processos de formação de nuvens. Além disso, o MP

juntamente com outros poluentes como os hidrocarbonetos - HC, óxido de nitrogênio - NO_x, óxido de enxofre - SO₂ e o monóxido de carbono - CO (acima de certos níveis) afetam diretamente a saúde das pessoas, de diferentes formas, dependendo da concentração destes gases na atmosfera e do tempo de exposição das pessoas a eles (Vasconcelos, 2008). A Tabela 2 apresenta um resumo dos principais poluentes e seus efeitos sobre a saúde das pessoas.

Os gases e partículas emitidos diariamente pelos milhões de veículos circulando nas cidades e nas rodovias interurbanas acumulam-se na atmosfera, em diferentes concentrações. Eles são dispersos pela ação dos ventos, aprisionados pela inversão térmica, diluídos e lavados pelas chuvas, ou podem também reagir entre si ou com elementos naturalmente presentes na atmosfera, formando poluentes secundários (Banco Mundial, 2010). A poluição sonora se manifesta em nível local e depende da composição do tráfego, do volume de tráfego e da velocidade. Os veículos que produzem maiores níveis de ruído são ônibus, caminhões e motos. A exposição excessiva e contínua ao excesso de ruído pode afetar a saúde das pessoas causando perda de audição, estresse e insônia (Miller e Moffet, 1993).

Os congestionamentos são um problema comum nas grandes cidades. A formação do congestionamento está relacionada com a velocidade, densidade e fluxo dos veículos na via (TRB, 2000). Quando o fluxo de veículos na via aumenta a ponto de se aproximar de sua capacidade, há uma redução das velocidades dos veículos em circulação podendo, em alguns momentos, chegar a zero. À redução de velocidades está associada uma redução do desempenho geral do trânsito, provocando um aumento no tempo de viagem, aumento do consumo de energia e da emissão de poluentes. Em geral, os congestionamentos são decorrentes do uso excessivo de automóveis em detrimento ao transporte público, mas também podem se formar devido à ocorrência de incidentes na via.

FHA (2000) define incidente como qualquer evento não recorrente que causa uma redução da capacidade viária ou um aumento anormal na demanda. Os incidentes podem ser de dois tipos: previstos como, por exemplo, as obras na estrutura viária; e aleatórios como os acidentes de trânsito e os desastres naturais. Estes eventos têm um impacto significativo nos sistemas de transportes. Eles interrompem o fluxo e reduzem a capacidade da via, causando atrasos, filas extensas, maiores consumos de combustível e aumento no número de emissões.

Tabela 2: Principais Poluentes Atmosféricos e os Efeitos sobre a Saúde

<i>Poluentes</i>	<i>Fontes de Emissão</i>	<i>Efeitos sobre a Saúde</i>
Monóxido de Carbono (CO)	Veículos (95,5% das emissões) e indústrias	Combina-se com a hemoglobina formando a carboxihemoglobina, um composto que diminui a oxigenação do sangue, prejudica o desenvolvimento dos fetos, causa tonturas, afeta o sistema nervoso central, pulmonar, redução dos reflexos e da acuidade visual.
Hidrocarbonetos (HC)	Resultante da queima incompleta e evaporação de combustíveis e outros produtos voláteis	Provocam irritação nos olhos, nariz, pele e aparelho respiratório. Podem causar dano celular, sendo que diversos HC's são considerados carcinogênicos e mutagênicos.
Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	Processo de combustão em geral e veículos	Podem provocar desconforto respiratório, diminuição da resistência a infecções e alterações celulares.
Óxidos de Enxofre (SO_x)	Processos resultantes da queima de óleo combustível, produção de papel, fertilizantes	Em concentrações altas causam inflamações graves da mucosa nas vias respiratórias, podendo até causar a morte. Aumenta a incidência de rinite, faringite e bronquite. Afeta plantas e espécies mais sensíveis, causa acidificação do solo e de corpos d'água.
Material particulado (fumaça, poeira e fuligem)	Veículos movidos a diesel, indústrias, desgaste dos pneus e freios de veículos em geral	Agravam quadros alérgicos, de asma e bronquite. As poeiras mais grossas ficam retidas no nariz e na garganta, causando irritação e facilitando a propagação de infecções gripais. As mais finas MP _{2,5} penetram no trato respiratório humano no nível alveolar, onde os mecanismos de expulsão não são eficientes, podendo causar problemas respiratórios, doenças mutagênicas e mortes prematuras.
Aldeídos	Veículos	Irritação dos olhos, nariz e garganta. Os aldeídos emitidos por veículos a diesel, a gasolina e a álcool podem provocar câncer.
Ozônio (O₃)	Resultante da reação de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio no topo da atmosfera, quando ativados pela luz solar	Danos a estrutura pulmonar, incidência de tosse, asma, irritação no aparelho respiratório e nos olhos.

Fonte: adaptado de Ariotti (2010)

Os estudos relacionados aos incidentes encontrados na literatura costumam ser de dois tipos, os que analisam o ambiente e a redução de capacidade e os que analisam as mudanças

no comportamento dos motoristas como, por exemplo, mudança de faixa e aceitação de *gap* ou mudança de rota a partir de informações fornecidas por sistemas avançados de informação de tráfego (Alvarez & Hadi, 2010).

De forma genérica, as obras que ocorrem na via incluem adequação da capacidade e manutenção da via. O primeiro caso envolve grandes obras que bloqueiam alguma parte da pista por longos períodos de tempo e, por conta disso, acabam por causar uma realocação de rotas. Nas rodovias interurbanas nem sempre é possível ofertar rotas alternativas tornando a operação do sistema em obras uma atividade complexa que exige boa sinalização e um bom controle do tráfego de forma a reduzir a ocorrência de acidentes e não aumentar ainda mais os níveis de congestionamento. A manutenção da via inclui os serviços de conservação rotineira e recapeamento. Estas atividades bloqueiam partes da pista por curtos períodos de tempo, mas ainda assim reduzem a capacidade da via podendo causar grandes congestionamentos.

Os acidentes de trânsito são um tipo de incidente que ocorre na via e tem sido amplamente estudado na literatura, pois constituem um sério problema no mundo atual. Segundo o Relatório do Banco Mundial (*World Bank*, 2009) é um problema de saúde pública que tira mais vidas do que malária e tuberculose. Cerca de 1,3 milhões de pessoas no mundo todo morrem em decorrência de acidentes de trânsito todo ano, 90% delas em países em desenvolvimento. E, ainda, outras 50 milhões sofrem lesões graves que pode deixá-las com deficiência para o resto da vida (WHO, 2009). Os estudos relacionados aos acidentes de trânsito incluem, entre outros, a auditoria de segurança viária, a identificação de pontos críticos na via, os modelos de previsão de acidentes e a identificação de fatores contribuintes (AASHTO, 2010; Ministério dos Transportes, 2002; AUSTROADS, 2004).

De um modo geral, um transporte sustentável requer planejamento. Neste caso, o planejamento deve estar voltado para a quantificação dos efeitos de cada alternativa a ser implementada de modo a reduzir as externalidades negativas decorrentes. Zeistman (2000) aponta os desafios com relação à quantificação da sustentabilidade de um sistema de transporte como sendo a dificuldade de identificar medidas de desempenho apropriadas, quantificá-las e usá-las na tomada de decisão.

Porém, necessidade de reverter o processo de desenvolvimento desordenado desencadeou a criação de metodologias para avaliação da sustentabilidade das diferentes atividades. Estas metodologias associadas aos modelos usados no planejamento de

transportes, como por exemplo, os modelos de simulação, podem avaliar de forma combinada diversos fatores que influenciam na sustentabilidade como a segurança, as emissões, os congestionamentos e o consumo de combustível. Esta avaliação permite a discussão e identificação de estratégias, planos e políticas para o crescimento sustentável das regiões.

2.3 FORMAS DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

A busca por um ambiente sustentável começa pela avaliação dos impactos oriundos das atividades humanas nos seus vários níveis de abrangência. Nesse contexto foram desenvolvidas algumas metodologias de análise da sustentabilidade a partir das quais podem ser obtidas informações que permitam aos empresários e governantes a definição de ações de ordem econômica, ambiental e social, considerando o horizonte de tempo necessário para o alcance dos objetivos (Devuyt, 2000; Kates et al., 2001; Ness et al., 2007; Pereira, 2008).

As metodologias foram classificadas por Ness et al. (2007) em três grandes grupos. As metodologias constantes do primeiro grupo buscam a determinação de índices e indicadores. As do segundo grupo avaliam a cadeia produtiva de um determinado bem concentrando a análise nos fluxos de entrada e saída de materiais e energia. Do terceiro grupo constam as metodologias que integram diferentes aspectos para análise. Na Tabela 3 são apresentados alguns exemplos de metodologias pertencentes a cada grupo.

Tabela 3: Exemplos de Metodologias para Avaliação da Sustentabilidade

<i>1º grupo</i>	<i>2º grupo</i>	<i>3º grupo</i>
Indicadores de Pressão Ambiental	Análise de Fluxo de Materiais	Análise Multicritério
Índice de Sustentabilidade Ambiental	Análise de Gasto Energético	Análise de Risco
Índice de Desenvolvimento Humano	Análise do Ciclo de Vida	Análise de Vulnerabilidade
Pegada Ecológica	Custeio do Ciclo de Vida	Análise de Custo/Benefício

Fonte: adaptado de Ness et al. (2007) e Pereira (2008)

Todas as metodologias têm por objetivo subsidiar a formulação de políticas públicas que promovam o desenvolvimento sustentável e possam ser usadas conforme a necessidade e as características dos estudos a serem desenvolvidos. As do terceiro grupo têm como característica principal, o fato de apresentarem um estudo baseado em cenários possíveis fazendo previsões para cada um deles. Em sua maioria, utilizam análise de sistemas integrando aspectos sociais e ambientais. As do segundo grupo se caracterizam por permitir avaliações tanto retrospectivas quanto prospectivas que suportem a tomada de decisões identificando riscos e ineficiências dos sistemas produtivos. Elas se concentram principalmente nos aspectos ambientais, mas podem integrar a dimensão econômica como no caso do Custeio do Ciclo de Vida (LCC – *Life Cycle Costing*) (Ness et al., 2007; Pereira, 2008).

As metodologias do primeiro grupo expressam o estado de desenvolvimento econômico, social e ambiental de uma região através de indicadores. Estas medidas, em geral, são quantitativas e quando combinados formam um índice. A utilização contínua de metodologias que se baseiam em índices e indicadores têm algumas vantagens como: a identificação de tendências de longo prazo e, a partir delas, a realização de projeções que permitam a formulação de novas políticas de desenvolvimento, e também a comparação entre regiões e países possibilitando a formulação de políticas mundiais, bem como o estabelecimento de acordos e protocolos entre países, visando o desenvolvimento sustentável (Ness et al., 2007).

Como exemplo destas metodologias tem-se os Indicadores de Pressão Ambiental (EPI), Índice de Sustentabilidade Ambiental (ESI), o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e a Pegada Ecológica. Os Indicadores de Pressão Ambiental (EPI – Environmental Pressure Indicators) foram desenvolvidos pelo departamento de Estatística da União Européia (Eurostat) para avaliação e comparação da sustentabilidade ambiental de seus países membros. É composto por 60 indicadores, seis em cada um dos dez campos do Quinto Programa de Ação Ambiental (Lammers e Gilbert, 1999), podendo também ser agregados em um índice para cada campo, fazendo até dez índices de pressão ambiental. Os indicadores contemplam esgotamento dos recursos naturais, resíduos produzidos, mudança climática e poluição do ar (European Commission and Eurostat, 2001). O Índice de Sustentabilidade Ambiental (ESI – Environmental Sustainability Index) é composto por 68 indicadores em cinco categorias diferentes: a situação dos sistemas ambientais (água, ar, solo, ecossistemas,

etc), a redução do estresse sobre os sistemas naturais, a redução da vulnerabilidade humana devido às mudanças climáticas, a capacidade social e institucional para enfrentar com os desafios ambientais e a habilidade em cumprir acordos e padrões internacionais de países e regiões. Ele foi desenvolvido para medir o progresso global em direção à sustentabilidade ambiental (*Centre for International Earth Science Information Network*, 2002; Ness et al., 2007; Pereira, 2008).

O Índice de Desenvolvimento Humano (HDI – *Human Development Index*) é usado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (UNDP) para a avaliação do progresso econômico e social nos diferentes países. Ele combina em um único valor três parâmetros: a longevidade - medida pela expectativa de vida ao nascer e o acesso ao conhecimento - avaliada por uma combinação da taxa de analfabetismo e de escolarização, e o acesso a recursos necessários para uma vida digna - medido pelo Produto Interno Bruto per capita (UNDP, 2004).

A Pegada Ecológica faz uma estimativa do consumo de recursos naturais e de área necessária para a absorção de resíduos e emissões causados pelas atividades de uma determinada população, sendo os resultados expressos em área per capita necessária para o consumo anual de bens e serviços (Wackernagel e Rees, 1996). Foi escolhida como objeto de estudo neste trabalho e será discutido com mais detalhes no capítulo 3.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou alguns métodos utilizados para medir a sustentabilidade das regiões. A busca pela sustentabilidade envolve a minimização dos impactos oriundos das atividades humanas sobre os recursos da natureza nos diversos níveis de abrangência de modo que atenda aos objetivos de desenvolvimento econômico, equidade social e preservação ambiental. O transporte, fundamental para o desenvolvimento econômico, gera externalidades que comprometem a qualidade de vida da sociedade colocando em risco a capacidade de gerações futuras alcançarem os mesmos objetivos. Neste trabalho a questão da sustentabilidade será tratada sob a ótica da Pegada Ecológica. O próximo capítulo apresenta uma revisão sobre o tema.

3 PEGADA ECOLÓGICA

A Pegada Ecológica é um indicador resultante de um método proposto na década de 90 (Rees, 1992) com objetivo de medir a relação entre a natureza e o consumo humano. Esta relação se baseia no fato de que cada indivíduo necessita de uma área na superfície terrestre que forneça bens e serviços essenciais à vida (Chambers et al., 2000). À Pegada Ecológica está associado o conceito de capacidade de suporte que considera que a terra é um sistema praticamente fechado e os recursos dos quais dependem as atividades humanas são finitos (Arrow et al., 1995). Na definição apresentada por Daily e Ehrlich (1992), capacidade de suporte é a população máxima que determinada área pode suportar sem reduzir sua habilidade de manter a espécie por um período indefinido de tempo. Neste caso, a sobrevivência dos indivíduos depende da quantidade de recursos disponíveis, do tamanho da população e da quantidade de recursos que cada um consome. Como, além da população, o consumo per capita vem aumentando de forma significativa ao longo dos anos, Rees (1996) apresenta uma nova definição para capacidade de suporte, qual seja, a máxima carga que pode ser imposta ao ambiente de forma segura pelo homem. Este viés considera o padrão de vida e níveis de consumo como variáveis fundamentais para sustentabilidade de uma população, implicando na utilização dos recursos na mesma taxa em que são produzidos.

Wackernagel e Rees (1996) exemplificam o conceito de pegada ecológica fazendo uma analogia simples. Um balde é abastecido com água a uma taxa fixa. A água no balde é o estoque que só pode ser retirado na mesma taxa que o balde é reabastecido. Essa seria uma taxa sustentável. De forma similar, a natureza é continuamente alimentada pelo sol que, através da fotossíntese, produz matéria orgânica, a base para todo o capital biológico. Sustentabilidade implica na utilização do capital natural na mesma taxa em que ele é produzido. Outro exemplo são as emissões de CO₂, como apresentado por WWF (2010), que podem exceder a taxa que as florestas são capazes de absorver. Por ser um gás de efeito estufa, o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera leva ao aumento da temperatura global e mudanças climáticas. O efeito estufa é um fenômeno natural que mantém a terra aquecida. O conjunto de gases que constitui a atmosfera absorve parte da radiação infravermelha emitida pela superfície da terra impedindo que haja grande perda de calor, importante para a manutenção da vida no planeta. O aumento da concentração destes gases na

atmosfera tem potencializado este efeito, sendo o CO₂ o gás mais emitido pelas atividades humanas, cerca de 77% (IPCC, 2007).

O cálculo da pegada ecológica propõe mostrar, em termos de área, o quanto uma determinada população está utilizando dos recursos da natureza para manter o seu padrão de vida. A visualização é possível quando comparada com a biocapacidade que é a taxa teórica máxima de oferta regenerativa de recursos proporcionada pela natureza. Como resultado final, tem-se o saldo ecológico, que segundo Monfreda et al. (2004), permite avaliar a sustentabilidade ambiental de uma região. O saldo ecológico é a diferença entre a biocapacidade e a pegada ecológica. Um resultado positivo indica que a região pode ser considerada ambientalmente sustentável, pois tem uma pegada menor do que a biocapacidade. Do contrário, um resultado negativo indica que a pegada de uma população excede a capacidade regenerativa do capital natural existente nesta região, considerando-a ambientalmente insustentável.

O foco do método da pegada ecológica está na avaliação do uso de áreas bioprodutivas para fornecer recursos, produtos e assimilar as emissões de CO₂. Assim, para cada área é estabelecida uma relação entre consumo e o rendimento médio nacional que posteriormente é redistribuída em hectares globais.

3.1 AS CATEGORIAS QUE COMPÕEM A PEGADA ECOLÓGICA

A pegada ecológica é composta a partir das necessidades de áreas bioprodutivas para a realização das atividades humanas. Estas áreas abrangem os ecossistemas globais que abastecem a economia humana com a maior parte de seus recursos biológicos renováveis. São classificadas em: Áreas de cultivo; Áreas de pasto; Áreas de florestas; Áreas de pesca; Áreas construídas e Área de energia (Wackernagel et al., 2005):

- i. Áreas de Cultivo: área ocupada para a produção de vegetais, frutas, cereais, algodão, trigo, milho etc., bem como de seus derivados.
- ii. Áreas de Pasto: área ocupada pelos requerimentos do gado como forragem cultivada e resíduos dos cultivos, bem como para produção de origem animal, como carne, leite, lã, etc.

- iii. Áreas de Florestas: área necessária para a obtenção de madeira e lenha bem como seus derivados como a madeira serrada e o papel.
- iv. Áreas de Pesca: área necessária para a produção de peixes e outros alimentos que consumidos pela população.
- v. Áreas Construídas: área ocupada por toda a infraestrutura relacionada com acomodação, transportes e produção industrial.
- vi. Área de Energia: área hipotética que deveria ser reservada para a absorção de CO₂. Esta área também é conhecida como a pegada dos combustíveis fósseis ou pegada de carbono e geralmente representa a maior fatia das pegadas ecológicas.

A pegada dos combustíveis fósseis pode ser abordada sob uma perspectiva de manutenção do capital natural ou uma perspectiva de assimilação dos resíduos. Este último estima a quantidade de área biologicamente produtiva adicional necessária para assimilar as emissões de CO₂ na atmosfera através de reflorestamento (IPCC, 2001). Monfreda et al. (2004) afirmam que esta abordagem não sugere que a absorção de CO₂ é a solução para as alterações climáticas e sim, ilustra quão maior o mundo teria que ser a fim de lidar com essas emissões. Ao fazer isso ele demonstra a necessidade de programas de redução de emissões de CO₂ uma vez que o potencial de absorção é limitado no espaço (área disponível para reflorestamento) e no tempo (florestas plantadas são dissipadores líquidos por poucas décadas antes que amadureçam e percam sua capacidade de absorção). Dados do IPCC (2001) indicam que 3,0 Gt de carbono são absorvidos por ano pelo planeta, sendo que apenas um terço deste valor é absorvido pelas áreas terrestres e, o restante, pelos oceanos. A abordagem de manutenção do capital natural calcula a área necessária para substituir os combustíveis fósseis com a sua energia equivalente em lenha. Monfreda et al. (2004) comentam que a lenha é escolhida como substituto padrão por ser historicamente o combustível dominante para a maioria das sociedades e o principal combustível que a biosfera fornece, sem a modificação humana. Biocombustíveis alternativos com menor necessidade de espaço (como o etanol, por exemplo) são possíveis, mas não ocorrem sem a intervenção humana ativa e processos industriais. Se alternativas de maior rendimento forem utilizadas para substituir a lenha, ou mesmo se as florestas fossem geridas para a produção de lenha, provocariam uma redução da pegada.

O componente nuclear difere das outras partes da pegada por produzir resíduos cujas áreas da biosfera consideradas no cálculo têm capacidade de assimilação mínima, quase nula.

Isso não implica dizer que a energia nuclear não apresenta impactos ambientais. Os autores do método escolheram incluir a energia nuclear como combustível fóssil e citam que, outra forma de considerá-la seria quantificando a área posta em risco pela liberação acidental no meio ambiente, com estimativas baseadas em precedentes históricos. Ou, ainda, considerar a pegada de um acidente nuclear somente quando este ocorrer, eliminando uma avaliação baseada no risco argumentando que a pegada ecológica retrata a área bioprodutiva real ocupada em determinado ponto no tempo (Wackernagel et al., 2005).

Na Figura 2 são apresentadas as pegadas ecológicas por área bioprodutiva ao longo dos anos. A pegada de todas as áreas aumentou desde a década de 60, porém área de energia foi que apresentou o maior crescimento nos últimos 40 anos. Passou de 0,84 bilhões de gha em 1961 para 9,63 bilhões de gha em 2007 (WWF, 2010). Além do aumento da população mundial a grande contribuição para o crescimento da área de energia é proveniente da utilização de maiores quantidades de energia para suprir as necessidades de consumo e sustentar as modificações no estilo de vida desta população.

