ÉRICA FERRAZ DE CAMPOS

**EMIÇÃO DE CO₂ DA MADEIRA SERRADA DA AMAZÔNIA:
O CASO DA EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL**

São Paulo

2012

ÉRICA FERRAZ DE CAMPOS

**EMIÇÃO DE CO₂ DA MADEIRA SERRADA DA AMAZÔNIA:
O CASO DA EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia**

**Área de concentração:
Materiais e Componentes de Construção
Civil**

**Orientador:
Prof. Livre Docente
Vanderley Moacyr John**

São Paulo

2012

ÉRICA FERRAZ DE CAMPOS

**EMISSÃO DE CO₂ DA MADEIRA SERRADA DA AMAZÔNIA:
O CASO DA EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia**

São Paulo

2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 19 de julho de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Campos, Érica Ferraz de

Emissão de CO₂ da madeira serrada da Amazônia: o caso da exploração convencional / E.F. de Campos. -- São Paulo, 2012. 152 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Madeira 2.Construção civil 3.Carbono 4.Mudança climática 5.Florestas tropicais 6.Transporte de carga I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

*Ao Fábio e à minha família,
meus incentivadores incondicionais.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Vanderley M. John por sua contagiante paixão pelo conhecimento e por ser um verdadeiro orientador, para a profissão e para a vida.

À colega Katia Punhagui, que contribuiu de forma direta no desenvolvimento do trabalho, por meio de suas informações, ideias e reflexões. Às madeiras que aceitaram fazer parte do levantamento de Katia e nos permitiram atingir nossos objetivos de pesquisa.

Ao Prof. Sérgio Almeida Pacca, Prof. Edson Vidal, Prof. Fernando Seixas e Estevão Braga pelas informações fornecidas e compartilhamento de seu saber. Ao Vinicius John pelo software para quantificação das distâncias entre municípios.

Aos docentes da Escola Politécnica pelo conhecimento transmitido. Aos funcionários, pelo apoio e boa vontade. À CAPES, pela bolsa de mestrado.

Aos membros do CBCS, pelo que aprendi com todos esses ímpares profissionais. Em especial à Diana Csillag, essa rara mulher que tanto me proveu força e estímulo durante a pesquisa.

Aos meus pais, que sempre foram meus conselheiros e amigos, agradeço a formação, instrução, dedicação e exemplo. Ao meu pai, pelo fundamental acolhimento nessa fase de minha vida.

Ao Fábio Luiz Calciolari, meu inicial incentivador na vida acadêmica e alvo de minha enorme admiração.

A todos os meus amigos, que sempre me inspiram.

RESUMO

Informações ambientais de materiais e produtos são essenciais para a gestão de sustentabilidade no setor de construção. Em função das mudanças climáticas, o fator de emissão de dióxido de carbono (CO_2) de produtos torna-se relevante para inventariar projetos e edificações, e pautar a decisão de profissionais e consumidores.

Com base na metodologia de Análise de Fluxo do Material, a presente pesquisa objetivou quantificar o fator de emissão de CO_2 da madeira serrada da Amazônia originária de exploração convencional. O recorte abrangeu a extração de toras da floresta, transporte de toras até serraria, processamento primário e transporte de madeira serrada ao mercado consumidor. Foram consideradas para o cálculo as emissões advindas de resíduos de biomassa e consumo de energia fóssil. Os resultados são apresentados em faixas de valores mínimos a máximos, para cada etapa produtiva, com o objetivo de incorporar incertezas e variações relativas às características do ambiente florestal e procedimentos da atividade madeireira. A quantificação foi principalmente baseada em dados de literatura; entrevistas e questionários com madeireiras da região foram utilizados para determinar o consumo de energia no processo.

Entre 200 t/ha e 425 t/ha de biomassa seca acima do solo compõem a floresta Amazônica, de acordo com as características regionais. Essa biomassa estoca de 98 tC/ha a 208 tC/ha. Na exploração convencional são extraídas de 3 a 9 árvores por hectare, estimadas entre 4% e 14% da biomassa. Durante a extração, de 7% a 33% da biomassa florestal é danificada para abertura de trilhas, derrubada de árvores comerciais e arraste de toras. A biomassa destruída na extração é geralmente abandonada na floresta, onde se decompõe, gerando emissões. Nas serrarias, devido ao baixo aproveitamento, pelo menos 54% da biomassa das toras é transformada em resíduos, que são queimados ou degradam, outra fonte de CO_2 . Somando floresta e serraria, são produzidos de 5,0 t/t a 8,5 t/t na relação entre resíduos e madeira serrada. As emissões relativas aos resíduos, por unidade de tora processada, são estimados de 3,4 t CO_2 /t a 9,7 t CO_2 /t. As emissões por consumo de energia para extração, transporte de toras e processamento contribuem com 0,02 t CO_2 /t a 0,12 t CO_2 /t de tora processada. Ao final do processo produtivo, estimou-se a faixa de variação das emissões de 7,5 t CO_2 /t a 28,4 t CO_2 /t de madeira serrada, equivalentes a 5,2 t CO_2 /m³ e 19,6 t CO_2 /m³. Outra etapa considerada foi o transporte do produto entre serraria e mercado consumidor, que incrementa em 0,03 t CO_2 /t a 0,12 t CO_2 /t de madeira serrada, se admitidos 1.956 km, estimativa de distância média percorrida legalmente com a madeira amazônica no Brasil.