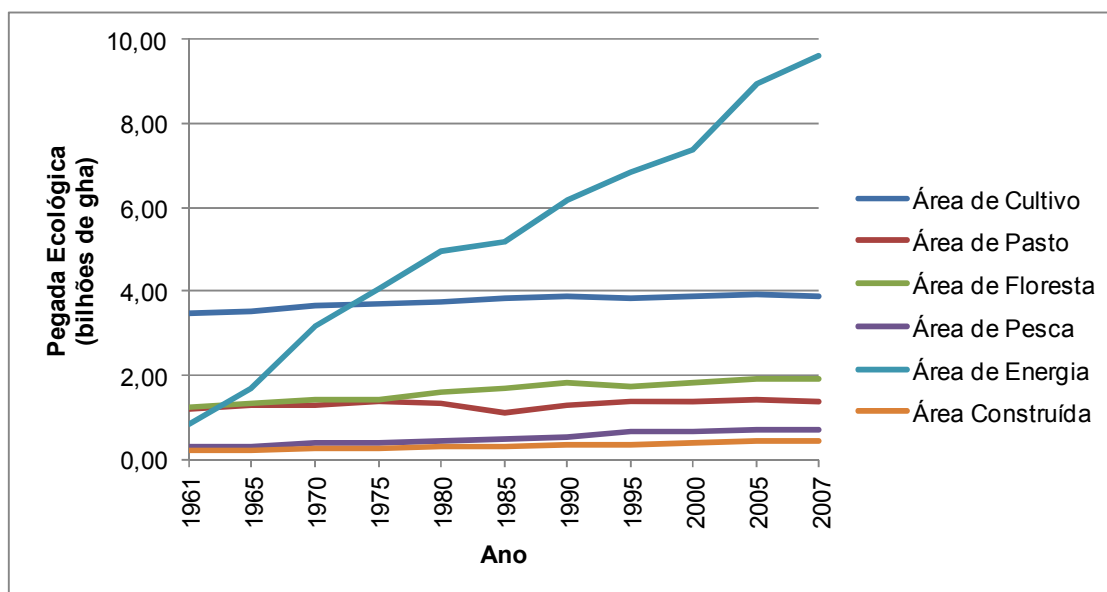


Figura 2: Pegada Ecológica por Área Bioprodutiva de 1961 a 2007

Fonte: WWF, 2010

A unidade de área utilizada é o hectare global - gha que é uma unidade padrão de área biologicamente produtiva. A conversão de hectares (ha) para hectares globais (gha) é feita utilizando-se dois fatores: o fator de equivalência e o fator de rendimento. Fatores de

equivalência representam a produtividade potencial média global de um determinado espaço bioprodutivo em relação à produtividade média global de todas as áreas bioprodutivas. O fator de rendimento descreve o quanto uma área bioprodutiva de um determinado país é mais (ou menos) produtiva do que a média global da mesma área (Monfreda et al., 2004). Alguns autores como Chi e Stone (2005), por exemplo, preferem não utilizar os fatores de equivalência, realizando uma análise separada por tipo de terra, e não comparando os resultados com outros estudos.

3.2 FATORES DE EQUIVALÊNCIA

Os fatores de equivalência (FE) são utilizados para permitir a comparação entre diferentes países, os quais têm qualidades e características diferentes de áreas para cultivos, pastagem, florestas e pesca. Os hectares para cada tipo de área bioprodutiva são convertidos em hectares globais ponderando sua produtividade com a produtividade média mundial. Essa ponderação permite definir a quantidade de hectares globais (gha) contidos em uma categoria de uso de terra ou área de pesca (ha), representando assim a produtividade potencial média da área considerada.

Para o cálculo dos fatores de equivalência para os diferentes tipos de área é utilizado um índice de adequação do modelo *Global Agro-Ecological Zones* – GAEZ. O modelo divide a terra em cinco categorias baseadas no potencial de produtividade agrícola de diversas variedades de cultivos com dados de tipo de solo, declividade, estações do ano, precipitação, etc. levando em conta o mesmo nível de inputs, como água e fertilizantes, independente das taxas de manejo. Os valores variam de muito adequada (0,9) a não adequada (0,1). Por ordem decrescente, a área mais adequada é a de cultivo, seguida por floresta; a menos adequada é a utilizada para pastagem. O cálculo é feito pela razão entre o índice de adequação médio ou produtividade potencial média de um tipo de área e o índice de adequação médio ou produtividade potencial média de todos os tipos de áreas conforme a equação dois (Ewing et al., 2010). Assim, um espaço destinado ao cultivo tem um fator de equivalência maior por ser mais produtivo do que uma área de pastagem. (Monfreda et al., 2004; Wackernagel et al., 2005).

$$FE = \frac{\text{Produtividade Potencial Média Global de um Tipo de Área}}{\text{Produtividade Potencial Média Global de Todas as Áreas}} \quad (1)$$

Os fatores de equivalência para o ano de 2007 estão listados na Tabela 4. Assim, um valor de $FE_{\text{cultivos}} = 2,51$ significa que cada hectare real cultivado equivale a 2,51 hectares globais e indica que a produtividade média mundial de áreas de cultivo foi mais que o dobro da produtividade média para toda as áreas. Neste mesmo ano, áreas de pasto tiveram um fator de equivalência $FE_{\text{pastos}} = 0,46$ mostrando que esta área atingiu, em média, 46% da produtividade da média mundial de hectares bioprodutivos.

Tabela 4: Fatores de Equivalência

<i>Tipo de área bioprodutiva</i>	<i>Fator de equivalência (gha/ha)</i>
Área de Cultivo	2,51
Área de Florestas	1,26
Área de Pasto	0,46
Área de Pesca	0,37
Área construída	2,51

Fonte: Ewing et al.(2010).

A pegada ecológica supõe que infraestrutura e estabelecimentos humanos estão localizados ao longo das regiões mais férteis do país, portanto o fator de equivalência para área construída é o mesmo das áreas de cultivo. Nos cálculos da pegada ecológica o valor do fator de equivalência referente às áreas de pesca é estimado como sendo sua capacidade de fornecer proteína animal em relação às áreas de pastagem. O método convencional da pegada ecológica exclui porções de terra onde a produtividade supostamente é insignificante (tundra, desertos, geleiras e mar aberto) porque os recursos naturais renováveis não estão concentrados o suficiente para serem adicionado à biocapacidade global. É importante ressaltar que os fatores de equivalência são os mesmos para todos os países, e variam anualmente.

3.3 FATORES DE RENDIMENTO

Fatores de rendimento (FR) descrevem o quanto uma área bioprodutiva de um determinado país é mais (ou menos) produtiva do que a média global da mesma área (Monfreda et al., 2004). Cada país tem seus fatores de rendimento que são calculados anualmente, um para cada tipo de área. Em um país onde o fator de rendimento para terras de

cultivo é igual a 1,5 apresenta produtividade média de cultivos igual a 1,5 vezes a produtividade média global dos cultivos do mundo. Segundo Monfreda et al. (2004), os fatores de rendimento refletem a tecnologia e as práticas de manejo prevaletentes no país, bem como a produtividade inerente de recursos renováveis. Em outras palavras, a produção agrícola do país, depende tanto da fertilidade do solo como dos métodos de colheita. No caso da absorção de carbono, presume-se que o fator de rendimento seja o mesmo de áreas de florestas, e às águas interiores atribui-se fator de rendimento igual a um devido à falta de um conjunto abrangente e global sobre a produtividade dos ecossistemas de água doce. Assim como o fator de equivalência, o fator de rendimento para áreas construídas é o mesmo das áreas de cultivo (Ewing et al., 2010). Alguns exemplos de fatores de rendimento para o ano de 2007 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Exemplos de Fatores de Rendimento de Alguns Países

	<i>Cultivo</i>	<i>Florestas</i>	<i>Pasto</i>	<i>Pesca</i>
Média Mundial	1,0	1,0	1,0	1,0
Algeria	0,3	0,4	0,7	0,9
Alemanha	2,2	4,1	2,2	3,0
Hungria	1,1	2,6	1,9	0,0
Japão	1,3	1,4	2,2	0,8
Nova Zelândia	0,7	2,0	2,5	1,0
Zâmbia	0,2	0,2	1,5	0,0

Fonte: Ewing (2010).

3.4 CÁLCULO DA PEGADA ECOLÓGICA

O cálculo da pegada ecológica pode ser feito utilizando-se duas abordagens. A primeira, a pegada ecológica convencional, denominada a abordagem do composto (*compound approach*), foi desenvolvida por Wackernagel e Rees (1996) e parte de dados agregados de fontes internacionais para efetuar os cálculos. A segunda, chamada abordagem do componente (*component approach*), foi desenvolvida pela consultora inglesa Best Foot Forward (BFF) e utiliza dados do ciclo de vida dos componentes relevantes de consumo de uma população como energia, transportes (todas as modalidades), alimentos, água, resíduos e infraestruturas. Lenzen (2001) e Monfreda et al. (2004) criticam esta abordagem colocando

que as limitações de análise do ciclo de vida de cada componente identificado podem produzir resultados incorretos.

A metodologia convencional calcula a pegada ecológica usando dados nacionais agregados (produção e produtividade) e dados do comércio internacional (importações e exportações). Tais dados agregados capturam a demanda de recursos sem a necessidade de informação sobre o uso final de cada um deles. Assim, o cálculo da pegada ecológica é feito relacionando-se a quantidade de cada área bioprodutiva utilizada ao longo do ano com seu rendimento médio nacional para o mesmo ano. O resultado é multiplicado pelo fator de equivalência para obter a quantidade de hectares globais de cada área utilizada para sustentar uma população ao longo de um ano. A estrutura de cálculo apresentada por Wackernagel et al. (2005) é ilustrada na Figura 3.

$$PE_{Consumo} = PE_{Produção Doméstica} + PE_{Importação} - PE_{Exportação} \quad (2)$$

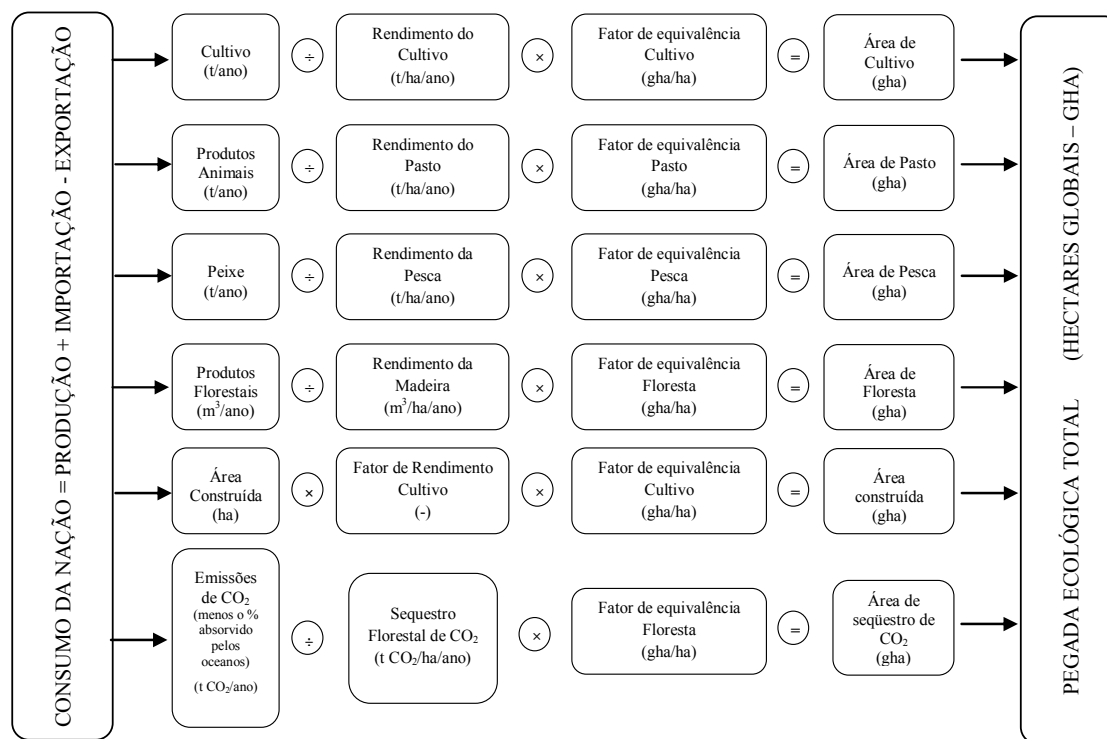


Figura 3: Estrutura de Cálculo da Pegada Ecológica

Fonte: Wackernagel et al. (2005)

As áreas para absorção de carbono são áreas fictícias onde se estima a área de floresta necessária para sequestrar as emissões de carbono do país. A taxa de sequestro de CO₂ pelas florestas do mundo é calculada a partir do modelo da *Global Fibre Supply Model* – FAO (FAO, 2000) e é igual à 1,09 tC/ha/ano. Com a introdução da pegada ecológica, este valor já sofreu algumas alterações ao longo dos anos. Wackernagel e Rees (1996) estimaram em 1,81 tC/ha/ano, e, em Wackernagel et al.(1999) o valor apresentado foi reduzido para 1,42 tC/ha/ano, sendo reduzido novamente em Wackernagel e Monfreda (2004) para 0,95 tC/ha/ano. O valor globalmente aceito é de 1,09 tC/ha/ano adotado pela *Global Footprint Network* desde 2005 (Scotti et al., 2009). O cálculo é realizado conforme apresentado a seguir:

$$SR = \frac{1,84 \text{ m}^3}{\text{ha} \cdot \text{ano}} \times \frac{0,5 \text{ t}_{dm}}{\text{m}^3} \times 1,9 \times 1,25 \times \frac{0,5 \text{ tC}}{\text{t}_{dm}} = \frac{1,09 \text{ tC}}{\text{ha} \cdot \text{ano}}$$

Onde SR é a taxa média de sequestro de CO₂ em florestas mundiais; 1,84 m³/ha/ano é a taxa média de crescimento das florestas, tal como definido pela FAO; 0,5 t_{dm}/m³ (t_{dm} = tonelada de matéria seca) é a densidade média de madeira em tora em peso seco (IPCC, 1997); 1,9 é a razão de expansão de florestas exploradas e é responsável pela biomassa não-comercial, extremidades e pequenas árvores (IPCC, 1997b); 1,25 é o fator que considera o aumento da taxa de absorção de CO₂ em 25% porque as raízes não estão incluídas no cálculo da biomassa partida a seco (IPCC, 1997b) e 0,5 tC/t_{dm} são as toneladas de carbono contidas em uma tonelada de matéria seca (Scotti et al., 2009).

3.5 CÁLCULO DA BIOCAPACIDADE

A biocapacidade é a oferta da natureza, expressa em hectares globais de modo a permitir a comparação com a pegada ecológica. É dada pela soma das áreas bioprodutivas (de cultivo, pasto, floresta, pesca, área construída e energia) multiplicadas pelos respectivos fatores de equivalência e o fator de rendimento, específico para cada país, conforme mostra a Figura 4. Estas áreas capturam a bioprodutividade do planeta ao qual um país ou região tem direito e representam a taxa teórica máxima da oferta de recursos que pode ser sustentada em cada território em função da tecnologia e do sistema de manejo vigentes para cada recurso. Contempla todas as áreas bioprodutivas a que um país tem direito, inclusive aquelas que não são utilizadas devido à geografia, economia, conservação, etc. A biocapacidade pode ainda

ser dividida em sub-regiões que podem ter fatores de rendimento diferentes. As áreas mais produtivas são as candidatas mais prováveis para a extração dos recursos (Monfreda et al., 2004). A pegada das atividades em uma região pode então ser comparada com sua respectiva biocapacidade permitindo avaliar até que ponto a atividade pode ser mantida dentro de suas fronteiras e com recursos locais.

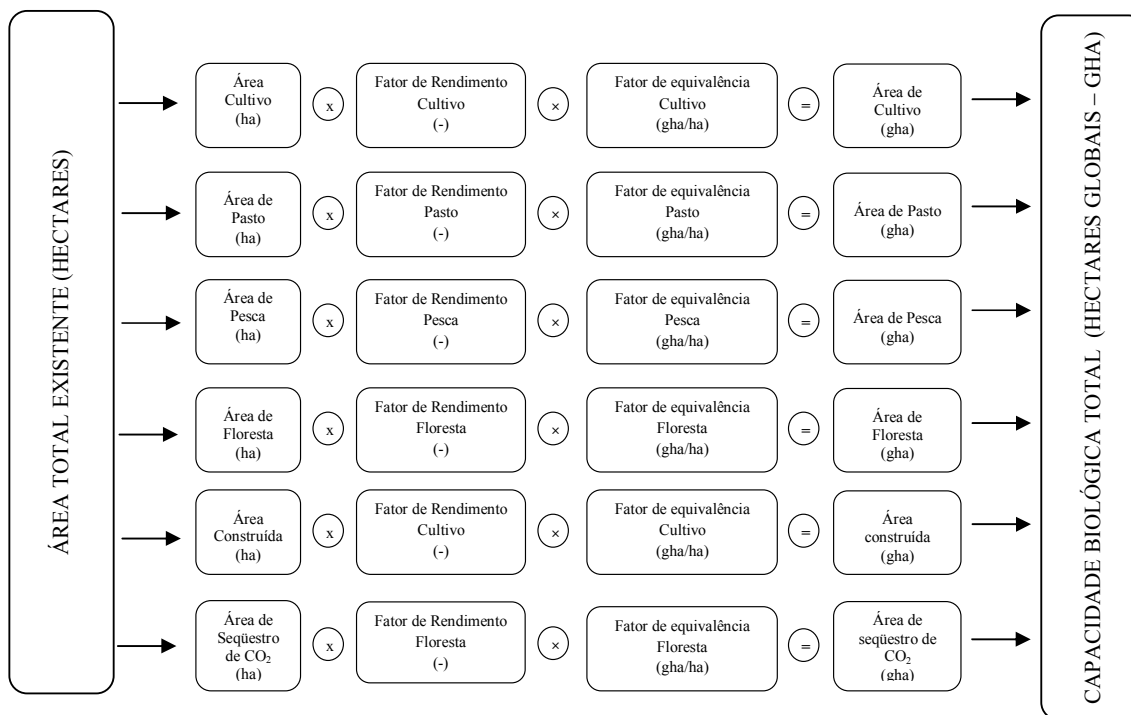


Figura 4: Estrutura de Cálculo da Biocapacidade

Fonte: Wackernagel et al. (2005)

3.6 ESTUDOS REALIZADOS

O método de cálculo da pegada ecológica foi aplicado, inicialmente, para os países comparando esta pegada com a capacidade biológica disponível para consumo humano e determinação de dívidas ecológicas. A WWF - *World Wide Fund for Nature International* em parceria com a *Global Footprint Network* segue realizando estes cálculos para acompanhar o estresse imposto aos ecossistemas em função do desenvolvimento. Conforme dados do último relatório da WWF (2010), apresentados na Tabela 6, a biocapacidade global em 2007 é de aproximadamente 11,9 bilhões de gha ou 1,8 hectares biologicamente produtivos por pessoa

no planeta e, em 2007, o uso correspondia a 18 bilhões de gha o equivalente a 2,7 hectares biologicamente produtivos por pessoa em média, 50% acima do limite. Dito de outra forma, as pessoas usavam o equivalente a 1,5 planetas em 2007 para apoiar as suas atividades. A avaliação da Pegada Ecológica indica que as atividades humanas têm excedido a oferta da natureza e esse excesso é ecologicamente insustentável.

Tabela 6: Evolução da Pegada Ecológica 1961 – 2007

	1961	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2007
População Global (bilhões)	3,1	3,3	3,7	4,1	4,4	4,8	5,3	5,7	6,1	6,5	6,7
Pegada Ecológica Total (bilhões gha)	7,2	8,4	10,1	11,2	12,3	12,6	14,0	14,8	15,5	17,3	18,0
Biocapacidade total (bilhões gha)	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,9	12,0	12,0	11,9	11,9
Razão Pegada/Biocapacidade	0,63	0,73	0,88	0,97	1,06	1,07	1,18	1,24	1,29	1,45	1,51

Fonte: WWF (2010)

A facilidade de visualização do desequilíbrio ecológico tornou o indicador muito popular. Muitos estudos utilizando a Pegada Ecológica, nos vários níveis de abrangência, foram publicados nos últimos anos. Alguns autores como Krotscheck e Narodoslowsky (1996), Bicknell et al. (1998), Eder e Narodoslowsky (1999), Lenzen e Murray (2001), McDonald e Patterson (2004), Wiedmann et al. (2006), apresentam algumas modificações na metodologia de cálculo original para melhorar a precisão dos resultados. Podem ser citados como exemplo os índices SPI ou *Sustainable Process Index* de Krotscheck and Narodoslowsky (1996) que relaciona a área necessária para a realização de qualquer processo (produtos ou serviços) com a área que cada pessoa é capaz de usar em uma determinada região e o DAI ou *Dissipation Area Index* de Eder and Narodoslowsky (1999) que calcula a necessidade de terra utilizando o conceito de capacidade de assimilação.

Contribuições em diversas áreas foram apresentadas. Estudos sobre suprimento de energia podem ser encontrados em Ferng (2002), Stoeglehner, (2003); Medved (2006); Chen et al (2007). Aplicação do método em uma empresa de abastecimento de água em Sydney é apresentada por Lenzen et al. (2003) enquanto Wood and Lenzen (2003) calculam a pegada ecológica da Escola de Física da Universidade de Sydney, e no CSIRO Sustainable Ecosystems (Departamento de Pesquisa Científica e Organização Industrial).

Desde os primeiros estudos apresentados o transporte ocupa uma posição proeminente. Contribuições específicas para a atividade foram apresentadas em alguns trabalhos como o de Barrett (2003) e Muñiz (2005) para o transporte urbano de passageiros, com ênfase em carga urbana são importantes as contribuições de Holden (2004) que analisa a influência da localização de atividades comerciais na pegada ecológica de entregas urbanas de mercadorias e Muñuzuri et al. (2010) que estabelecem um método específico para estimar a pegada ecológica do transporte de carga urbana.

Chi e Stone Jr (2005) apresentam uma metodologia para avaliar a pegada ecológica de redes de transporte atuais e futuras com aplicação para o condado de Houghton em Michigan. O artigo ilustra a facilidade de aplicação do método. A pegada total do transporte foi calculada somando duas parcelas, a pegada física da rodovia com base na área pavimentada e a pegada da energia com base na área de floresta requerida para absorver emissões de carbono produzidas oriundas da construção, manutenção e pelas viagens na rede durante um ano. A pegada física foi estimada como sendo 356 ha (3,56 km²) de área de terra ocupada pela rede. A rede em estudo estava composta por uma rodovia de 2 faixas por sentido com uma largura total aproximada de 18 metros (incluindo os acostamentos) e um comprimento total de 195 km. Em seguida, para calcular a pegada de energia, foi utilizado um fator que permite a conversão em hectares de floresta necessária para absorver um litro de combustível, que inclui: (i) o número de hectares de floresta necessários para absorver CO₂ proveniente da queima de 1 litro de combustível; (ii) emissões indiretas oriundas da construção e manutenção da rede; e (iii) fator de ajuste de floresta, pois as florestas do condado absorvem 10 % a mais de carbono. Considerando que cada litro de gasolina e diesel produz aproximadamente 0,035 gigajoules de energia e assumindo que 1 ha de floresta pode absorver 1,8 ton de carbono que é gerada pelo consumo de 100 gigajoules de combustível fóssil, são necessários 0,00035 hectares de floresta para assimilar o CO₂ emitido da queima de 1 litro de combustível. Para a próxima parcela, os autores usaram o dado fornecido por Wackernagel e Rees (1996) que as emissões indiretas de CO₂ utilizadas na construção e manutenção de rodovias equivalem a 45% do total de combustível consumido anualmente nas viagens. Assim, o fator de conversão é 0,00045675. Este fator foi aplicado às viagens totais anuais dos veículos e à média de consumo da frota e somado à pegada física para obtenção da pegada total do transporte, os resultados são apresentados na Tabela 7. Como o objetivo deste trabalho não era comparar a pegada com a biocapacidade, o resultado final foi dado em hectares, sem a conversão para hectares globais.

Tabela 7: Valores da Pegada Ecológica Apresentado no Trabalho de Chi e Stone (2005)

	<i>Viagens totais anuais dos veículos (km)</i>	<i>Consumo médio da frota (l/km)</i>	<i>Fator de conversão (ha-floresta/l)</i>	<i>Pegada energia (ha)</i>	<i>Pegada física (ha)</i>	<i>Pegada Total (ha)</i>
1996	245.247.478	0,125	0,00045675	14.002	356	14.358
1997	247.277.903	0,124	0,00045675	14.005	356	14.361
1998	256.606.388	0,124	0,00045675	14.533	356	14.889
1999	269.187.059	0,127	0,00045675	15.615	356	15.971
2000	269.880.668	0,129	0,00045675	15.902	356	16.258
2001	288.884.626	0,122	0,00045675	16.098	356	16.454

3.7 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

A maior vantagem da pegada ecológica sobre outros indicadores reside na mensagem clara e na sua facilidade de entendimento (Moffatt, 2000). A clareza da mensagem resgata e reforça a importância da utilização estratégica do capital natural para o desenvolvimento econômico e provoca uma nova forma de pensar no meio ambiente usando uma abordagem sistêmica (Rees, 2000). Rees (2000), Chambers et al. (2000) e Bellen (2007) concordam que uma importante contribuição é a adequação da pegada ecológica às leis da física: a lei do balanço de massa e a segunda lei da termodinâmica ou lei da entropia; o que pode ser entendido como uma visão interdisciplinar dos problemas ambientais.

O método apresenta algumas limitações. Uma das críticas mais apresentadas na literatura é o fato de concentrar-se na dimensão ecológica não considerando as dimensões sociais e econômicas da sustentabilidade (Bellen, 2007; Hails et al., 2006). Lenzen e Murray (2001), ao calcularem a pegada ecológica da Austrália, identificaram uma limitação com relação à formulação de políticas públicas em prol da sustentabilidade para países com boa quantidade de recursos naturais. A forma agregada das informações não revela onde os impactos realmente ocorrem, bem como sua natureza e gravidade, tornando difícil formular respostas políticas adequadas. Eles citam como exemplo que os cálculos feitos por Wackernagel (1997) para alguns países como Austrália, Indonésia, Malásia e Brasil apresentaram saldo positivo no cálculo da pegada sugerindo que estas populações estão usando suas terras de forma sustentável, sem considerar, por exemplo, as altas taxas de desmatamento e as diferenças entre padrões de consumo nas diferentes regiões. Bicknell et al.

(1998) e Van Vuuren e Smeets (2000) fizeram as mesmas críticas sobre trabalhos aplicados à Nova Zelândia, Benin, Butão, Costa Rica e Suécia.

Moffatt (2000) apresenta como limitação o fato ser uma medida estática que tem por finalidade refletir um estado atual e sensibilizar os diversos setores quanto à necessidade de mudança. O mesmo autor salienta a necessidade de desenvolver uma abordagem dinâmica para explorar diferentes cenários de desenvolvimento bem como a sugestão de políticas para alcançar os objetivos desejáveis. Stoeglehner e Narodoslowsky (2008) apresentam uma discussão sobre possíveis contribuições da pegada ecológica em três processos de tomada de decisão, quais sejam: Avaliação Ambiental Estratégica, Agenda 21 local e regional e Análise do Ciclo de Vida.

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou uma revisão teórica sobre a pegada ecológica, indicador que representa a relação entre a natureza e o consumo humano. É um indicador que tem sido bastante utilizado nas diversas áreas do conhecimento. Alguns trabalhos como os de Cordeiro et al., 2010; Muñiz et al., 2005; Barrett et al. 2003 e Barrett et al., 2002 abordaram o transporte como componente com importante contribuição à pegada ecológica das cidades a partir dos deslocamentos realizados. Esta tese pretende contribuir considerando a parcela que corresponde aos incidentes rodoviários, cujo efeito na pegada ecológica é medido em função do tempo em que a pista fica bloqueada alterando o fluxo normal de operação. No próximo capítulo são apresentadas as análises que subsidiaram o desenvolvimento do método.

4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

A operação dos sistemas de transportes pela sua própria natureza causa impactos ao meio ambiente que intensificam o efeito estufa. Quando esta operação é interrompida pela ocorrência de algum incidente, a magnitude dos impactos pode agravar o problema. Nesse sentido, gerenciar a operação de transporte rodoviário envolve planejar dois tipos de situações distintas: os incidentes que podem ser programados, como obras para a manutenção e conservação da via, e o atendimento aos incidentes aleatórios, como os acidentes, de modo a manter o fluxo normal de operação.

Este capítulo apresenta as etapas realizadas para o desenvolvimento do método proposto no capítulo 5. O método está voltado para utilização no planejamento e operação de rodovias de pista simples, com duas faixas de operação e com fluxo bi-direcional auxiliando no diagnóstico ambiental dos incidentes. Os resultados subsidiam a avaliação dos benefícios ambientais de investimentos em melhoria da segurança viária, em aumento da capacidade da via, no projeto viário – considerando larguras adequadas para os acostamentos, no planejamento das atividades de conservação e dos serviços de atendimento ao usuário.

O desenvolvimento do método considerou análises qualitativas realizadas através de entrevistas individuais com dois especialistas em rodovias, o Gestor de Projetos e o Coordenador Técnico do consórcio UNIVIAS, análise dos Manuais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e documentos públicos das Agências Reguladoras de Serviços de Transportes. Esta análise subsidiou a elaboração do método proposto neste estudo a partir da identificação das variáveis que influenciam na avaliação dos incidentes.

4.1 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS INCIDENTES

Para subsidiar a elaboração do método foi realizada uma análise qualitativa dos incidentes rodoviários. Nesta etapa foram realizadas entrevistas com especialistas para obtenção de informações detalhadas sobre as operações e a comparação das mesmas com os Manuais do DNIT e os PER – Programas de Exploração das Rodovias no Brasil.

4.1.1 *Análise qualitativa dos incidentes do tipo obras na via*

O DNIT (2005) define atividades de manutenção de rotina como um conjunto de serviços executados, nas rodovias em tráfego, de forma permanente, com programação regular e periódica, relacionados ao reparo e à manutenção rotineira dos elementos componentes das rodovias e de sua faixa de domínio. A preservação das características técnicas e operacionais do sistema rodoviário conforme padrões de serviços estabelecidos por norma têm por objetivo manter os elementos da rodovia tão próximos quanto possível das condições originais em que foram construídos proporcionando conforto e segurança aos usuários além de manter o fluxo dos veículos.

As tarefas de conservação se dividem em três grupos (DNIT, 2005):

1. Conservação Corretiva Rotineira: conjunto de operações que tem como objetivo reparar ou sanar um defeito e restabelecer o funcionamento dos componentes da rodovia.
2. Conservação Preventiva Periódica: conjunto de operações realizadas periodicamente com o objetivo de evitar o surgimento ou agravamento de defeitos. A frequência de execução depende do trânsito, da topografia e do clima.
3. Conservação de emergência: conjunto de operações necessárias para reparar, repor, reconstruir ou restaurar trechos ou estrutura da rodovia, que tenham sido seccionados, obstruídos ou danificados por um evento extraordinário, ocasionando a interrupção parcial ou total do tráfego da rodovia.

Em complemento a esses grupos podem-se adicionar as atividades de restauração e de melhoramentos. A restauração tem a finalidade de conferir ao pavimento existente um novo aporte estrutural de modo a torná-lo apto a cumprir um novo ciclo de vida. Tarefas de melhoramentos são desenvolvidas em atendimento a demandas de cunho operacional e compreendem serviços que complementam ou modificam a infraestrutura existente.

A execução de serviços de manutenção do pavimento e de obras de arte em rodovias, assim como a ocorrência de situações de emergência, são fatores que determinam o surgimento de problemas de fluidez e segurança na circulação de veículos. Situações deste tipo constituem-se em fatos imprevistos para quem está dirigindo ao longo da rodovia em condições de velocidade relativamente constantes. Para a manutenção da conformidade dos

trechos rodoviários são necessárias inspeções permanentes para determinação do tipo de defeito e do local em que ocorrem, bem como se estão dentro dos padrões aceitáveis por norma específica. Com o objetivo de manter a qualidade da via e não aumentar o risco de ocorrências de acidentes, o Manual de Conservação Rodoviária do DNIT (2005) descreve as atividades e os prazos para a correção das não conformidades na rodovia conforme exemplo apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Exemplos de Atividades e Prazos para Correção de Não Conformidades

<i>Elemento</i>	<i>Nº</i>	<i>Caracterização</i>	<i>Prazo</i>
Pavimento	AP1	Correção de panela ou buraco na faixa de rolamento	24 horas
Pavimento	AP6	Correção de trincas severas	1 mês
Obras de Arte Especiais	AP 37	Junta de dilatação: substituição e/ou reparo	1 semana
Sinalização	AP 43	Recomposição de sinalização horizontal	72 horas

Fonte: DNIT (2005)

Por consistirem em incidentes que modificam o fluxo normal de operação, durante a execução dos serviços de conservação devem ser tomados alguns cuidados com relação à segurança de modo a garantir que os trabalhos somente sejam iniciados após a instalação dos equipamentos de sinalização e controle do tráfego. Os dispositivos de sinalização a serem utilizados dependerão do tempo de execução da obra. Para obras de curta duração assim como no caso de emergências, como acidentes, desmoronamentos e erosão da pista, deve-se dar preferência aos portáteis possibilitando uma rápida instalação ou desativação. O mesmo não se faz necessário para as de longa duração, assim, nestes casos, deverão ser desenvolvidos projetos de desvio de tráfego e a instalação de elementos fixos com características de durabilidade iguais as necessárias para uma pista normal de tráfego.

A localização da obra na pista de rolamento determinará a alteração da circulação de forma específica, conforme a situação bloqueie o acostamento, faixas à direita, esquerda, no

centro ou em toda a pista. O Manual de Sinalização de Obras e Emergências em Rodovias DNIT (DNIT, 2010) define projetos-tipo, para atender a 37 situações de bloqueio de tráfego, das quais 28 são para obras, dispendo sobre a sinalização horizontal, sinalização vertical e a colocação dos vários dispositivos componentes, tais como: cones, balizadores, piquetes, barreiras, placas, etc. Como exemplos são apresentados nas Figura 5 e Figura 6 dois projetos-tipo para desvio de tráfego quando ocorre o bloqueio da pista. A Figura 5 mostra um projeto para sinalização de obras com bloqueio parcial de uma faixa, para uma rodovia pista simples, com uma faixa por sentido, e desvio de tráfego no sentido oposto. A Figura 6 mostra um projeto para sinalização de obras com bloqueio de meia pista, para uma rodovia de pista simples, com uma faixa por sentido, e tráfego com circulação alternada.

Todas as situações que exigem o bloqueio da pista, ou parte dela, modificam consideravelmente o fluxo de tráfego. Nestes casos, se faz necessário uma redução da velocidade dos veículos em circulação tanto para a segurança dos usuários da via como dos trabalhadores das obras. Além das questões de segurança, grandes congestionamentos, atrasos e acréscimos nos níveis de emissões podem resultar da combinação de reduções de velocidade com altos volumes de tráfego. Outro componente que provoca importante modificação nos padrões de emissões é o modo de condução dos veículos. Acelerações mais bruscas e que exigem mais potência do motor tendem a emitir mais poluentes do que acelerações mais suaves (Ariotti et al., 2008).

O impacto das atividades de conservação na pegada ecológica é apresentado na Figura 7 e parte das atividades necessárias à operação das vias e que causam danos às áreas bioprodutivas. Em um nível mais abrangente, todas as atividades que ocorrem em uma parte do corpo estradal e que demandam o bloqueio de uma parte da pista de rolamento afetam a pegada ecológica a partir das emissões oriundas dos congestionamentos. Assim, o tempo de execução das atividades é uma importante variável de planejamento cuja redução impacta positivamente reduzindo a pegada ecológica das obras.

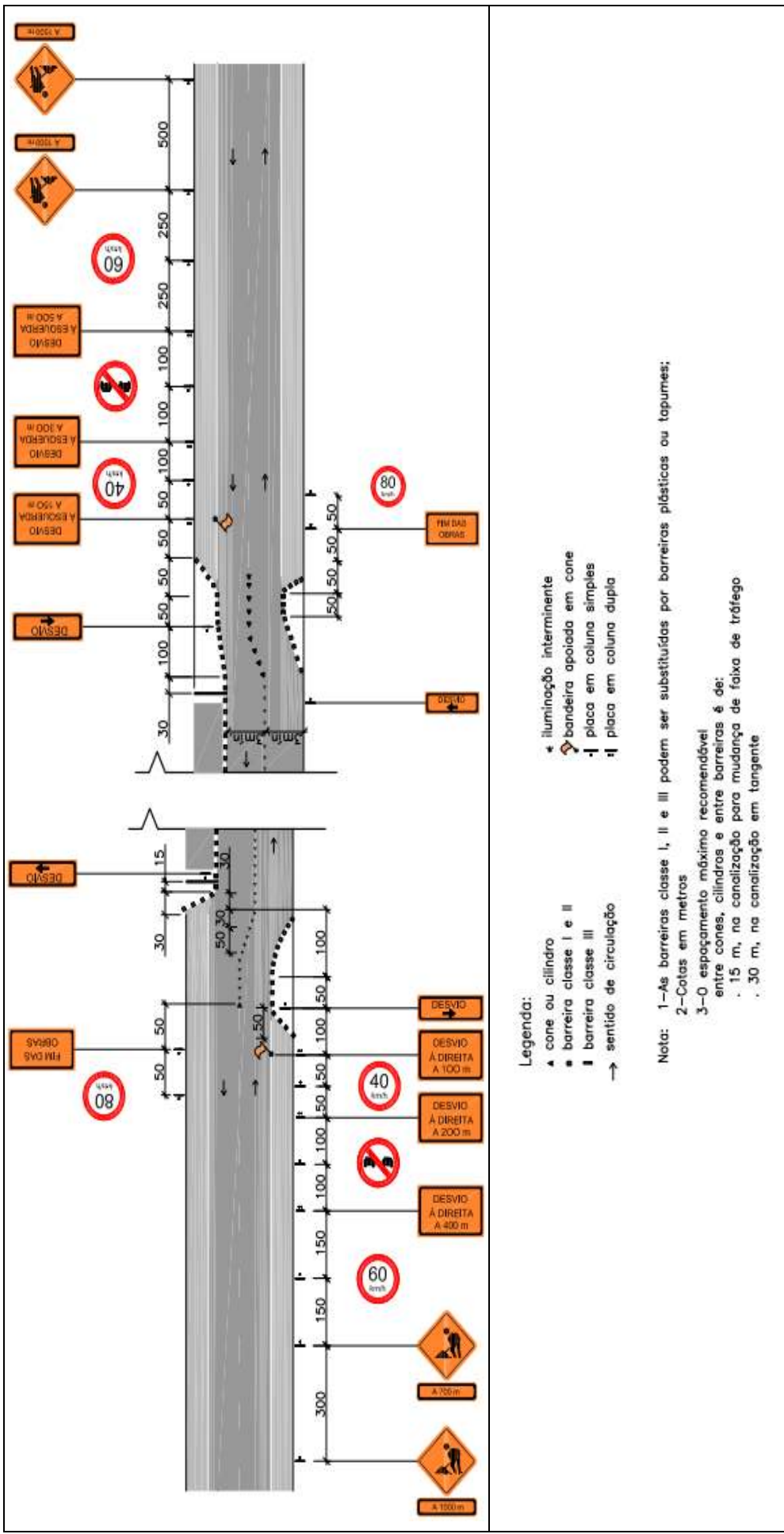


Figura 5: Projeto-Tipo para Desvio de Tráfego no Fluxo Oposto em Rodovia de Pista Simples para Bloqueio de Meia Faixa

Fonte: DNIT (2010)

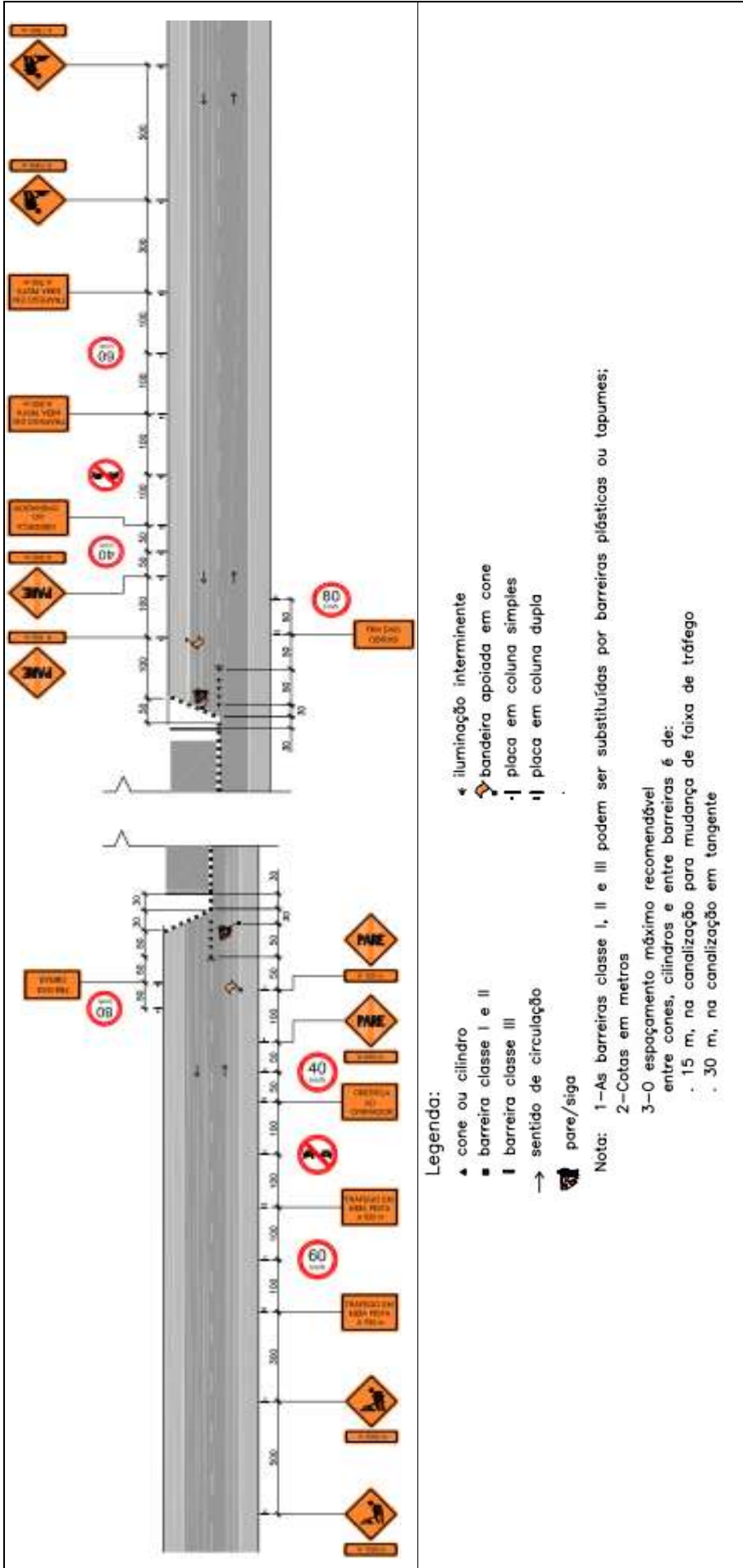


Figura 6: Projeto-Tipo para Desvio de Tráfego com Circulação Alternada em Rodovia de Pista Simples para Bloqueio de Meia Pista

Fonte: DNIT (2010)

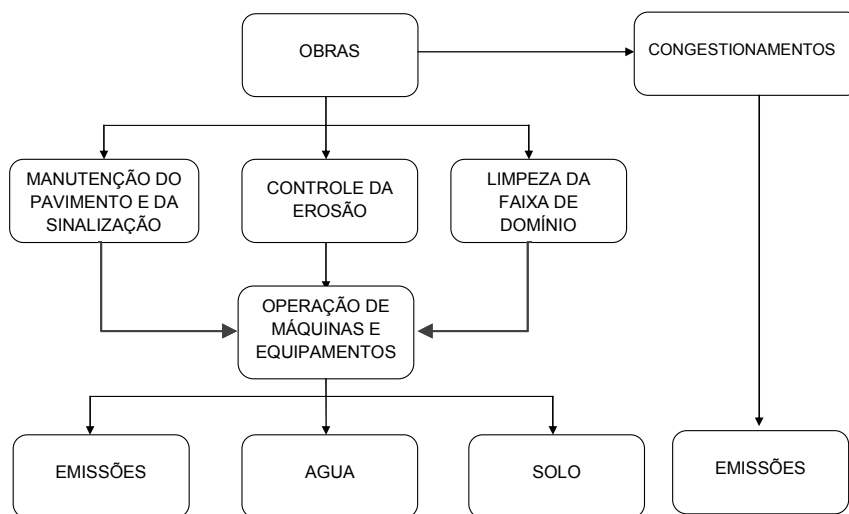


Figura 7: Impacto das Obras na Pegada Ecológica

As atividades de conservação que podem provocar um aumento na pegada ecológica, de forma direta, são limpeza da faixa de domínio, manutenção do pavimento e recuperação da sinalização horizontal e controle de erosão. Para a realização destas atividades são utilizados equipamentos como tratores, rolos compactadores, máquinas para pintar faixas, acabadoras de asfalto, etc. (Fogliatti et al., 2004) que provocam um aumento nas emissões atmosféricas e a poluição das águas pelos resíduos de óleos e graxas decorrentes da manutenção inadequada.

A limpeza da faixa de domínio consiste na remoção da vegetação na área da infraestrutura da rodovia e de seus equipamentos. Faz-se necessária para melhorar a visibilidade dos motoristas quanto à geometria da via e sinalização vertical. Pode ocorrer a degradação do uso do solo devido a utilização de produtos químicos para controle da vegetação.