O fator de emissão de CO_2 da madeira serrada da Amazônia pode fundamentar políticas públicas para sua mitigação na atividade madeireira, bem como pautar iniciativas do setor

público, construção civil e consumidores. A destruição da floresta foi identificada como a principal influência no fator de emissão de CO₂ da madeira serrada. Para mitigação do CO₂ nessa etapa, o modelo convencional de exploração precisaria ser revisto, o que conjuntamente promoveria a conservação da floresta. O aproveitamento de resíduos de floresta e serraria configura outra oportunidade relevante para a redução de impacto ambiental do produto. A parcela de contribuição da produção de madeira serrada Amazônica sobre as emissões brasileiras de 2005 foi estimada entre 3,5% e 13,1%. Para a proposição de ações eficazes, o impacto de diversos modelos de exploração madeireira precisa ser medido e sua análise ser aprofundada, para as diferentes regiões da floresta Amazônica.

Palavras-chave: Madeira, Carbono, Floresta Amazônica, Atividade Madeireira, Construção, Análise de Fluxo do Material

ABSTRACT

Environmental information of materials and products are essential for sustainability management in construction. Due to climate change, CO₂ emission of products are relevant to inventory buildings and projects and to guide professionals' and consumers' decisions.

Based on Material Flow Analysis, this research aim to quantify CO₂ emission factor of Amazon lumber from conventional logging. The study included stages of logging, transportation of logs, sawing and lumber transportation. CO₂ emissions from residues of biomass and energy consumption were considered in quantification. The results are presented in ranges for each stage of chain production, in order to incorporate uncertainties and variations of forest characteristics and procedures. Quantification was mainly based on literature; interviews with logging companies were used to define energy consumption.

Amazon rainforest is composed of 200 t/ha to 425 t/ha of above ground dry biomass, which depends on forest region, and stocks between 98 tC/ha and 208 tC/ha. In conventional logging 3-9 trees per hectare are usually extracted, estimated as 4% to 14% of forest biomass. During logging, from 7% to 33% of the forest biomass is damaged to open trails, fall trees and remove commercial logs. The damaged biomass is usually left at forest, where it decomposes, causing CO₂ emissions. In sawmills, at least 54% of the biomass is transformed into residues, which are burned or degraded, other CO₂ source. Combining forest and sawmill residues, from 5.0 t residues/ t lumber to 8.5 t/t are generated. The CO₂ emissions from residues of biomass, per unit of processed roundwood, are estimated from 3.4 tCO₂/t to 9.7 tCO₂/t. Energy consumed in extraction, logs transportation and sawing contribute with 0.02 tCO₂/t to 0.12 tCO₂/t of processed roundwood. At the end of the production, emissions were estimated from 7.5 tCO₂/t to 28.4 tCO₂/t of lumber, equivalent to 5.2 tCO₂/m³ to 19.6 tCO₂/m³. Lumber transportation from sawmills to consumer market is another stage that increases emissions from 0.03 tCO₂/t to 0.12 tCO₂/t of lumber, if admitted 1,956 km, the estimated average distance for legal Amazon lumber transportation in Brazil.

CO₂ emission factor of Amazon lumber may contribute to mitigation policies in wood sector, as well as guide initiatives of public sector, construction sector and consumers. The destruction of forest biomass was identified as the main influence on CO₂ emission factor of Amazon lumber. To minimize CO₂ emissions the conventional model of exploitation need to be revised, what would also promote Amazon rainforest conservation. The use of residues from forest and sawmills is another relevant opportunity to reduce environmental impact of lumber. The contribution of Amazon lumber in Brazilian CO₂ emissions, based on 2005 data, was estimated from 3.5% to 13.1%. To propose effective actions, the impact of logging in different models of exploitation must be measured in different regions of Amazon forest.