Nas superfícies expostas dos taludes, aterros e plataformas ao longo da rodovia pode haver o escorregamento de solo causando danos a operação da via e reduzindo a fluidez do tráfego. Além de configurar uma situação de emergência, este processo provoca a perda de grandes quantidades de solo reduzindo a área bioproductiva correspondente. A execução de

obras para controle da erosão gera um aumento no nível de emissões pela utilização de equipamentos apropriados.

A manutenção e recuperação do pavimento e da sinalização horizontal são as obras mais comuns de conservação de rotina. A deterioração ocorre devido a ação intensa do tráfego, excesso de cargas e intempéries. Esta atividade em geral é programada e exige um projeto de desvio do tráfego para garantir a segurança do usuário durante o tempo que a pista fica bloqueada para a realização do serviço. É uma atividade que pode reduzir muito a capacidade da via e, com isso, provocar grandes congestionamentos em vias com alto volume de tráfego. Gera um aumento nos níveis de emissões oriundos do congestionamento e dos equipamentos necessários à execução do serviço. A manutenção inadequada dos equipamentos pode causar contaminação do solo e da água com resíduos de graxas e óleos.

4.1.2 *Análise qualitativa dos incidentes do tipo acidentes*

Acidente rodoviário é um evento que ocorre na via pública decorrente do trânsito de veículos, animais e pessoas, que resulta em danos humanos e materiais. Como consequência, tem-se o sofrimento causado pelas mortes e danos às vítimas, e o custo econômico que se situa entre 1 e 2% do PIB (IPEA, 2006). Vários fatores, ou a combinação deles, contribuem para a ocorrência dos acidentes de trânsito, são eles: (i) veículo; (ii) via; e (iii) usuário. Assim, para que ocorra um acidente é preciso que haja falha na interação entre os elementos (Tamayo e Sinay, 2005).

Quando ocorre um acidente rodoviário há uma interrupção no fluxo normal de operação da via provocando alterações no modo de condução dos veículos no que diz respeito à atenção, às mudanças de faixa e *car following* (Chatterjee, 2009 e Coelho, 2010). Dependendo da gravidade do acidente e do tempo de atendimento, a reorganização do trânsito de veículos pode ser muito demorada o que, por sua vez, causa maiores níveis de congestionamento, aumento do consumo de energia e aumento dos níveis de emissão de poluentes. O tempo de atendimento pós-acidente é um fator crítico não só para a operação do sistema de transporte, mas também para a manutenção da expectativa de vida de pessoas com lesões mais graves. Com o objetivo de reduzir este tempo e minimizar o impacto do acidente, algumas exigências são feitas às empresas que operam a rodovia como, por exemplo, serviços de inspeção de tráfego, guinchos e atendimento médico a acidentados.

O serviço de inspeção de tráfego consta de veículos que circulam permanentemente no trecho de modo a detectar a necessidade de ajuda ao usuário bem como a identificação de problemas nas pistas e faixa de domínio. O número de veículos necessários é dimensionado a partir do tempo médio de circulação em cada sub-trecho, que é o intervalo de tempo necessário para passar pelo mesmo ponto de seu sub-trecho. A ARTESP – Agência de Transporte de São Paulo, por exemplo, fixou este tempo em 90 minutos em condições normais de operação. A ARTESP exige das empresas que operam as rodovias do estado um nível de serviço de 90%, o que significa que o tempo médio de circulação em cada sub-trecho não pode ultrapassar 90 minutos em 90% dos casos. Com este tipo de serviço provoca um aumento no número de emissões, algumas empresas estão começando a utilizar câmeras para a inspeção e acompanhamento do tráfego.

O serviço de guincho compreende uma rede de veículos do tipo guincho, leve, médio e pesado destinados a realizar as operações de desobstrução da pista, remoção de veículos e de cargas tombadas dentro e fora da plataforma. O dimensionamento é feito a partir do tempo máximo previsto para atendimento que, a AGERGS - Agência Estadual de Regulação dos Serviços Públicos Delegados do RS fixa em 60 minutos e a ARTESP fixa em 30 minutos, ambas com nível de serviço de 90% dos casos atendidos dentro deste tempo máximo. Assim, os veículos permanecem estacionados e somente se deslocam quando acionados.

O serviço de atendimento médico a acidentados está composto por veículos do tipo ambulância, equipadas e operadas por pessoal qualificado. O dimensionamento é feito a partir do tempo máximo previsto para a chegada até o local de atendimento. A AGERGS - Agência Estadual de Regulação dos Serviços Públicos Delegados do RS, por exemplo, fixou este tempo em 30 minutos, já a ARTESP fixou em 10 minutos, ambas com 90% de nível de serviço. Como o número e a localização ideal dos veículos são cruciais para atender às exigências de tempo, Gonçalves et al. (1995), propuseram um modelo para melhorar o tempo de resposta com a otimização da distância média de viagem das ambulâncias baseado no trabalho de Anderson e Fontenot (1992) que concluíram que uma melhor performance do sistema é obtida deixando os veículos estacionados em pontos estratégicos da rodovia aguardando a chamada para atendimento. Na prática, os veículos são posicionados de modo a melhorar a resposta em locais com maior incidência de acidentes.

Exigências de tempo cada vez menores decorrem da possibilidade de salvar vidas com grave risco de morte, de reduzir as sequelas de ferimentos graves e da necessidade de manutenção do fluxo normal de operação da rodovia. Assim, o Fluxograma da Figura 8 apresenta, de forma resumida, os procedimentos para o atendimento a um acidente descritos no Manual de Resgate de Acidentados do DNER (1997). As informações do manual DNER (1997) foram complementadas durante a entrevista com o coordenador técnico da empresa Consórcio UNIVIAS. A ocorrência de um acidente pode ser comunicada por qualquer pessoa através do serviço de apoio ao usuário. É comum um usuário que passe imediatamente após o incidente entrar em contato ou até mesmo algum dos envolvidos, caso esteja em condições de fazê-lo. A ligação chega diretamente no CCO - Centro de Controle Operacional da empresa concessionária que abre um protocolo e registra a ocorrência. A primeira informação a ser registrada é o quilômetro em que ocorreu ou algum ponto de referência para a classificação do trecho. Na mesma ligação o operador procura obter mais informações como o tipo e número dos veículos envolvidos, bem como o número de vítimas. A primeira providência é encaminhar a ambulância ao local. Caso tenha sido possível identificar um grande número de vítimas, o operador aciona o corpo de bombeiros e outras ambulâncias de municípios próximos e, em seguida comunica a polícia e o guincho.

No procedimento padrão, a ambulância de resgate é a primeira a chegar ao local e o primeiro passo é organizar a via de modo a garantir a segurança do atendimento. Em alguns poucos casos, pode acontecer de algum carro da polícia, guincho ou o veículo de inspeção estar passando pelo local e então o mesmo entra com a ocorrência e começa a organizar a via antes do resgate chegar. Quando a ambulância chega ao local o motorista estaciona (a pelo menos 30 m do local do acidente) e liga as luzes de alerta, pois permite que os usuários da via a visualizem a 3 km de distância em condições de traçado favoráveis. Cada ambulância opera com dois integrantes, enquanto um deles verifica o estado das vítimas o outro posiciona os cones para bloquear a pista e executar o desvio de tráfego. Alguns exemplos de sinalização de emergência e desvio de tráfego para rodovia de pista simples são apresentados no Manual de Sinalização de Obras e Emergências em Rodovias do DNIT (DNIT, 2010).

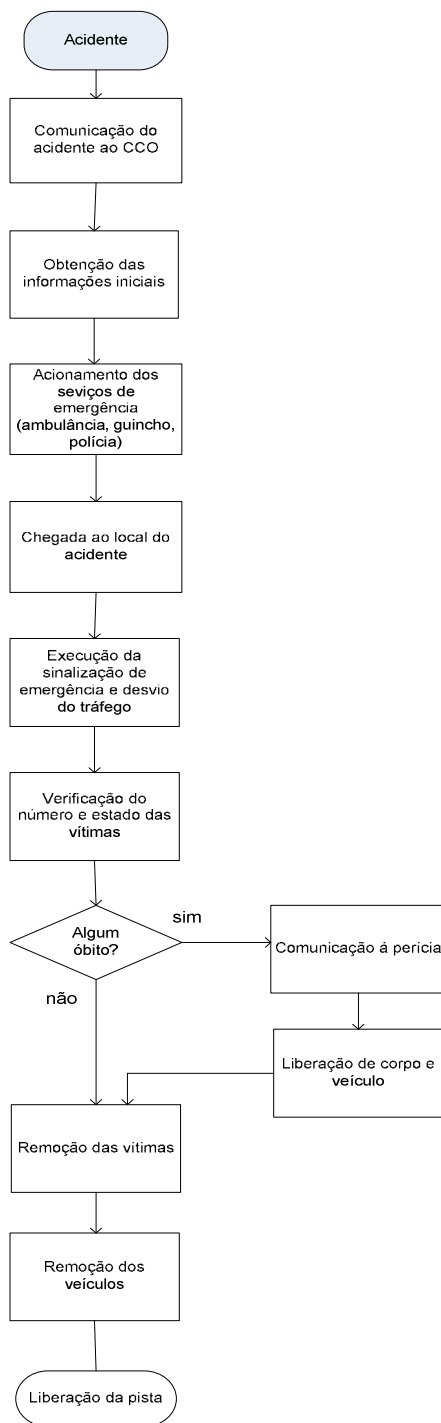


Figura 8: Procedimento de Atendimento a um Acidente

Fonte: adaptado de DNER, 1997

A Figura 9 mostra um exemplo de sinalização de emergência para ocorrências com bloqueio de uma faixa em rodovia de pista simples e com circulação alternada. A Figura 10 mostra um exemplo de sinalização de emergência para ocorrências com bloqueio de uma faixa em rodovia de pista simples e com desvio pelo acostamento. O número de vítimas bem como o estado das mesmas é repassado ao centro de controle que por sua vez informa aos hospitais cadastrados o encaminhamento dos feridos. O DETRAN – Departamento Estadual de Trânsito deve ser comunicado da existência de feridos, pois, neste caso, é o órgão responsável por fazer a remoção dos veículos. Na ocorrência de óbito, somente a polícia, após realização da perícia, pode autorizar a remoção do veículo e a desobstrução da pista.

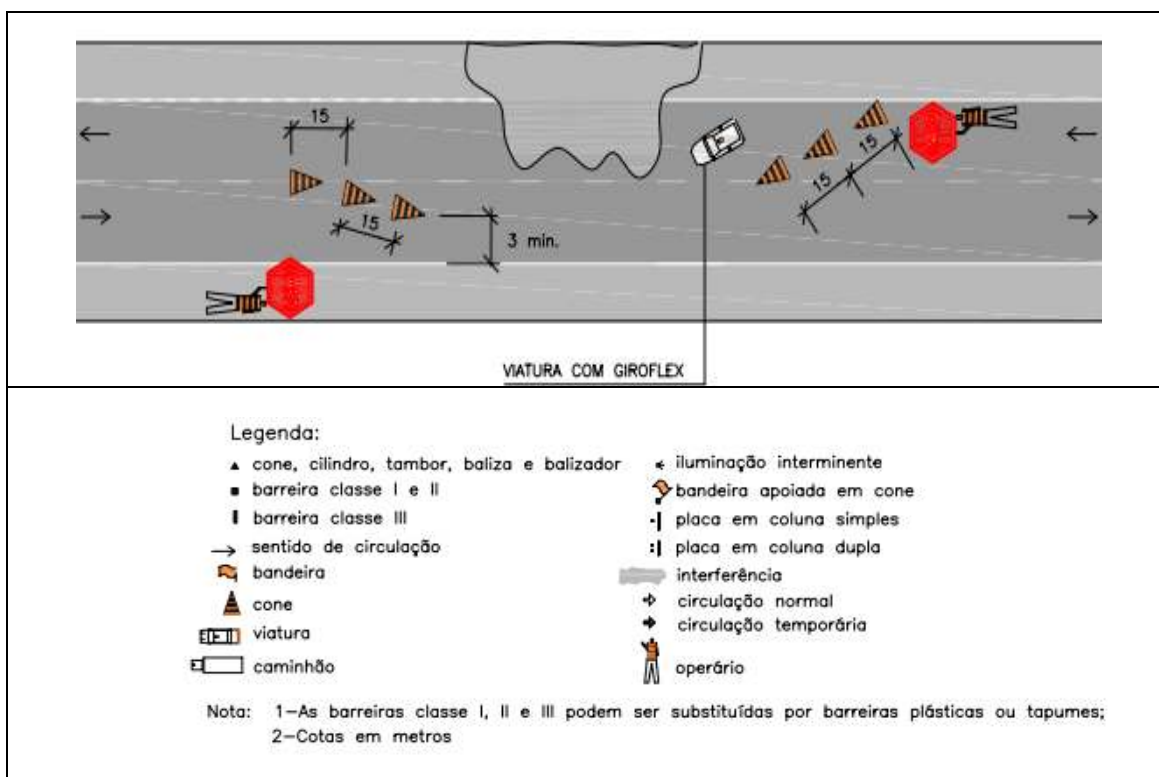


Figura 9: Sinalização de Emergência com Bloqueio de uma Faixa e Circulação Alternada

Fonte: DNIT (2010)

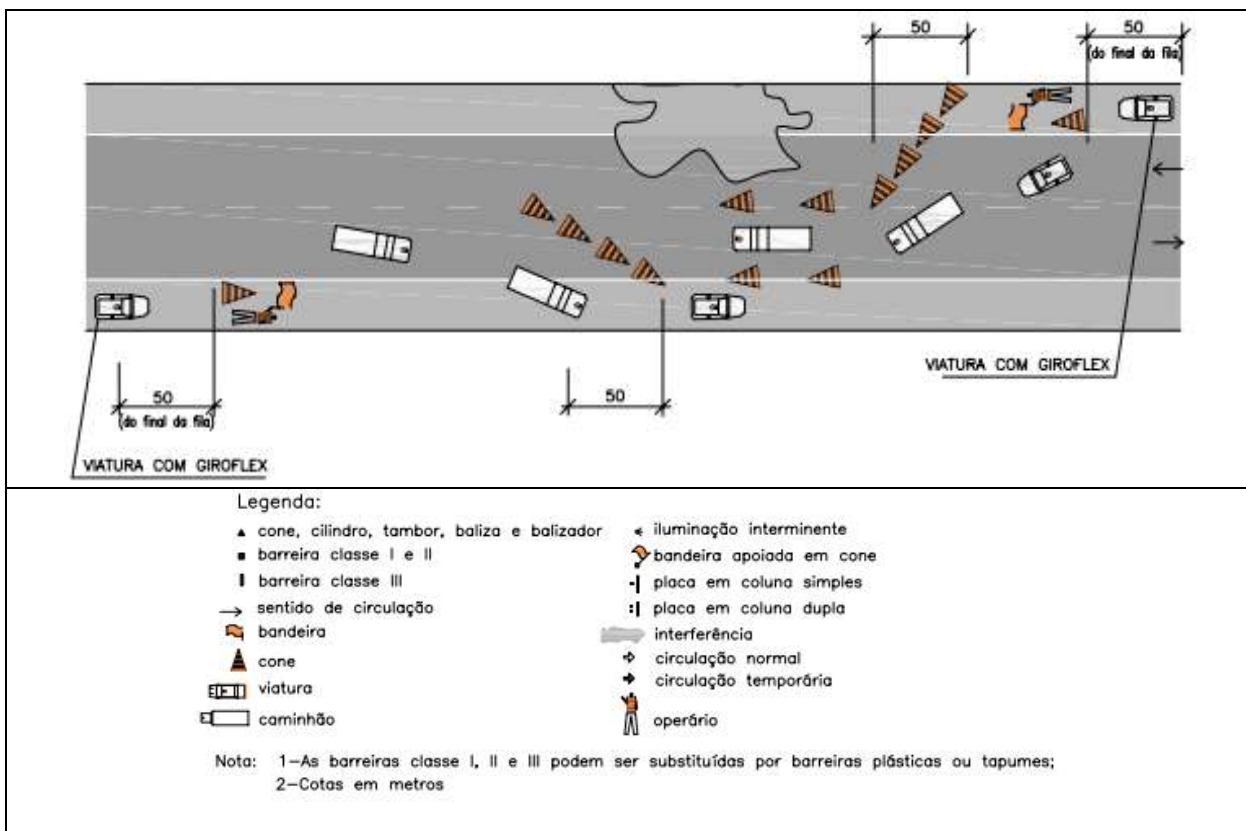


Figura 10: Sinalização de Emergência com Bloqueio de uma Faixa e Desvio de Tráfego pelo Acostamento

Fonte: DNIT (2010)

A agilidade dos serviços de guincho e de atendimento médico é essencial para o desempenho operacional do sistema reduzindo o tempo que pista fica bloqueada e a consequente formação de filas. O período entre a ocorrência do acidente e a chegada da ambulância é o mais crítico. Os veículos tentam se organizar na via, alguns param para ajudar, outros reduzem muito a velocidade para entender o que está acontecendo e como resultado tem-se um gargalo na operação. A falta de fluidez no tráfego acentua os problemas ambientais causando danos, em alguns casos irreversíveis, reduzindo a qualidade de vida da população.

O impacto dos acidentes na pegada ecológica de uma região está representado na Figura 11 e parte dos danos causados por um acidente a áreas biologicamente produtivas. Os prejuízos podem ser classificados em ambientais, sociais e materiais. Nos prejuízos ambientais encontram-se o aumento das emissões de poluentes, oriundas dos congestionamentos que se formam quando a pista fica bloqueada muito tempo, e a

contaminação do solo e da água no entorno do local do acidente. A contaminação do solo e da água está fortemente ligada ao vazamento de produtos contaminantes que estejam sendo transportados nas vias. A intensidade do dano está relacionada diretamente ao tipo de produto que está sendo transportado, a vazão ao longo do tempo e o tempo necessário para conter a propagação. A contaminação do solo pode remover a camada vegetal, modificar a sua aptidão para a drenagem natural e torná-lo propício a erosão (Günther, 2005) podendo danificar a estrutura viária, causar acidentes e prejudicar o fluxo de veículos. Há ainda a contaminação das águas subterrâneas e superficiais em decorrência da contaminação do solo, tornando as mesmas indisponíveis para o consumo e o solo indisponível para as atividades de cultivo e pasto. O vazamento de algumas categorias de produtos provoca a emissão de poluentes cujo dano vai depender da sua concentração na atmosfera que é influenciada pela ocorrência de ventos, de reações químicas e a proximidade com áreas densamente habitadas.

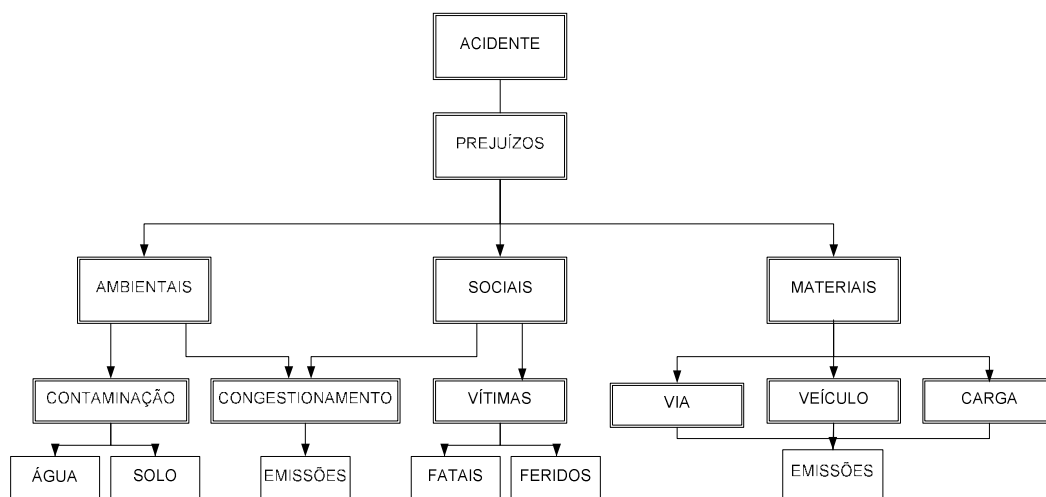


Figura 11: Impacto do Acidente na Pegada Ecológica

Os congestionamentos são influenciados pelas reduções de velocidade e variações nas acelerações dos veículos. Além de danos ambientais eles também provocam danos sociais quando os gases emitidos afetam diretamente a saúde da população residente nas áreas de influência do incidente, além de provocar uma alteração na rotina dos usuários que dependem da via para o seus deslocamentos aumentando o tempo de viagem e o consumo de combustível. Além dos congestionamentos, outro dano social decorrente do acidente é a existência de vítimas, fatais e feridas. Esta questão costuma ser tratada sob a ótica econômica

considerando a perda de produtividade da vítima, o impacto na sua família e o custo repassado para a sociedade. Neste trabalho estas questões não serão consideradas.

Os prejuízos materiais consideram os danos à via, ao veículo e à carga. Além do impacto econômico deste tipo de dano, este trabalho considera que a recuperação material gera um impacto na pegada ecológica através do aumento do nível de emissões. Assim, a recuperação de elementos da via que eventualmente sejam deteriorados com o acidente como, por exemplo, a limpeza da via, a reposição de sinalização e reconstituição de pavimento são atividades semelhantes às de conservação que serão realizadas em caráter emergencial, não programado, que podem causar, na pegada ecológica, os mesmos impactos já citados no item 4.1.1. No que se refere ao veículo os impactos são oriundos da necessidade de reposição ou recuperação do veículo danificado no acidente. O mesmo ocorre com a carga. Quando a carga é danificada no acidente, haverá a necessidade de uma nova produção daquele volume perdido, e uma nova viagem para a entrega da mercadoria.

4.1.3 *Classificação dos incidentes*

Os incidentes são caracterizados conforme a sua natureza em acidentes e obras. Posteriormente devem ser classificados conforme o tipo de bloqueio que provocam na pista e o projeto de circulação necessário após a ocorrência, podendo ser basicamente de três tipos: (i) bloqueio total da pista com circulação alternada após liberação parcial; (ii) bloqueio parcial da pista com circulação alternada; e (iii) bloqueio parcial da pista com desvio de tráfego e redução de velocidade.

Para a avaliação quantitativa dos incidentes se faz necessário identificar a dimensão do incidente, que inclui a extensão de pista bloqueada e o tempo que a pista, ou parte dela, fica interrompida. No caso de obras, o fator que influencia no tempo de bloqueio da pista é o tipo de reparo a ser realizado, que deve ser programado de acordo com as necessidades de manutenção do padrão de conformidade da rodovia. Assim sendo, as obras são classificadas conforme o tipo de bloqueio, tempo de bloqueio e projeto de circulação. O tipo de bloqueio e o projeto de circulação devem estar de acordo com as normas previstas no Manual de Sinalização de Obras e Emergências em Rodovias do DNIT (DNIT, 2010).

No caso de acidentes, as análises qualitativas que subsidiaram a construção do método permitiram concluir que a gravidade é o fator que influencia tanto no tipo de bloqueio quanto

no tempo que a pista fica interrompida. A gravidade do acidente no Brasil é medida através da Unidade Padrão de Severidade (UPS), fator de ponderação que classifica o acidente segundo a existência ou não de vítimas fatais e feridas (DENATRAN, 1987). Acidentes onde ocorram somente danos materiais são classificados como UPS 1; acidentes com feridos são classificados como UPS 5; e acidentes com vítimas fatais são classificados como UPS 13. O especialista entrevistado identificou uma relação entre a gravidade dos acidentes e o tipo de bloqueio considerando que a pista fica totalmente bloqueada em 90% dos casos de acidentes com vítimas fatais (UPS 13), em 50% dos casos de acidentes com feridos (UPS 5) e em 20% dos casos de acidentes em que somente ocorrem danos materiais. No restante dos casos a pista fica parcialmente bloqueada. O tempo de bloqueio, por sua vez, deve ser analisado em função da frequência de ocorrência. Pode-se utilizar um único valor que represente a média da distribuição associada ou mais de um valor de modo a cobrir um maior número de possibilidades.

4.2 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS

A própria operação da via impacta a pegada ecológica pela utilização da área de energia. A área de energia é obtida a partir da identificação da energia consumida ou nível de emissões geradas durante os deslocamentos na rodovia em seu fluxo normal de operação.

Os incidentes serão avaliados em função da contaminação de áreas de terra e água bioprodutivas e do nível de emissões gerado pelo congestionamento causado pela ocorrência do incidente. Para avaliação das áreas contaminadas são necessárias coletas de informações com os órgãos ambientais locais, pois são eles que realizam o atendimento a essas emergências e aplicam as multas aos responsáveis. Somente os especialistas neste tema são capazes de avaliar as consequências. É plausível considerar que alguns danos ambientais decorrentes dos acidentes só poderão ser completamente dimensionados em alguns anos.

Para a identificação das variações nos níveis de emissões decorrentes dos incidentes rodoviários, deve ser realizada uma simulação de tráfego. Neste trabalho foi utilizado o CORSIM - CORridor SIMulation. O CORSIM é um modelo de micro-simulação desenvolvido pela Federal Highway Administration - FHWA para análise de vias expressas, vias urbanas e corredores ou redes de tráfego (Moreira, 2005). Ele é composto por duas partes, o FRESSIM e o NETSIM sendo o primeiro utilizado para vias expressas, e também

incorpora rodovias de pista simples, e o segundo para vias urbanas. O modelo permite a simulação de incidentes com o bloqueio de uma ou duas faixas, a redução de velocidades devido à curiosidade dos ocupantes dos veículos que passam pelo incidente e o cálculo de emissões através do modelo de West et al. (1997) que estima as emissões a partir da combinação entre velocidade e aceleração dos veículos.

Para a identificação e avaliação dos impactos deve ser feita uma análise baseada em cenários a partir do tipo de incidente identificado no item 4.1. Os cenários serão simulados, comparados e analisados a partir de uma situação base que é a rodovia em seu fluxo normal de operação. Para a criação dos cenários que serão simulados, além da identificação dos tipos de incidentes é necessário determinar as condições de operação da via. Estas incluem o volume de tráfego, a composição do tráfego e a dimensão do incidente. O método proposto prevê a simulação de uma ocorrência de cada tipo e sua extrapolação para o período de um ano.

4.2.1 *Determinação dos volumes de tráfego*

Os volumes utilizados na simulação deverão representar as variações ao longo do dia, pois o método considera que a ocorrência de incidentes se distribui durante todo o dia. Tanto as obras quanto os acidentes podem ocorrer em qualquer hora do dia, mas no caso dos acidentes, alguns estudos demonstram uma relação direta com o volume de tráfego, assim há uma tendência de aumento do número de ocorrência nos períodos de pico. Para que a simulação represente a rodovia em condições reais de operação deverão ser utilizados três níveis de volume de tráfego (baixo, intermediário e alto).

Os dados de volume de veículos na via em estudo podem ser obtidos através de contagens volumétricas para todas as categorias incluindo automóveis, caminhões e ônibus. As contagens podem ser feitas de várias formas, entre elas estão os sensores de tráfego, as filmagens e os dados dos pedágios. Inicialmente devem ser analisados os volumes para cada dia da semana nos dois sentidos da via. Esta análise é adequada para a identificação dos dias da semana com menor variação nos volumes de tráfego, estes servirão para a obtenção dos volumes horários médios em um dia típico.

4.2.2 *Composição do tráfego*

Das contagens volumétricas pode-se obter a composição do tráfego na rodovia. Esta informação é fundamental para a análise de emissões haja visto que os veículos tem comportamentos diferentes quanto ao consumo de combustível e geração de emissões. No CORSIM cada veículo é modelado individualmente e a frota pode ser especificada por até nove tipos diferentes de veículos entre automóveis, caminhões e ônibus.

4.2.3 *Dimensão do incidente*

Os incidentes apresentam dimensões diferentes conforme o tipo de ocorrência. No caso das obras, por serem eventos passíveis de programação, são de fácil identificação da extensão da pista que ficará interrompida para a execução dos serviços correspondentes. Estes valores devem ser usados diretamente na composição do cenário. Porém no caso dos acidentes a dimensão varia conforme a característica da ocorrência, o tipo de acidente, o tipo e número de veículos envolvidos e a gravidade do mesmo. Para os acidentes deve ser utilizada a dimensão recomendada pelo CORSIM *User Manual* que é o comprimento do número de veículos envolvidos mais um. Para a simulação, a dimensão do incidente será calculada utilizando-se o comprimento da média do número de veículos envolvidos em acidentes ao longo de um ano de operação mais um.

4.2.4 *Criação de cenários*

Os cenários devem ser criados a partir dos incidentes identificados e devem representar a maioria das situações em termos da dimensão do incidente, do tempo que a pista fica total e parcialmente bloqueada, bem como dos fluxos de veículos durante a ocorrência dos mesmos.

4.3 **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A análise qualitativa dos incidentes permitiu identificar as variáveis que devem ser inseridas no cálculo da pegada ecológica dos incidentes rodoviários. O próximo capítulo apresenta o método de cálculo.

5 MÉTODO PROPOSTO

Este capítulo apresenta um método para estimar a pegada ecológica dos incidentes rodoviários cuja estrutura metodológica é apresentada na Figura 12.

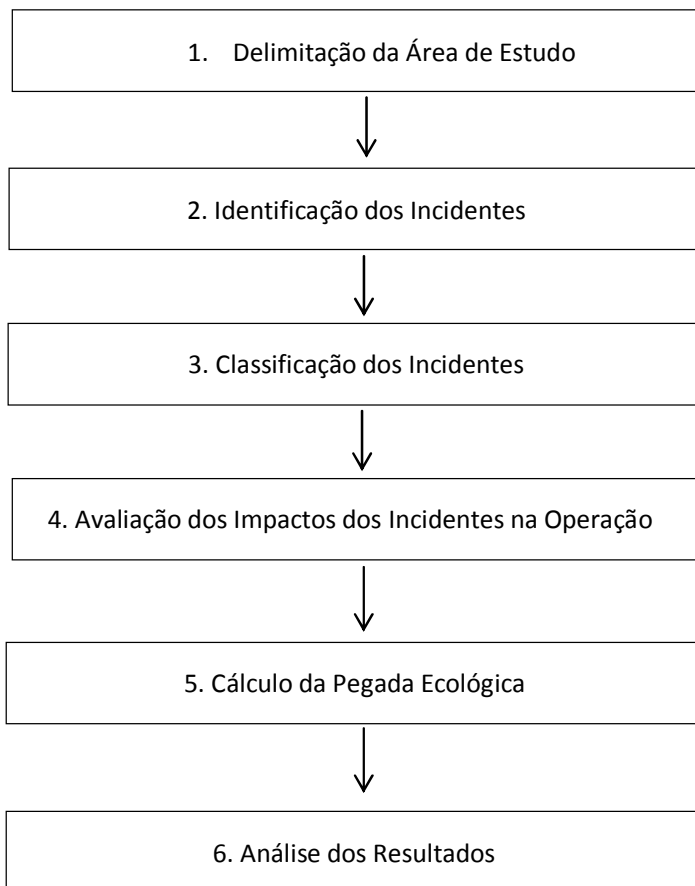


Figura 12: Estrutura do Método

O método proposto prevê a identificação dos impactos oriundos dos incidentes quanto à geração de emissões e contaminação da terra e da água devido a acidentes com produtos perigosos em locais onde a rodovia cruze terras e águas produtivas. Serão consideradas apenas as áreas de terra e água que se tornaram indisponíveis para as atividades de cultivo e pesca, pois a pegada ecológica leva em conta a perda do recurso e consequente redução da oferta da natureza. O método é composto por seis etapas conforme descrição a seguir.

5.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os locais adequados à utilização do método são aqueles que apresentam alto índice de incidentes que requeiram o bloqueio da pista, ou parte dela. Em rodovias de pista simples com fluxo bi-direcional, a construção do desvio de tráfego pode ser dificultada pelo traçado, como no caso de curvas de pequeno raio em subidas de serra e pontes, ou pelas características da via como a ausência de acostamento ou acostamentos com padrão inadequado para operação com desvios. No caso de constituírem em locais com a ocorrência de muitos incidentes, o uso do indicador Pegada Ecológica para o diagnóstico do impacto do incidente poderá auxiliar no planejamento das operações nestes locais.

5.2 IDENTIFICAÇÃO DOS INCIDENTES QUE OCORREM NA ÁREA DE ESTUDO

Esta etapa compreende a identificação dos incidentes que interromperam o fluxo normal de operação da rodovia e que serão incluídos no estudo. O método prevê a coleta de informações sobre os incidentes ocorridos no período de um ano de operação.

5.3 CLASSIFICAÇÃO DOS INCIDENTES

Nesta etapa os incidentes são caracterizados conforme a sua natureza em acidentes e obras. Posteriormente os acidentes serão classificados quanto à gravidade, o tipo de bloqueio que provocam na pista, o projeto de circulação necessário após a ocorrência, o tempo que a pista ficou obstruída e se houve vazamento de produto perigoso. Da mesma forma as obras serão classificadas quanto ao tipo de reparo realizado, o tipo de bloqueio que provocam na pista e o projeto de circulação necessário durante a ocorrência e o tempo que a pista ficou obstruída.

5.4 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DOS INCIDENTES

Esta etapa compreende a avaliação dos impactos decorrentes dos incidentes quanto à geração de emissões e contaminação da terra e da água devido a acidentes com produtos perigosos em locais onde a rodovia cruze terras e águas produtivas. Para a identificação de

áreas de terra e água contaminadas são necessárias coletas de informações com os órgãos ambientais locais.

As emissões são calculadas pelo seu nível de variação em comparação com a operação em fluxo normal. Para a identificação das variações nos níveis de emissões decorrentes dos incidentes rodoviários, deve ser realizada uma simulação de tráfego. A análise das emissões deve ser feita baseada em cenários a partir dos tipos de incidentes identificados no item 5.3. Para a criação dos cenários é necessário determinar as condições de operação da via, que incluem volume de tráfego, composição do tráfego e a dimensão física do incidente.

5.5 CÁLCULO DA PEGADA ECOLÓGICA

Esta etapa compreende o cálculo da pegada ecológica dos incidentes rodoviários. Este cálculo normalmente é feito para o período de um ano. A parcela da pegada ecológica dos incidentes rodoviários pode ser representada pela equação três e está composta pela soma das pegadas ecológicas correspondentes à quantidade de CO₂ equivalente emitido durante os incidentes, às áreas de cultivo e pasto e às áreas de pesca, cuja produtividade foi perdida em decorrência dos incidentes.

$$PE_{IR} = PE_{EM} + PE_C + PE_{PA} + PE_{PE} \quad (3)$$

PE_{IR} = Pegada ecológica dos incidentes rodoviários (gha/ano);

PE_{EM} = Parcela da pegada ecológica que corresponde às emissões (gha/ano);

PE_C = Parcela da pegada ecológica que corresponde à perda de área produtiva ocupada para cultivo (gha/ano);

PE_{PA} = Parcela da pegada ecológica que corresponde à perda de área produtiva ocupada para pasto (gha/ano);

PE_{PE} = Parcela da pegada ecológica que corresponde à perda de área produtiva de pesca (gha/ano)

Sendo a parcela das emissões expressa pela equação (4):

$$PE_{EM} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\Delta EM_i \times T_{Bi} \times O_i)}{FSC} \right] \quad (4)$$

Onde:

PE_{EM} = Pegada ecológica que corresponde às emissões (gha/ano);

i = tipo de incidente considerado;

ΔEM = Emissões de CO_2 equivalente geradas no incidente i (kg CO_2/h);

T_B = tempo que a pista ficou bloqueada no incidente tipo i (h);

O = Número de ocorrências do incidente tipo i por ano;

FSC = Fator de Sequestro de Carbono (kg CO_2/ano);

A parcela que corresponde à área de cultivo é estimada pela equação (5) :

$$PE_C = AC \times FE_C \quad (5)$$

AC = Área de Cultivo contaminada (ha/ano);

FE_C = Fator de Equivalência de Cultivo (gha/ha)

A parcela que corresponde à área de pasto é estimada pela equação (6) :

$$PE_{PA} = APA \times FE_{PA} \quad (6)$$

APA = Área de Pasto contaminada (ha/ano);

FE_{PA} = Fator de Equivalência de Pasto (gha/ha)

A parcela da área de pesca é dada pela equação (7):

$$PE_{PE} = APE \times FE_{PE} \quad (7)$$

APE = Área de pesca contaminada (ha/ano);

FE_{PE} = Fator de Equivalência de Pesca (gha/ha)

5.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta etapa consiste em analisar os resultados da pegada ecológica. A análise pode envolver a comparação do resultado com a pegada ecológica da rodovia em operação normal. Os resultados podem ser comparados entre si permitindo a identificação dos incidentes com maior impacto sobre a pegada ecológica e desta forma servir para auxiliar no planejamento das operações, a justificar investimentos em segurança viária ou mesmo em projetos de ampliação da capacidade. É possível a criação de cenários com projeções de aumento de volume de tráfego para verificação do impacto do incidente sob novas condições.

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou o método proposto para o cálculo da pegada ecológica dos incidentes rodoviários. O método é adequado para utilização em locais onde ocorrem muitos incidentes que acabam por prejudicar o desempenho operacional e ambiental da rodovia. No próximo capítulo é apresentado o estudo de caso desenvolvido para um trecho de rodovia situada no estado do Rio Grande do Sul.

6 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta o estudo de caso desenvolvido para ilustrar a aplicação do método proposto. O estudo de caso prevê a caracterização dos incidentes rodoviários que podem contribuir para o aumento da pegada ecológica do transporte.

6.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O método proposto foi aplicado para avaliação da pegada ecológica dos incidentes de um trecho da BR-386, uma rodovia federal que liga a região metropolitana de Porto Alegre com o município de Iraí na divisa com o Estado de Santa Catarina, conforme mapa apresentado na Figura 13 com trecho de análise em detalhe na Figura 14. Pela BR-386 escoa a produção agrícola da região das Missões e do norte do Estado do Rio Grande do Sul ao entroncamento rodo-hidro-ferroviário do Rio Taquari em direção ao Porto de Rio Grande. Em 1998 a operação da rodovia foi transferida em concessão para um consórcio privado. Os dados obtidos referem-se ao trecho de 40 km da rodovia que possui pista simples e pertence ao Pólo Lajeado.



Figura 13: BR 386 no Estado do Rio Grande do Sul

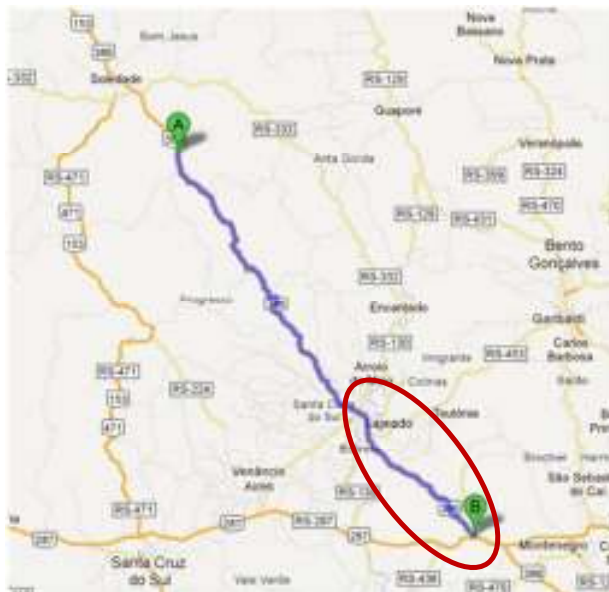


Figura 14: Trecho da BR 386 entre Lajeado e o entroncamento com a RS 287

6.2 IDENTIFICAÇÃO DOS INCIDENTES

Esta etapa do estudo foi realizada a partir da análise da série de dados de acidentes nos anos de 2008 a 2010 e entrevistas individuais com o Coordenador Técnico e Coordenador de Projetos da empresa concessionária da rodovia.

6.2.1 *Acidentes*

Os acidentes foram classificados segundo a gravidade utilizando para isso a Unidade Padrão de Severidade - UPS conforme a metodologia do DENATRAN (1987) e os resultados são apresentados na Tabela 9. Para o cálculo foi utilizado o valor médio para acidentes que ocorreram dos anos de 2008 a 2010.

Tabela 9: Classificação das Ocorrências Segundo a Gravidade

<i>Acidentes apenas com danos materiais</i>	<i>Acidentes com feridos</i>	<i>Acidentes com vítimas fatais</i>
57%	40%	3%

Fonte: Histórico de acidentes da BR 386 (UNIVIAS, 2011)

Para identificar a relação entre os incidentes que ocorrem nesta rodovia e o tipo de bloqueio da pista foram aplicados, ao número total de acidentes obtidos do banco de dados da empresa, os percentuais que correlacionam a gravidade ao tipo de bloqueio. Assim tem-se que a pista fica totalmente bloqueada em 90% dos casos de acidentes com vítimas fatais (UPS 13), em 50% dos casos de acidentes com feridos (UPS 5) e em 20% dos casos de acidentes em somente ocorrem danos materiais (UPS 1), no restante dos casos a pista fica parcialmente bloqueada. Assim as ocorrências foram divididas conforme Tabela 10.

Tabela 10: Incidência de Acidentes

<i>TIPO DE BLOQUEIO</i>	<i>INCIDÊNCIA</i>
Bloqueio Total	33,3%
Bloqueio Parcial – circulação alternada	66,7%

Na sequencia, os acidentes foram analisados com relação ao tempo que a pista ficou obstruída para o atendimento. Neste caso, 80% das ocorrências bloquearam a pista, ou parte dela por até três horas, sendo que em grande parte casos, 47% das ocorrências, por até uma hora como pode ser observado no histograma da Figura 15. Acidentes com até cinco horas e meia de bloqueio perfazem 90% dos casos.

Foram identificados alguns casos atípicos de obstrução por sete, oito ou mais horas. Em consulta a descrição do acidente foi possível verificar algumas situações que ocorrem com menos frequência como, por exemplo, tombamento de caminhão com a carga espalhada na pista. O tempo de bloqueio é alto porque nestes casos somente o dono da mercadoria pode removê-la. Outros tipos de acidentes que requerem longos tempos de bloqueio incluem explosão de caminhão carregado de combustível após colisão com barranco e colisão frontal de caminhão com ônibus resultando em grande número de óbitos.

Os tempos de bloqueio utilizados na simulação serão: (i) Bloqueio Total - 10 min, pois foi identificado que seria o tempo máximo que um motorista deixaria o veículo ligado esperando a liberação da pista; (ii) Bloqueio Parcial 1 - 15 min, o tempo mínimo necessário para a solução de pequenos conflitos; (iii) Bloqueio Parcial 2 - 40 min, o valor intermediário onde se enquadra a maior quantidade dos casos; (iv) Bloqueio Parcial 3 - 1h e 50 min, valor

intermediário entre uma hora e quinze minutos e duas horas e trinta minutos em que há pouca variação na frequência de ocorrência.

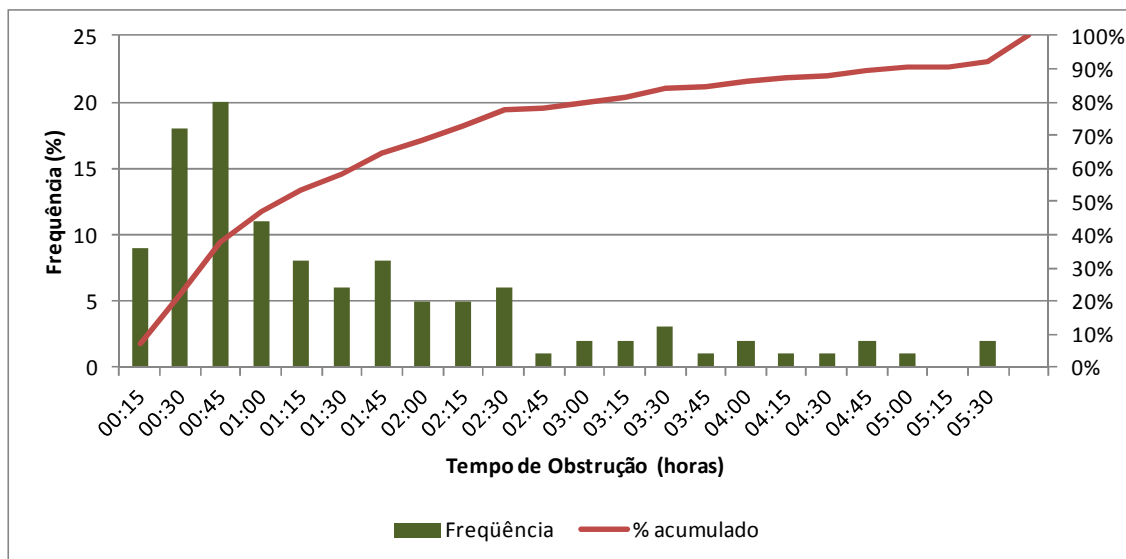


Figura 15: Frequência de Ocorrência do Tempo de Obstrução da Pista

6.2.2 Obras

São muitas as obras necessárias à manutenção da rodovia ao longo de sua vida útil. Para este trabalho serão considerados apenas dois incidentes tipo obras: reparos localizados e aplicação de micro-revestimento asfáltico, que foram escolhidos por que além de representarem a maior incidência ao longo do ano, também ocorrem necessariamente ao longo da pista de rolamento, causando a necessidade de interrupção do fluxo. Os reparos localizados são remendos feitos na superfície do pavimento e podem ser realizados de forma pontual ou em grandes áreas. O micro-revestimento é uma mistura de agregado, emulsão asfáltica, água e aditivos que é aplicado na superfície da rodovia para a selagem de fissuras e trincas. Ambos têm a função de melhorar as condições de conforto do rolamento.

Os dois incidentes se caracterizam por bloqueio parcial da pista, ou uma faixa de rolamento, e são realizados uma vez por ano por quilômetro. As principais diferenças são a dimensão do incidente e o tempo que a pista fica bloqueada. Para aplicação do micro-revestimento se faz necessário interromper 1 a 3 km de via e entre o tempo de cura e de execução, a faixa fica interrompida aproximadamente meio turno do dia. Já o reparo localizado é rápido, dura em torno de uma hora e a extensão de obra varia de 100 a 500m. Os

tempos de bloqueio utilizados na simulação serão: (i) Bloqueio Parcial 1 – 1 hora, para obras do tipo reparo localizado e (ii) Bloqueio Parcial 2 – 6 horas, para obras do tipo aplicação do micro-revestimento.

Na rodovia em estudo é utilizada circulação alternada para obras móveis com tempo de PARE/SIGA gerenciado por bandeirinha devidamente treinado, cujo critério de liberação é a formação de filas. É utilizado o semáforo para obras cuja área precise ficar isolada à noite, como o reforço de uma obra de arte especial, por exemplo, conforme mostra a Figura 16. Assim, as ocorrências foram concentradas conforme Tabela 11 para as obras que serão consideradas no estudo.



Figura 16 : Bloqueio Parcial de Pista com Utilização de Semáforo

Fonte: UNIVIAS

Tabela 11: Incidência das Obras

<i>TIPO DE BLOQUEIO</i>	<i>QUANTIDADE</i>
Bloqueio Parcial – circulação alternada	100%

6.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS

A avaliação das variações nos níveis de emissões decorrentes dos incidentes rodoviários foi realizada utilizando-se o modelo de simulação de tráfego CORSIM – CORridor SIMulation. Para analisar a ocorrência de incidentes em condições reais de operação foram criados cenários que representassem a melhor combinação entre os fluxos de veículos e a ocorrência dos incidentes.

Foram utilizados os dados de volume de tráfego do pedágio de Fazenda Vila Nova. A análise dos dados ao longo do ano de 2011 mostra que, durante uma semana típica, os dias com menor variação no volume são segunda, terça, quarta e quinta-feira, como pode ser observado na Figura 17. Na mesma figura, observa-se ainda que o maior volume de tráfego ocorre na sexta-feira, em ambos os sentidos, e os menores volumes ocorrem domingo no sentido Porto Alegre – Lajeado e sábado no sentido Lajeado – Porto Alegre.

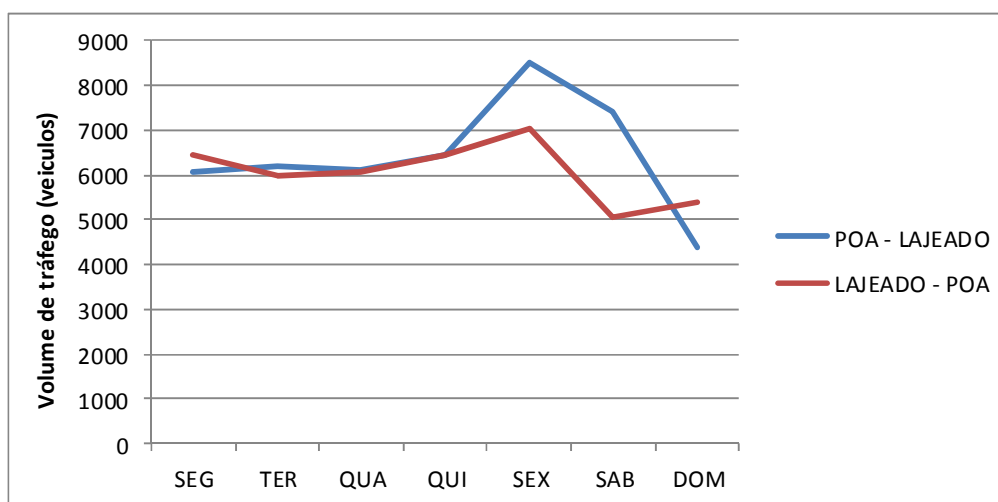
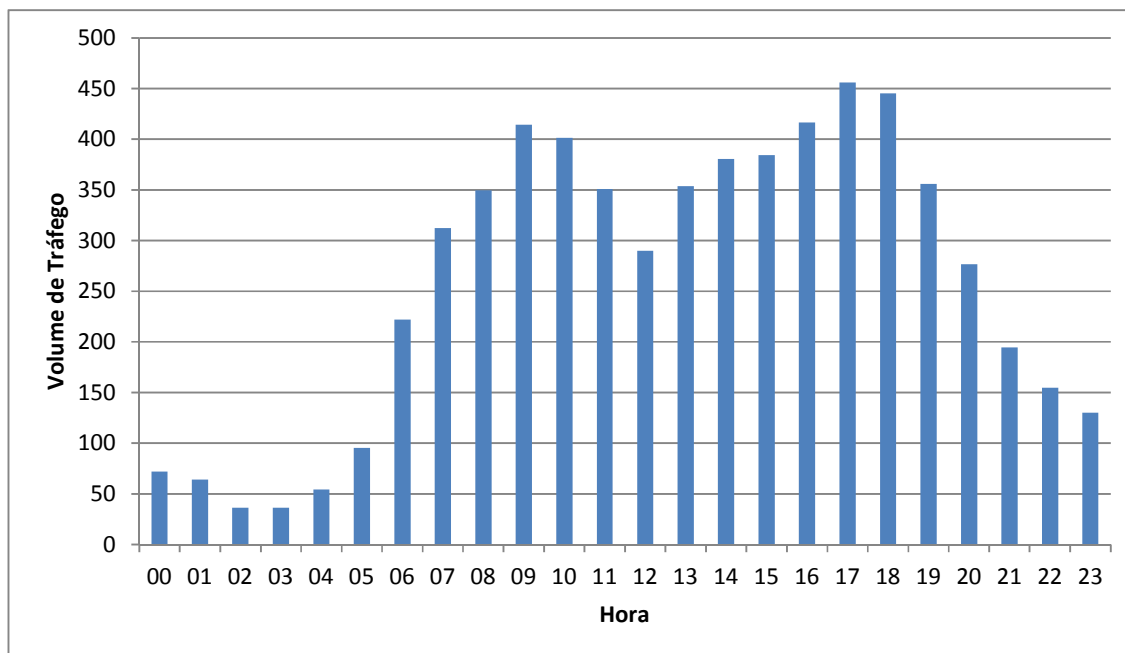


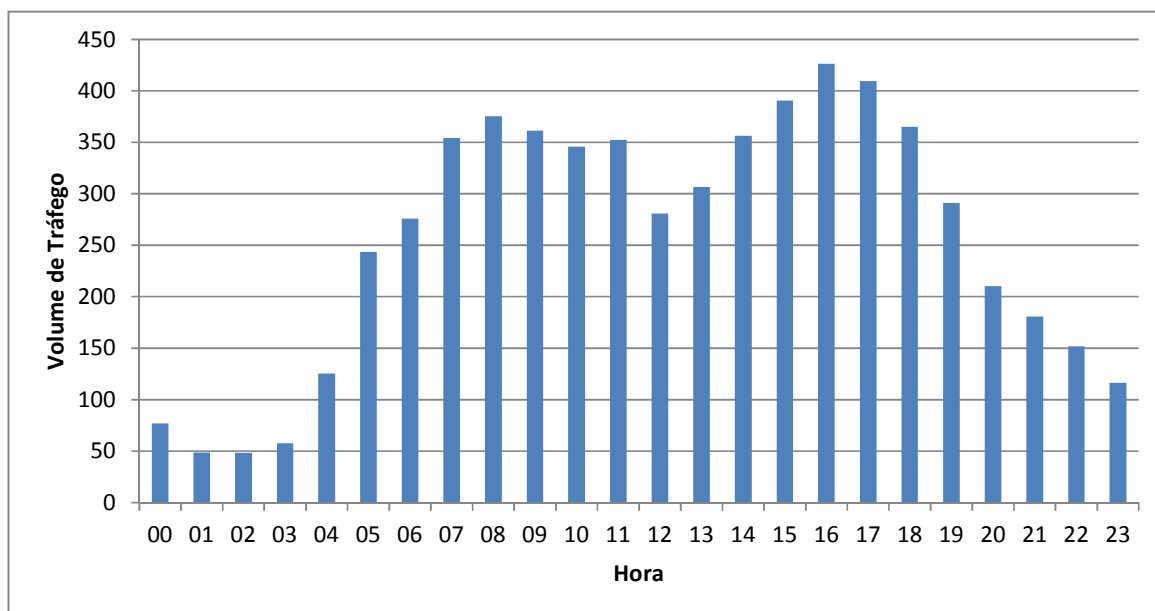
Figura 17: Volume de Tráfego em uma Semana Típica

Além de pouca variação nos volumes, terça, quarta e quinta-feira também apresentaram um equilíbrio direcional permitindo assim, a identificação dos volumes em dias típicos a partir da média dos três dias. Na Figura 18 onde estão representados os valores médios referentes à terça, quarta e quinta-feira de uma semana do mês de setembro de 2011, pode-se observar que no Sentido Porto Alegre – Lajeado, Figura 18 (a), o pico da manhã ocorre entre 9:00 e 10:00 horas e no período da tarde o pico ocorre entre 17:00 e 18:00 horas.

No sentido contrário, Figura 18 (b), tanto o pico da manhã quanto o da tarde ocorrem um pouco mais cedo, entre 8:00 e 9:00 horas e entre 16:00 e 17:00 horas respectivamente.



(a) Sentido Porto Alegre - Lajeado



(b) Sentido Lajeado - Porto Alegre

Figura 18: Volume Médio Horário de Tráfego

Da mesma forma foram analisadas séries históricas de acidentes dos anos 2008, 2009 e 2010 ocorridos no trecho da rodovia em estudo entre os quilômetros 343 e 384 de modo a verificar o período do dia com maior número de ocorrências. A análise foi realizada utilizando-se a média dos três anos. Esses valores foram plotados na Figura 19 juntamente com os volumes horários bi-direcionais médios de tráfego para os mesmos anos. Pode-se observar que o número de acidentes cresce no turno da tarde sendo que a maior quantidade de ocorrências se dá muito próximo ao pico da tarde. Além do volume outros fatores como diminuição da luz do dia e cansaço dos motoristas podem influenciar na elevação do número de acidentes no final da tarde.

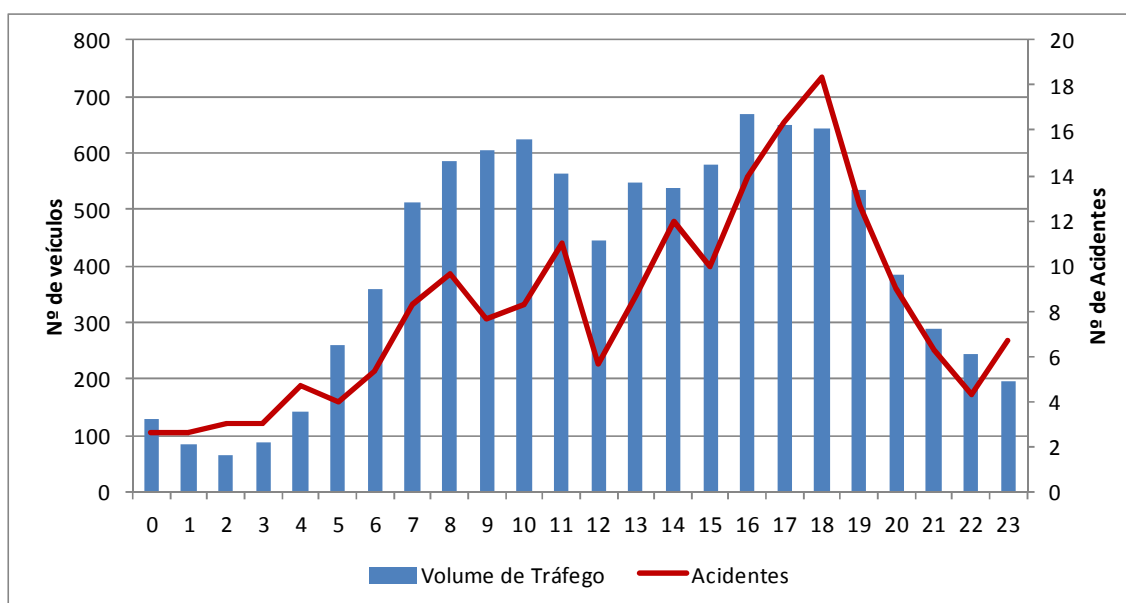


Figura 19: Volume Horário Médio de Tráfego versus Número Médio de Acidentes (2008, 2009 e 2010)

Neste trabalho serão utilizados três níveis de volume de tráfego (baixo, intermediário e alto) de modo a representar as variações ao longo do dia. Analisando a frequência acumulada dos acidentes, apresentada na Figura 20, observa-se que em torno de 70% dos acidentes ocorrem no período do dia entre 8:00 e 19:00 horas. Assim adota-se como volume alto a média das seis horas do dia mais carregadas, como volume intermediário utiliza-se a média dos volumes entre 8:00 e 19:00 horas menos as seis horas mais carregadas. O volume baixo resulta da média dos volumes compreendidos no período entre 0:00 e 8:00 horas e 19:00 e 24:00 horas, momentos onde ocorrem 30% do total de acidentes.

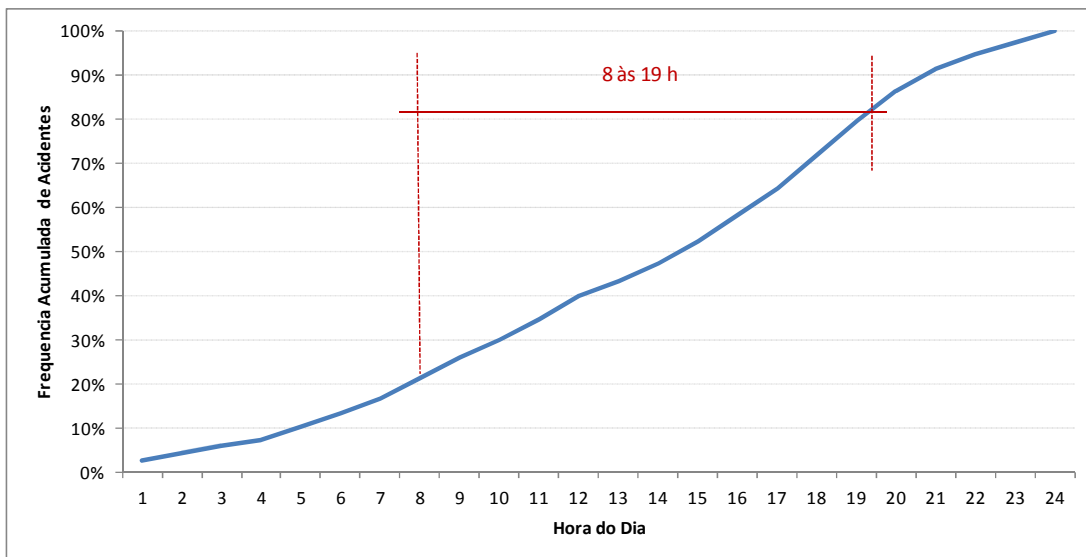


Figura 20: Frequência Acumulada dos Acidentes ao Longo do Dia (média de 2008, 2009 e 2010)

6.3.1 Composição do tráfego

A composição bi-direcional do fluxo veicular que circula na rodovia ao longo do dia está apresentada na Figura 21 e foi obtida através do volume médio percentual de terça, quarta e quinta-feira da semana típica. Na simulação serão considerados os automóveis, caminhões de 2, 3, 5 e 6 eixos. Os demais veículos foram desprezados por representarem menos de 5% do total de veículos em circulação.

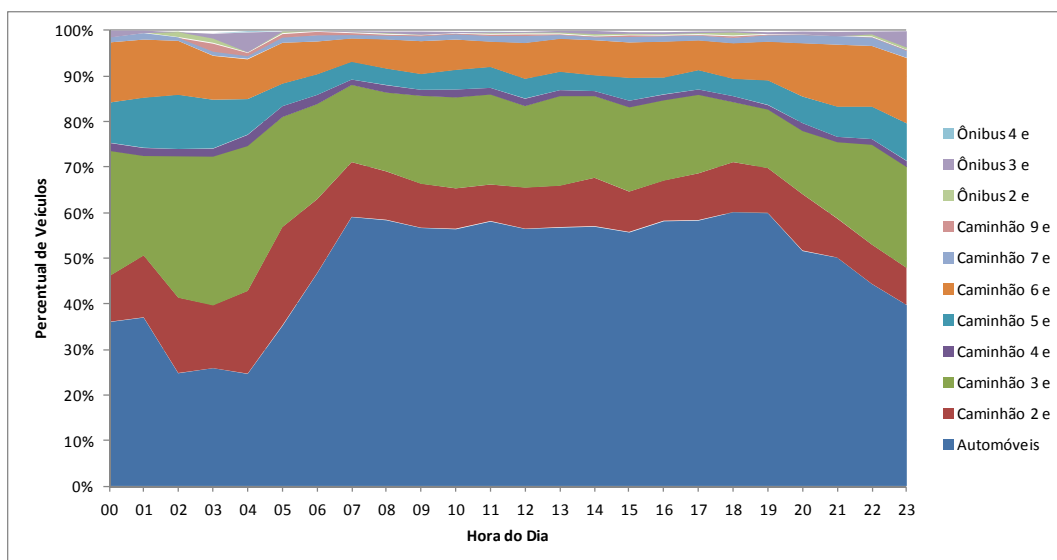


Figura 21: Composição do Tráfego por Hora do Dia (Média de terça, quarta e quinta-feira)

Analisando a Figura 21 observa-se que no período entre 8:00 e 19:00 horas a composição do tráfego se mantém aproximadamente constante; porém nas primeiras horas do dia há um aumento no percentual de caminhões de 3, 5 e 6 eixos em circulação na via. A participação na corrente de tráfego de veículos pesados, caminhões e ônibus passa de aproximadamente 40% (entre 8 e 19 h) para 75% (entre 2 e 3 h).

6.3.2 *Dimensão física ocupada pelo incidente*

Os incidentes apresentam diferentes dimensões conforme o tipo de ocorrência. No caso de acidentes será utilizada a recomendação do *CORSIM User Manual*. Neste estudo foi utilizado o comprimento de três veículos, de quatro metros cada um, somado à distância de segurança de 50 m, recomendada no projeto tipo do DNIT (2010), totalizando 62 m de comprimento. Será utilizado o valor de 60 m para os acidentes. Para as obras foi utilizado o comprimento fixo de 1 km para aplicação de micro revestimento e 100 m para reparo localizado.

6.3.3 *Cenários propostos*

Foram definidos cinco cenários de estudo a partir dos incidentes identificados no item 6.2. Estes cenários são apresentados de forma resumida na Tabela 12. Serão utilizados no modelo fluxos alto, baixo e intermediário, conforme determinado no item 6.3 e a composição do tráfego conforme determinado no item 6.3.1 para simular os acidentes e o fluxo em nível intermediário para simular obras.

❖ Cenário 1: Operação em fluxo livre - ON

Este cenário representa a operação do sistema em fluxo livre, com todas as classes de veículos circulando sem obstrução na pista.

❖ Cenário 2: Acidente com bloqueio total da pista – AC1

Este cenário representa a ocorrência de um incidente do tipo acidente com bloqueio total da pista. Quando ocorre um incidente deste tipo, a liberação da pista é feita gradualmente, passando primeiro para circulação alternada em meia pista e depois a liberação

total. Será utilizado um tempo para bloqueio total e mais três tempos com bloqueio de meia pista e circulação alternada.

❖ Cenário 3: Acidente com bloqueio parcial da pista e circulação alternada – AC2

Este cenário representa a ocorrência de um incidente do tipo acidente com bloqueio parcial da pista, que neste caso de estudo será de uma faixa de rolamento. A circulação dos veículos será alternada em meia pista e serão utilizados três tempos de bloqueio.

❖ Cenário 4: Obra 1 com bloqueio parcial da pista e circulação alternada – OB1

Este cenário representa a ocorrência de um incidente tipo obra, para a execução de reparo localizado, com bloqueio de uma faixa de rolamento. O tempo utilizado será fixo e durante este período a circulação dos veículos será alternada em meia pista.

❖ Cenário 5: Obra 2 com bloqueio parcial da pista e circulação alternada - OB2

Este cenário representa a ocorrência de um incidente tipo obra, para aplicação do micro revestimento, com bloqueio de uma faixa de rolamento. O tempo utilizado será fixo e durante este período a circulação dos veículos será alternada em meia pista.

Tabela 12: Resumo dos Cenários Propostos

<i>CENÁRIO</i>	<i>NOME</i>	<i>DIMENSÃO DO INCIDENTE</i>	<i>TEMPO DE BLOQUEIO TOTAL</i>	<i>TEMPO DE BLOQUEIO PARCIAL</i>	<i>FLUXOS (veículos/h)</i>
1	ON	-	-	-	900 700 300
2	AC1	60 m	10 min	15 min 40 min 01 h 50 min	900 700 300
3	AC2	60 m	-	15 min 40 min 01 h 50 min	900 700 300
4	OB1	100 m	-	1 h	700
5	OB2	1 km	-	6 h	700

6.3.4 *Simulação dos incidentes*

Foi realizada a simulação de um trecho de uma rodovia rural de pista simples, com extensão de 40 km, com duas faixas de operação e com fluxo bi-direcional. Não foram considerados pontos de acesso ou de saída da rodovia. Foi considerada uma situação de geometria básica de pista em nível, sem considerar curvas nem rampas. A interface gráfica TRAFVU com a representação detalhada no momento do incidente na rede simulada pode ser visualizada nas Figura 22 e Figura 23. Na Figura 22 pode ser observado o incidente com bloqueio total da pista e na Figura 23, o incidente com a via bloqueada parcialmente e circulação alternada.

Foram utilizados os valores das variáveis *default* do CORSIM calibrados pela FHWA (2001) para as características operacionais dos veículos. Optou-se por não calibrar os parâmetros da modelagem da frota para os veículos brasileiros porque o método utiliza a variação das emissões entre distintos cenários de ocorrência de incidentes na rodovia e não os valores absolutos das mesmas.

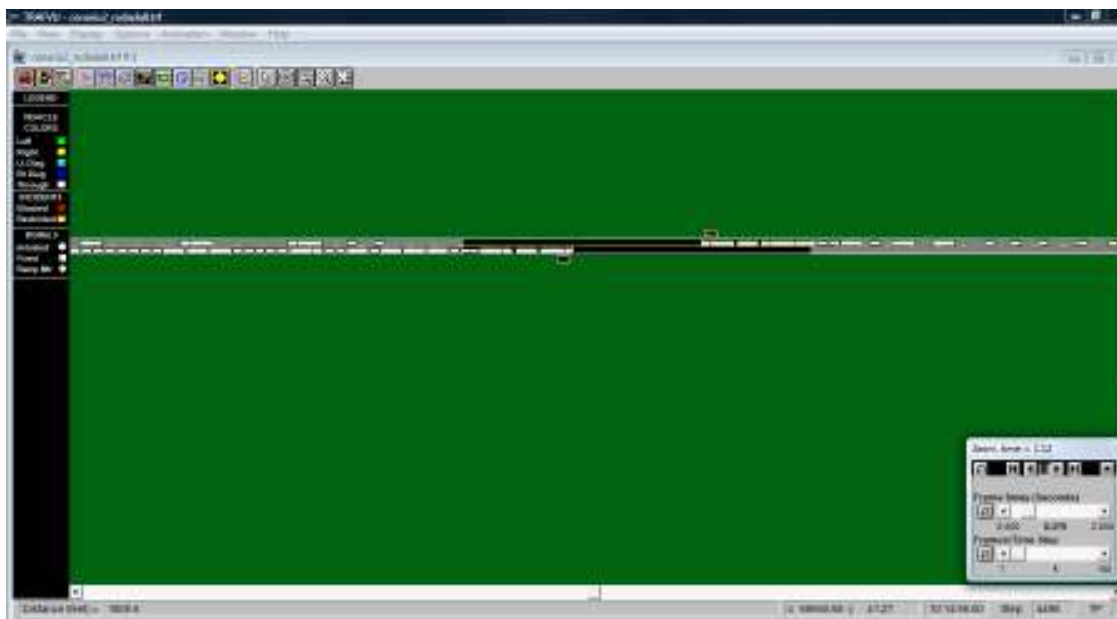


Figura 22: Representação Gráfica no Momento do Incidente – Bloqueio Total



Figura 23: Representação Gráfica no Momento do Incidente – Bloqueio Parcial

As variáveis utilizadas para modelar as características operacionais são a desaceleração máxima, a velocidade e aceleração dos veículos. O valor *default* para a desaceleração máxima não emergencial é de 8 pés/s² ou 2,44 m/s², tendo os valores máximo e mínimo indicados na Tabela 13.

Tabela 13: Desaceleração Máxima Não Emergencial por Tipo de Veículo

<i>VEÍCULO</i>	<i>VALOR DEFAULT (m/s²)</i>	<i>VALOR MÍNIMO (m/s²)</i>	<i>VALOR MÁXIMO (m/s²)</i>
Automóvel	2,44	2,13	3,66
Caminhões	2,44	1,22	3,05
Ônibus	2,44	1,22	3,05

Os perfis de aceleração dos veículos levam em conta a influência da velocidade, a existência de rampa e as características dos veículos. A aceleração foi assumida como constante em intervalos de velocidade de aproximadamente 22 km/h. Os resultados das taxas de aceleração iniciais para rodovias em nível são fornecidos na Tabela 14.

Tabela 14: Taxas de Aceleração por Tipo de Veículo(m/s²)

<i>TIPO DE VEÍCULO</i>	<i>VELOCIDADE (km/h)</i>				
	0 a 22	22 a 44	44 a 66	66 a 88	>88
Carro de passeio de baixo desempenho	1,8	1,8	1,8	0,9	0,6
Carro de passeio de alto desempenho	3,4	3,4	3,0	1,5	0,9
Caminhão leve	0,9	0,6	0,3	0,3	0,3
Caminhão extra-pesado	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Fonte: Araújo (2007)

Para todos os cenários foi simulada a ocorrência de um incidente, sendo que o mesmo inicia após uma hora de operação simulada em fluxo livre. Após o incidente, a rodovia volta a operar com fluxo livre por mais uma hora para que o sistema se estabilize novamente. Foram realizadas cinco rodadas para cada combinação de tempo e fluxo em todos os cenários, totalizando 115 rodadas. A cada rodada o modelo utiliza um valor diferente para a geração dos veículos e comportamento do motorista, de modo a verificar a consistência dos resultados. Em todos os cenários simulados os resultados apresentaram um desvio padrão em torno de 2%, portanto foram utilizadas as médias dos valores de emissões das cinco rodadas. As emissões de CO foram transformados em CO₂ equivalente a um GWP – Potencial de Aquecimento Global igual a 3,0 (IPCC, 2007). Os resultados das emissões de CO₂ equivalente para operação em fluxo livre e durante a ocorrência dos incidentes obtidos para cada cenário podem ser visualizados nas Tabela 15 aTabela 19.

Tabela 15: Emissões de CO₂ eq para Cenário 1 – Uma Hora de Operação em Fluxo Livre

<i>FLUXO (veic/h)</i>	<i>EMISSIONES CO₂-eq(ton)</i>
900	10,25
700	7,99
300	3,47

Tabela 16: Emissões de CO₂ eq para Cenário 2 – Incidente com Bloqueio Total + Bloqueio Parcial

<i>FLUXO</i> (veic/h)	<i>TEMPO DE BLOQUEIO</i> <i>TOTAL+ PARCIAL</i>	<i>EMISSÕES CO₂-eq</i> (ton)
900	25 min	22,18
900	50 min	23,00
900	2 h	25,21
700	25 min	17,07
700	50 min	18,14
700	2 h	19,52
300	25 min	7,81
300	50 min	8,23
300	2 h	8,90

Tabela 17: Emissões de CO₂ eq para Cenário 3 – Incidente com Bloqueio Parcial

<i>FLUXO</i> (veic/h)	<i>TEMPO DE BLOQUEIO</i> <i>PARCIAL</i>	<i>EMISSÕES CO₂-eq</i> (ton)
900	15 min	11,38
900	40 min	12,32
900	1h 50 min	14,34
700	15 min	8,79
700	40 min	9,77
700	1h 50 min	10,92
300	15 min	3,91
300	40 min	4,59
300	1h 50 min	5,20

Tabela 18: Emissões de CO₂ eq para Cenário 4 – Incidente com Bloqueio Parcial

<i>FLUXO (veic/h)</i>	<i>TEMPO DE BLOQUEIO PARCIAL</i>	<i>EMISSÕES CO₂-eq (ton)</i>
700	1 h	9,62

Tabela 19 Emissões de CO₂ eq para Cenário 5 – Incidente com Bloqueio Parcial

<i>FLUXO (veic/h)</i>	<i>TEMPO DE BLOQUEIO PARCIAL</i>	<i>EMISSÕES CO₂-eq (ton)</i>
700	6 h	27,53

6.4 CÁLCULO DA PEGADA

O cálculo da pegada ecológica foi realizado utilizando-se a equação 4 apresentada no item 5.5. Para o cálculo foram utilizadas as variações das emissões dentro de cada cenário em comparação com a operação normal em fluxo livre, o tempo que a pista ficou interrompida e o número de ocorrências para cada cenário. O fator de sequestro de carbono utilizado foi de 1,09 tC/ha.ano. Para o cálculo da pegada ecológica da operação normal, também foi utilizada a equação 4, porém não foi considerado o tempo em que a pista ficou interrompida, já que neste caso não há bloqueio, foi utilizada a proporção de ocorrência de cada fluxo ao longo do dia, durante um ano de operação. A variação das emissões para os diferentes cenários podem ser visualizadas nas Figura 24 a Figura 26.

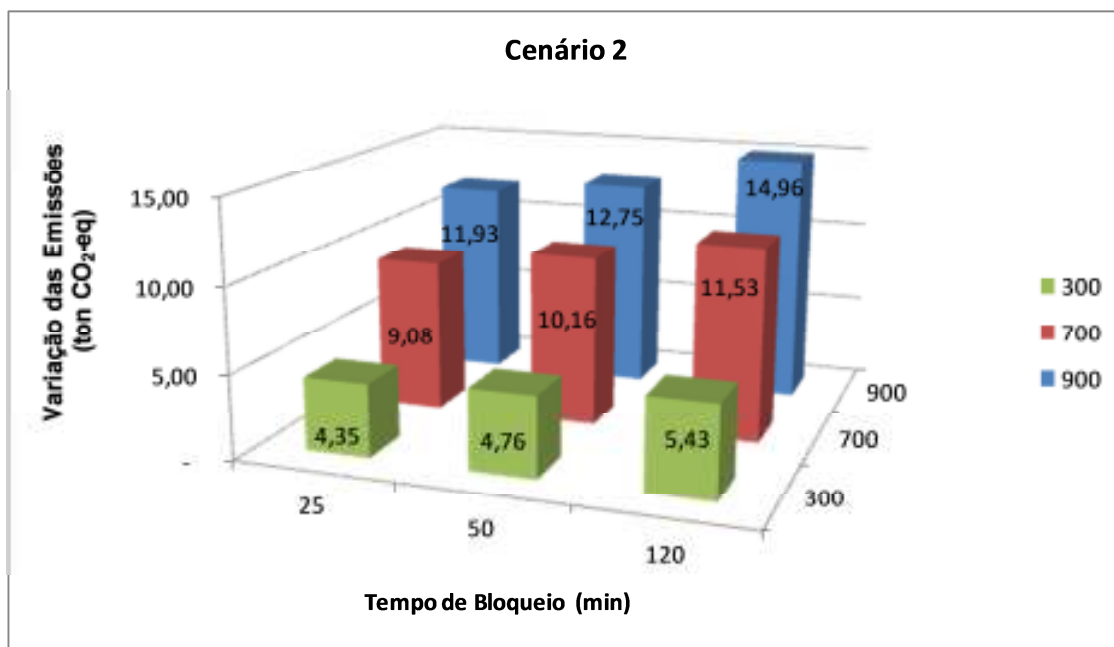


Figura 24: Variação nas Emissões de CO₂ – equivalente para o Cenário 2

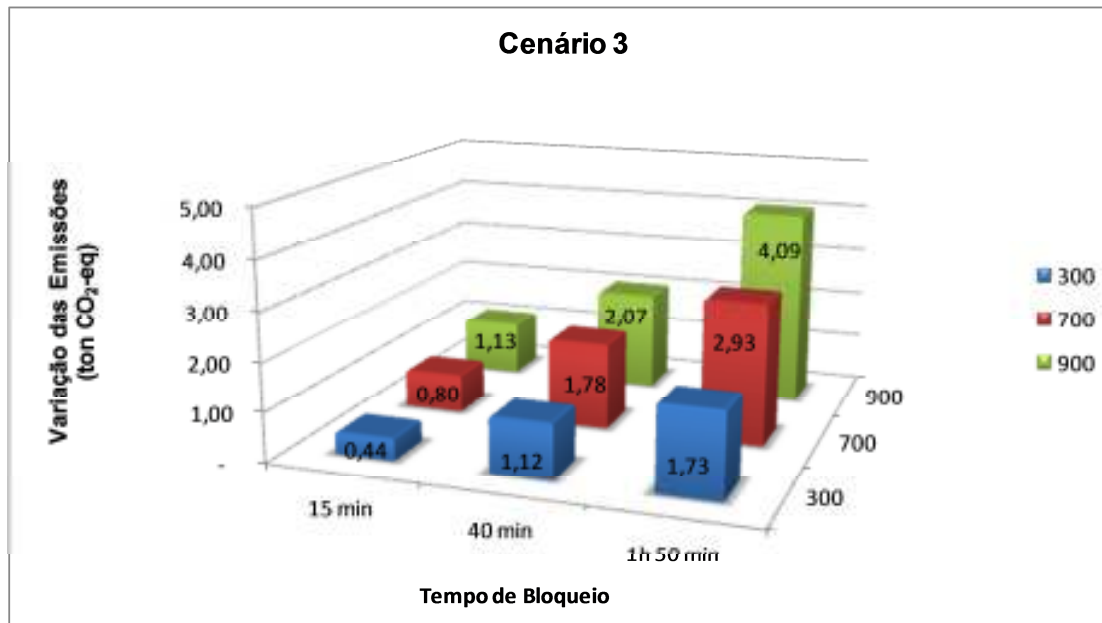


Figura 25: Variação nas Emissões de CO₂ – equivalente para o Cenário 3

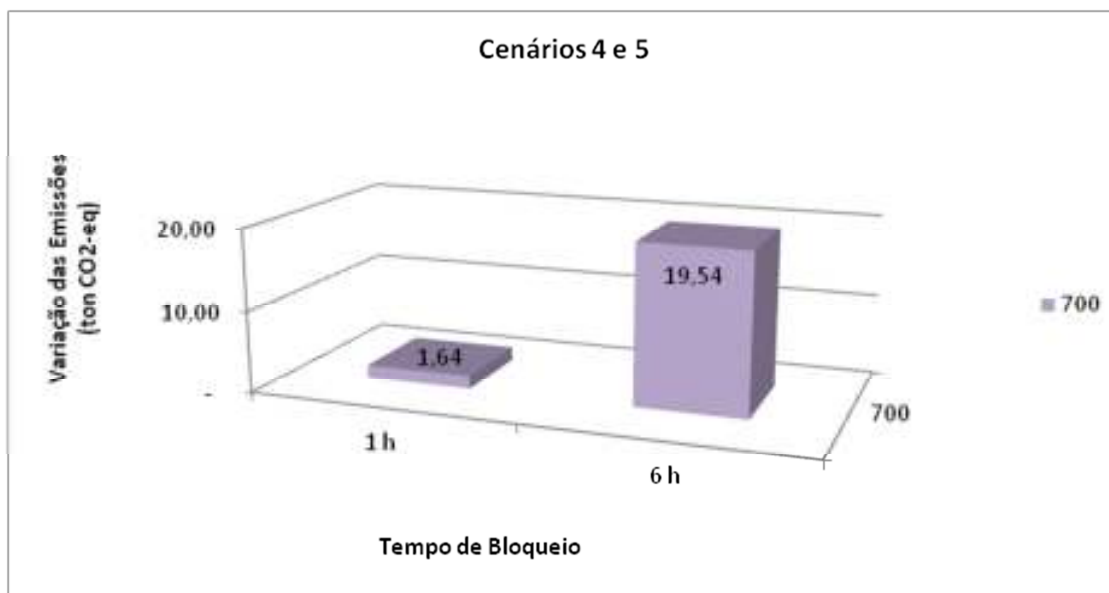


Figura 26: Variação nas Emissões de CO₂ – equivalente para os Cenários 4 e 5

O total de acidentes ao longo de um ano foi distribuído conforme os percentuais apresentados no item 6.2.1 para cada cenário nos diferentes níveis de fluxo de veículos (900 veic/h; 700 veic/h e 300 veic/h) e tempo de bloqueio parcial (BP1 – 15 min; BP2 – 40 min e BP3 – 1 h 50 min). A Tabela 20 apresenta o número de acidentes para cada cenário nos diferentes níveis de fluxo e tempo de bloqueio parcial. Para análise das obras foi considerado que as mesmas acontecem uma vez por ano em cada quilômetro; a incidência anual de obras para cada cenário pode ser visualizada na Tabela 21.

Tabela 20: Número de Acidentes para cada Cenário nos Diferentes Níveis de Fluxo e Tempo de Bloqueio Parcial

<i>CENÁRIO</i>	<i>FLUXO (veic/h)</i>	<i>NÚMERO DE ACIDENTES</i>			<i>TOTAL DE ACIDENTES</i>
		<i>BP1</i>	<i>BP2</i>	<i>BP3</i>	
AC 1	900	3	18	9	66
	700	1	10	5	
	300	2	12	6	

AC 2	900	5	37	18	134
	700	3	21	10	
	300	4	24	12	

Tabela 21: Número de Ocorrências de Obras para cada Cenário

<i>CENÁRIO</i>	<i>TOTAL DE OCORRÊNCIAS</i>
OB1	400
OB2	40

A pegada ecológica de cada cenário analisado consta das Tabela 22 a Tabela 24. A Pegada Ecológica de todos os incidentes rodoviários para os 40 km de via em estudo (cenários 2 a 5) totaliza 2.180,72 ha ou 2.747, 71 gha em um ano de operação.

Tabela 22: Pegada Ecológica para o Cenário 1 nos Diferentes Níveis de Fluxo Durante um Ano de Operação

<i>CENÁRIO</i>	<i>FLUXO (veic/h)</i>	<i>PEGADA ECOLÓGICA (ha/ano)</i>
1	900	20.312,32
	700	15.830,56
	300	13.749,17
TOTAL		49.892,04

Tabela 23: Pegada Ecológica para os Cenários 2 e 3 nos Diferentes Níveis de Fluxo e Tempo de Bloqueio Parcial

<i>CENÁRIO</i>	<i>FLUXO</i> (veic/h)	<i>PEGADA ECOLÓGICA</i> (ha/ano)			<i>TOTAIS</i>
		BP1	BP2	BP3	
2	900	32,84	210,53	123,50	366,86
	700	8,33	93,17	52,88	154,39
	300	7,97	52,42	29,90	90,30
TOTAIS		49,14	356,13	206,27	611,54
3	900	5,16	70,36	67,59	143,12
	700	2,21	34,37	26,85	63,44
	300	1,62	24,64	19,03	45,30
TOTAIS		9,00	129,37	113,48	251,85

Tabela 24: Pegada Ecológica para os Cenários 4 e 5

<i>CENÁRIO</i>	<i>FLUXO</i> (veic/h)	<i>PEGADA ECOLÓGICA</i> (ha/ano)
4	700	600,25
5	700	717,07
TOTAL		1.317,33

6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Pegada Ecológica de 2.180,72 ha do trecho de rodovia em estudo representa a área fictícia que seria necessária para a absorção das emissões de CO₂ decorrentes dos incidentes rodoviários durante um ano de operação. Esse valor corresponde a 4% da pegada ecológica da rodovia em condições normais de operação com fluxo livre. Na Figura 27 pode-se observar

que os dois tipos de obras juntos contribuem com 60% da pegada ecológica dos incidentes, sendo que a atividade de aplicação do micro-revestimento (OB2) tem um impacto um pouco maior que a do reparo localizado (OB1). Embora a aplicação do micro-revestimento provoque uma variação no nível de emissões 12 vezes maior que o reparo localizado, este último ocorre em maior número ao longo de um ano, reduzindo essa diferença.

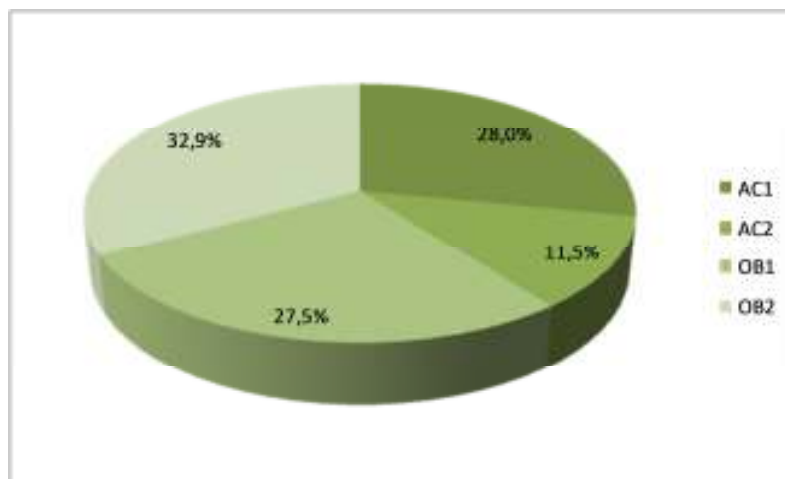


Figura 27: Participação Percentual da Pegada Ecológica por tipo de Incidente em Um Ano de Operação

É importante lembrar que este trabalho considera apenas dois tipos de obras de manutenção. É muito provável que a pegada ecológica dos incidentes seja ainda maior devido a grande participação percentual das obras. A manutenção das rodovias não pode ser evitada, porém pode ser planejada de modo a minimizar o seu impacto no meio ambiente. Investimentos em materiais com maior durabilidade, ou que promovam menores consumos de combustível, e a utilização de alternativas de desvio de tráfego poderiam contribuir para a redução da pegada ecológica da manutenção da rodovia.

Com relação aos acidentes, observa-se que ocorrências graves, que tem maior probabilidade de provocar interrupção total no fluxo de veículos, apesar de terem um percentual de ocorrência duas vezes menor ao longo do ano, pois contribuem com 33,3% do total, têm um impacto muito maior na pegada ecológica do que os acidentes em que a pista fica parcialmente bloqueada, a diferença chega a 140%. Analisando os valores unitários da pegada ecológica, apresentado nas Figura 28 e Figura 29, observa-se que no cenário 2 a diferença dos valores entre o maior e o menor tempo de bloqueio em um mesmo nível de

fluxo, chega no máximo a 26% para 700 veic/h, enquanto que no cenário 3 a variação pode chegar a 290% para 300 veic/h.

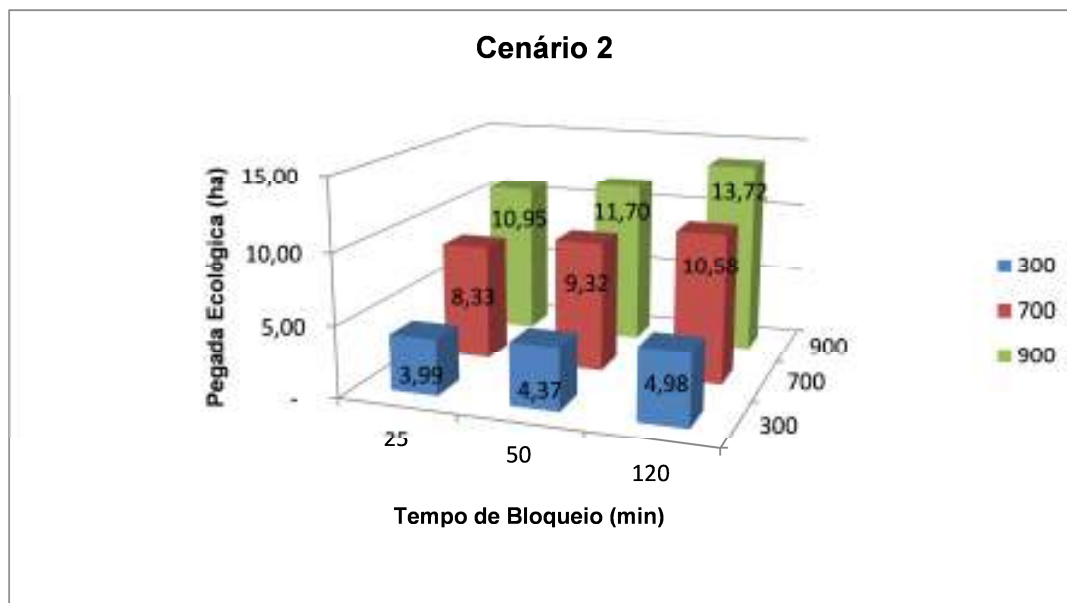


Figura 28: Pegada Ecológica de Um Incidente nos Diferentes Fluxos para o Cenário 2

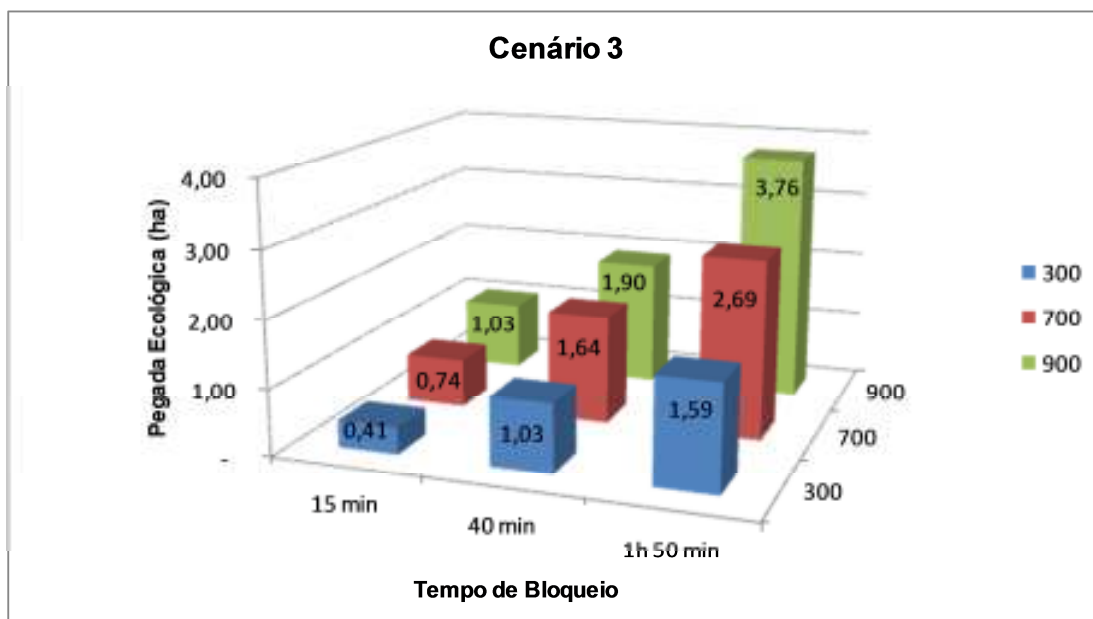


Figura 29: Pegada Ecológica de Um Incidente nos Diferentes Fluxos para o Cenário 3

Observando as simulações verifica-se que a diferença reside no fato de que quando a pista é interrompida totalmente, mesmo que por pouco tempo, a rede fica muito carregada. Ao liberar parcialmente a passagem, o número de veículos no sistema é muito maior no cenário 2 do que no cenário 3. Essa informação pode auxiliar a justificar investimentos em segurança viária, visando à redução deste tipo de incidente. Ou ainda justificar a implantação de acostamentos com largura adequada de modo a permitir o desvio do tráfego conforme preconiza o Manual do DNIT (DNIT, 2010).

Ainda nas Figura 28 e Figura 29 pode-se observar a grande diferença dos valores quando analisados os incidentes nos diferentes níveis de fluxo. Como era de se esperar a pegada ecológica de um incidente nos horários de pico tem um impacto maior do que a pegada ecológica dos incidentes que ocorrem fora do horário de pico podendo chegar a uma diferença de 175% como no caso do maior tempo de bloqueio do cenário 2. No cenário 3 a variação ficou em torno de 150%.

7 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo modelar a pegada ecológica dos incidentes rodoviários. Foi elaborado um método que está constituído de dois tipos de análise: uma análise qualitativa que permite identificar e classificar os diferentes incidentes conforme o tipo de interrupção que causam na operação da rodovia e o consequente impacto na pegada ecológica, e uma análise quantitativa que permite medir a pegada ecológica desses incidentes. A avaliação dos impactos foi baseada em cenários com a utilização de simulação de tráfego para obtenção dos valores de emissões decorrentes dos incidentes rodoviários.

A análise qualitativa contemplou a realização de entrevistas individuais com especialistas em rodovias, análise dos Manuais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e documentos públicos das Agências Reguladoras de Serviços de Transportes. Esta análise subsidiou a elaboração do método proposto neste estudo a partir da identificação das variáveis que influenciam na avaliação dos incidentes.

O método foi aplicado a um trecho de 40 km da rodovia BR 386 entre Lajeado e o entroncamento com a RS 287 permitindo o cálculo da pegada ecológica de dois tipos de incidentes: incidentes tipo obras, de reparo localizado e aplicação de micro-revestimento, ambos provocando uma interrupção parcial da pista, e incidentes tipo acidentes que bloqueiam total ou parcialmente a pista. Através da simulação de tráfego foi possível obter os valores de emissões de CO₂ equivalentes da rodovia em operação normal e durante os incidentes para utilização no cálculo. Os resultados permitiram identificar a pegada ecológica anual dos incidentes rodoviários como sendo 2.180,72 ha, representando a quantidade de área de floresta necessária para absorver as emissões oriundas desses incidentes. Pôde-se concluir também que as obras para manutenção da via tem um impacto maior na pegada dos incidentes, respondendo por 60% quando comparadas aos acidentes, e que os acidentes em que a pista fica totalmente bloqueada, embora ocorram em menor quantidade ao longo do ano, provocam um impacto muito maior na pegada dos incidentes.

O método se mostrou apropriado para avaliação dos impactos dos incidentes no meio ambiente, permitindo visualizar esta informação em termos de área apropriada, no caso avaliado a área de energia representa a área fictícia que seria necessária para assimilar as emissões de CO₂ de todos os incidentes que ocorrem em um ano de operação da via.

O método desenvolvido apresenta potencial para utilização em estudos ambientais, como forma de auxiliar no planejamento de transportes auxiliando na identificação de segmentos que necessitem maiores investimentos em segurança viária, em recursos para o atendimento às ocorrências ou em ampliação de capacidade de rodovias.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para trabalhos futuros coloca-se a aplicação do método para diferentes tipos de rodovias, ou segmentos com diferentes características de geometria como rampas e curvas, número de faixas, travessias com áreas urbanas, onde a ocorrência de um incidente pode ter um impacto bastante significativo na operação normal. A utilização de outros modelos de simulação como parâmetro de comparação poderia contribuir para melhoria e aprimoramento dos resultados.

Este trabalho considerou apenas dois tipos de obras de manutenção de rodovias, outros trabalhos poderiam considerar outras atividades, bem como obras de ampliação de capacidade, que normalmente tem períodos de duração maior e podem causar grandes impactos na operação da via.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. (2010). Highway safety manual (1ª ed.). Washington: American Association of State and Highway Transportation Officials.
- ANDERSON L.R.; FONTENOT, R.A. Optimal Positioning of Service Units Along a Coordinate Line. **Transportation Science**. Vol 26 (4) 346-351. 1992.
- ALVAREZ, P.; HADI, M. Use of ITS Data to Calibrate Microscopic Simulation Models for Incident Conditions. Traffic Flow Theory Committee Summer Meeting and Conference. Annecy, France. 2010.
- ARAÚJO, J.J. Estudo do impacto de veículos pesados sobre a infraestrutura rodoviária através de simulação microscópica de tráfego. 2007. **Tese de Doutorado**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- ARIOTTI, P. Método para Aprimorar a Estimativa de Emissões Veiculares em Áreas Urbanas Através de Modelagem Híbrida em Redes. **Tese de Doutorado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.
- ARIOTTI, P.; OBELHEIRO, M.; CYBIS, H. B. B. . Análise da Influência da Inclinação ascendentes da via na estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas. In: **XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET. Fortaleza. v. 1. p. 1-12. 2008.
- ARROW, K.; BOLIN, B.; COSTANZA, R.; DASGUPTA, P.; FOLKE, C.; HOLLING, C.S.; JANSSON, B.; LEVIN, S.; MALER, K.; PERRINGS, C.; PIMENTEL, D.. Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment. **Ecological Applications**, Vol. 6, No. 1. pp. 13-15. 1995.
- AUSTROADS (1994) Road Safety Audit. Austroads Nacional Office, Sidney, Austrália.
- BARRETT, J., VALLACK, H., JONES, A., HAQ, G. A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York. **Technical Report**. Stockholm Environment Institute – SEI, 2002.
- BARRETT, J., SCOTT, A. The application of the ecological footprint: a case of passenger transport in Merseyside. **Local Environment**, 8 (2), 167-183. 2003.

- BANCO MUNDIAL. Estudo de Baixo Carbono para o Brasil: Relatório de Síntese Técnica. Transporte. Washington, D.C. 2010.
- BELLEN, H.M.V. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2007.
- BERNARDES, J.A. e FERREIRA, F.P.M. Sociedade e Natureza. In: Cunha, S.B. e Guerra, A.J.T. (Orgs). A questão Ambiental: Diferentes Abordagens. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p17-41. 2003.
- BICKNELL, K.B., BALL, R.J., CULLEN, R., BIGSBY, H.R. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. **Ecological Economics** 27, 149–160. 1998.
- BOVY, P. Transport and the environment: a tentative overview of issues in cities of developed and developing countries. Swiss Federal Institute of Technology, 1990.
- BUTTON, K J. Transport, the environment and economic policy, Edward Elgar, UK, 1993.
- CHAMBERS, N., SIMMONS, C., WACKERNAGEL, M.. **Sharing nature's interest – ecological footprints as an indicator of sustainability**. Earthscan publication Ltd, London, UK. 2000.
- CHATTERJEE, I., EDARA, P., MENNENI, S. e SUN, C. Replication of work zone capacity values in a simulation model. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, n. ° 2130, pp. 138 – 148. 2009
- CHEN, B., CHEN, G.Q., YANG, Z.F., JIANG, M.M. Ecological footprint accounting for energy and resource in China. **Energy Policy** 35, 1599 – 1609. 2007.
- CHI, G., STONE Jr, B. Sustainable transport planning: estimating the ecological footprint of vehicle travel in future years. **Journal of Urban Planning and Development**. 170 – 180. 2005.
- CENTRE FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK. Environmental Sustainability Index, Global Leaders for Tomorrow World Economic Forum. Yale Center for Environmental Law and Policy. Main report. 2002.

CMMAD. **Nosso futuro comum**. COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO - CMMAD. Rio de Janeiro: FGV, 1988.

COELHO, M.A.F. Modelação Numérica de Incidentes de Tráfego Rodoviário. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro. 2010.

COMMISSION FOR GLOBAL ROAD SAFETY. **Make Roads Safety**. FIA Foundation. London, UK. 2011.

CORDEIRO, I, KÖRÖSSI, N., PARTIDÁRIO, M.R. Metodologia da Pegada Ecológica para Avaliar o Turismo Sustentável: Uma aplicação ao caso da região autónoma dos Açores. *Revista Turismo e Ação – Eletrônica*, Vol 12 – nº 3 – p. 236-257 (2010)

DAILY, G.C., EHRLICH, P.R. Population, Sustainability, and Earth's Carrying Capacity: A Framework for Estimating Population Size and Lifestyles that Could Be Sustained Without Undermining Future Generations. *Bio Science* 42:761-71. 1992.

DAILY, G.C., EHRLICH, P.R. **Socioeconomic Equity, Sustainability, and Earth's Carrying Capacity**. *Ecological Applications*. 6(4): 991-1001.1996.

DEFRA. **Sustainable Consumption and Production - Development of an Evidence Base: Study of Ecological Footprinting**. Risk. Policy Analysts Limited. London. 2005.

DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito. **Manual de identificação, análise e tratamento de pontos negros**. 2ª edição, Brasília, DF, 1987.

DEVUYST, D. **Linking Impact Assessment and Sustainable Development at the Local Level: The introduction of Sustainability Assessment Systems**. *Sust. Dev.*, v. 8, p. 67-78, 2000.

DNER. **Manual de Resgate de Acidentados**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro 1997

DNIT. **Manual de Sinalização e Obras de Emergências em Rodovias**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro 2010.

DNIT. **Manual de Conservação Rodoviária**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2005.

EDER, P., NARODOSLAWSKY, M. What environmental pressures are a region's industries responsible for? A method of analysis with descriptive input, output models. **Ecological Economics** 29, 359–374. 1999.

EUROSTAT. Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators. A Methodological Guide. Statistical Office of the European Union, Luxembourg. 2001.

EUROPEAN COMMISSION AND EUROSTAT. **Towards environmental pressure indicators for the EU**. Brussels. Second edition 2001.

EWING B., REED, A. GALLI, A., KITZES, J. and WACKERNAGEL, M. 2010. **Calculation Methodology for the National Footprint Accounts, 2010 Edition**. Oakland: Global Footprint Network.

FAO. Global Fibre Supply Model. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Tech. rep.; 2000.

FERNG, J.J. Toward a scenario analysis framework for energy footprints. **Ecological Economics** 40, 53–69. 2002.

FOGLIATTI, M.C., FILIPPO, S., GOUDARD, B. **Avaliação de Impactos Ambientais: aplicação aos Sistemas de Transporte**. Rio de Janeiro. Interciência. 2004.

FHWA (2001). **TSIS**: Traffic software integrated system. Version 5.0. Colorado Springs: ITT Industries.

GUNTHER, H. Poluição dos solos. In: Philippi Jr.A., Pelicioni M.C. (Ed). *Educação Ambiental e Sustentabilidade*. pp.191. São Paulo, Manole, 2005.

HOLDEN, E. Ecological footprints and sustainable urban form. **Journal of Housing and the Built Environment**, 19, 91-109. 2004.

IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Workbook. Vol. 2. Intergovernmental Panel on Climate Change. Tech. rep.; 1997a.

IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference Manual. Vol. 3. Intergovernmental Panel on Climate Change. Tech. rep.; 1997b.

IPCC. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. p. 190.

IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001.

IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007. Cambridge University Press, UK, 2007.

IPEA e ANTP - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada e Associação Nacional de Transportes Públicos. Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas aglomerações urbanas brasileiras. Relatório Executivo. Brasília, Brasil. 2003.

IUCN. **World conservation strategy**. International union for conservation of nature and natural resources – IUCN - et al., Gland, Suíça. 1980

JAPPUR, R. F. **A Sustentabilidade Corporativa Frente às Diversas Formações de Cadeias Produtivas Segundo a Percepção de Especialistas**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis., 2004.

KATES, W. C.; CLARK, R.; CORELL, M. J.; HALL, C. C.; JAEGER, I.; LOWE, J. J.; MCCARTHY, H. J.; SCHELLNHUBER, B.; N.M., B. A. **Sustainability science**. *Science*, v. 292, p. 641-642, 2001.

KITZES, J. PELLER, A. GOLDFINGER, S. WACKERNAGEL, M. Current Methods for Calculating National Ecological Footprint Accounts. **Science for Environment & Sustainable Society**, Vol.4, No.1., Research Center for Sustainability and Environment Shiga University. 2008.

KROTSCHECK, C., NARODOSLAWSKY, M. The Sustainable Process Index. A new dimension in ecological evaluation. **Ecological Engineering** 6,241–258. 1996.

LAMMERS, P.E.M., GILBERT, A.J. **Towards Environmental Pressure Indicators for the EU: Indicator Definition**. EUROSTAT, Brussels. 1999.

LENZEN, M.A., LUNDIE, S.B., BRANSGROVE, G.C., CHARET, L.C., SACK, F. Assessing the ecological footprint of a large metropolitan water supplier: lessons for water

management and planning towards sustainability. **Journal of Environmental Planning and Management** 46(1), 113–141. 2003.

LENZEN, M., MURRAY, S.A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. **Ecological Economics** 37, 229–255. 2001.

LITMAN, T. Transportation cost analysis: techniques, estimates and implications, Victoria Transport Policy Institute, Vancouver, Canadá. 1996.

McDONALD, G.W., PATTERSON, M.G. Ecological Footprints and interdependencies of New Zealand regions. **Ecological Economics** 50, 49–57.2004.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. MT- Programa PARE. Procedimento para o tratamento de locais críticos de acidentes de trânsito. Brasil, 2002.

MEDVED, S. Present and future ecological footprint of Slovenia—the influence of energy demand scenarios. **Ecological Modelling** 192, 26–36. 2006.

MILLER, P e MOFFET, J. The price of mobility – uncovering the hidden costs of transportation. Natural Resources Defense Council. EUA, 1993.

MOFFAT, I. Ecological footprints and sustainable development. **Ecological Economics** 32, 359–362. 2000.

MONFREDA, C., WACKERNAGEL, M., DEUMLING, D.. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological Footprint and biological capacity assessments. **Land Use Policy** 21, 231–246. 2004.

MOREIRA, R.B. Uma Contribuição para Avaliação do Modelo CORSIM em Simulações de Tráfego Urbano do Rio de Janeiro. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro. 2005.

MUÑIZ, I., GALINDO, A. Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. **Ecological Economics**, 55, 499-514. 2005.

MUÑUZURI, J., DUIN, J.H.R., ESCUDERO, A. How efficient is city logistics? Estimating ecological footprints for urban freight deliveries. *Social and Behavioral Sciences* 2, 6165 - 6176. 2010.

NESS, B.; URBEL-PIIRSALU, E.; ANDERBERG, S.; OLSSON, L. **Categorising tools for sustainability assessment**. *Ecological Economics*, v. 60, 3 p. 498-508, 2007.

ONU. **World Population Prospects: The 2010 Revision**. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. United Nations. New York. 2010.

ONU. **World Population Prospects: The 2006 Revision**. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. United Nations. New York. 2007.

FHA. **Traffic Incident Management Handbook**. Federal Highway Administration: Office of Travel Management. 2000.

PEREIRA, C.L.F. **Avaliação da Sustentabilidade Ampliada de Produtos Agroindustriais. Estudo de Caso: Suco de Laranja e Etanol. Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. São Paulo. 2008.

PEREIRA, L.G. **Síntese dos Métodos de Pegada Ecológica e Análise Emergética para Diagnóstico da Sustentabilidade de Países: O Brasil como Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. São Paulo. 2008.

PNLT. **Plano Nacional de Logística e Transportes. Relatório executivo**. Ministério dos Transportes. Brasil. 2007.

REAL, M.V., BORBA, B.S.M., FILHO, H.M., ALEKSEEV, K.P.G. **Mitigação de Gases de Efeito Estufa Decorrente da Implantação do Plano Nacional de Logística e Transportes. XXIII Associação Nacional de Pesquisa e Ensino e Transportes**. ANPET. Vitória, ES. 2009.

REES, W.E. **Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out**. *Environment and Urbanization* 4/2, 121–130. 1992.

REES, W. **Revisiting Carrying Capacity: Area-Based Indicators of Sustainability**. *Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies*. Volume 17, Number 3. 1996.

REES, W. Eco-footprint Analysis: Merits and Brickbats. **Ecological Economics**.2000.

SCOTTI, M., BONDAVALLI, C., BODINI, A. Ecological footprint as a tool for local sustainability: The municipality of Piacenza (Italy) as a case study. **Environmental Impact Assessment Review**. Vol 29, pp 39-50. 2009.

SINAY, M. C. F. ; TAMAYO, A. S. . Segurança Viária: Uma Visão Sistêmica. In: Rio de Transportes III. Rio de Janeiro. 2005.

STOEGLEHNER, G. Ecological footprint—a tool for assessing sustainable energy supplies. **Journal of Cleaner Production** 11, 267–277. 2003.

STOEGLEHNER, G., NARODOSLAWSKY, M. Implementing ecological footprint in decision-making processes. **Land use Policy** 25, 421-431. 2008.

TRB. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, EUA. 2000.

UNDP. **Human Development Report**. Cultural Liberty in Today's Diverse World. United Nations Development Programme. New York. 2004.

VAN VUUREN, D.P., SMEETS, E.M.W. Ecological footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and Netherlands. **Ecological Economics** 34, 115-130. 2000.

VASCONCELOS, E.A. Transportes e Meio Ambiente: conceitos e informações para análise de impactos. São Paulo, 2008.

VERHOEF, E. External effects and social costs of road transport, in **Transportation Research** vol. 28, n.º 4, pp. 273-287. Pergamon, 1994.

WACKERNAGEL, M., REES, W.E. **Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth**. Gabriola Press New Society Publishing, B.C. 1996.

WACKERNAGEL, M.; MONFREDA, C.; MORAN, D.; WERMER, P.; GOLDFINGER, S.; DEUMLING, D.; MURRAY, M. **National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The Underlying Calculation Method**. Global Footprint Network. Oakland. California. 2005.

- WEST, B.; MCGILL, R.; HODGSON, J.; SLUDER, S.; SMITH, D. Development of data-based light-duty modal emission and fuel consumption models, SAE Technical Papers Series, n. 972910, 1997.
- WIEDMANN, T., MINX, J., BARRETT, J., WACKERNAGEL, M. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input–output analysis. **Ecological Economics** 56, 28–48. 2006.
- WOOD, R., LENZEN, M. An application of a modified ecological footprint method and structural path analysis in a comparative institutional study. **Local Environment** 8/4, 365–386. 2003.
- WORLD BANK. Global Road Safety Facility Strategic Plan 2006-2015. World Bank Transport Division. Washinton DC. 2009.
- WWF. Living Planet Report 2006. World Wide Fund for Nature International (WWF), Zoological Society of London (ZSL), Global Footprint Network. 2006.
- WWF. Living Planet Report 2010. Biodiversity, Biocapacity and Development. World Wide Fund for Nature International (WWF), Zoological Society of London (ZSL), Global Footprint Network. 2010.
- ZEITSMAN, J. (2000) Incorporating sustainability performance measures into the transportation planning process. **Ph.D. Thesis**, Texas A&M University, Texas, EUA.