Keywords wood: Carbon, Lumber, Logging, Amazon Rainforest, Material Flow Analysis

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Área florestal da Amazônia Brasileira, Amazônia total, florestas da América do Sul e florestas do mundo.....	14
Figura 2 - Participação por setor nas emissões de CO ₂ no ano de 2005, segundo inventário nacional.....	15
Figura 3 - Esquema da captação de carbono pela vegetação e os demais componentes químicos da biomassa.....	16
Figura 4 - Representação da estrutura celular da madeira.....	17
Figura 5 – Parcela dos elementos químicos carbono, hidrogênio e oxigênio na composição da biomassa e parcela de água livre nos poros da madeira verde (a) e da madeira com umidade em equilíbrio com o ar (b)	20
Figura 6 - Distribuição da biomassa seca acima do solo, considerando o DAP das árvores, em regiões com alta e baixa concentração de biomassa.....	22
Figura 7 – Número de árvores, classificadas pelo diâmetro à altura do peito (DAP), em regiões com alta e baixa concentração de biomassa	23
Figura 8 - Distribuição da quantidade de biomassa viva acima do solo (t/ha), estimada por inventário de biomassa e imagens de satélite	25
Figura 9 - Porcentagem da área, estimada por faixa de concentração de biomassa, em duas tipologias vegetais da floresta Amazônica: várzea (a) e terra firme (b).....	26
Figura 10 - Volume de madeira Amazônica consumido, em milhões de metros cúbicos, para os anos de 1997, 1998, 2000, 2001, 2002, 2004 e 2009, segundo as referências.	27
Figura 11 - Imagem das principais espécies comerciais de árvores da Amazônia	30
Figura 12 - Quantidades mínima, mediana e máxima de biomassa seca acima do solo, por hectare, adotadas para a floresta Amazônica.....	34
Figura 13 - Elementos constituintes da biomassa verde, em toneladas por hectare da floresta Amazônica.....	36
Figura 14 - Padrão de degradação por extração seletiva da madeira	38
Figura 15 - Caminhos e trilhas abertos na floresta sem planejamento	38
Figura 16 - Trilha de acesso às árvores comerciais em floresta manejada	39
Figura 17 - Movimentação de equipamento	39
Figura 18 – Derrubada de árvore (a) e arraste de tora (b).....	39
Figura 19 - Área de estocagem de toras na extração manejada	40
Figura 20 - Área de estocagem de toras na extração convencional	40
Figura 21 - Clareiras de degradação.....	41

Figura 22 – Alguns fatores de influência na intensidade de exploração madeireira na floresta Amazônica.	42
Figura 23 – Exemplos de número de árvores por hectare extraídas em exploração convencional: cenário de baixa extração (a) e cenário de elevada extração (b).....	43
Figura 24 – Exemplos de trilhas para acesso às árvores comerciais para cenário de baixa extração (a) e cenário de elevada extração (b)	44
Figura 25 – Exemplos de efeito da movimentação dos equipamentos, corte das árvores comerciais na floresta e criação de áreas de estocagem de toras para cenário de baixa extração (a) e cenário de elevada extração (b)	45
Figura 26 - Exemplos de efeito da extração seletiva na cobertura da floresta Amazônia para cenário de baixa extração (a) e cenário de elevada extração (b).....	45
Figura 27 - Intensidade de degradação do dossel em diferentes períodos após extração convencional de madeira, em leitura de imagens obtidas por satélite.	46
Figura 28 – Principais usos da terra que substituem a floresta Amazônica: pecuária e agricultura	47
Figura 29 – Exemplo do processo de substituição da floresta Amazônica por outros usos da terra, próximo à cidade de Ariquemes (RO), com imagens de 1975 (a), 1989 (b), 2001 (c) e 2008 (d).....	48
Figura 30 - Taxa de desmatamento anual entre 1988 e 2010 (Prodes) e degradação anual entre 2007 e 2009 na Amazônia brasileira (Degrad)	49
Figura 31 - Área com corte raso e diferentes níveis de degradação na Amazônia brasileira, nos anos de 2010 e 2011, segundo avaliação por sistema Deter.....	50
Figura 32 - Distribuição da extração seletiva de madeira nos estados do Pará, Mato Grosso, Rondônia, Tocantins e Maranhão e tamanho das áreas exploradas.	51
Figura 33 - Biomassa abandonada por defeitos ou falta de aproveitamento como produto serrado, em floresta manejada	55
Figura 34 - Biomassa destruída nos procedimentos de extração de toras	56
Figura 35 - Relação entre parcela de biomassa extraída e parcela de biomassa destruída, segundo as referências adotadas.....	58
Figura 36 - Variação da supressão da floresta, considerando biomassa em toras (azul) e resíduos (cinza), para diferentes concentrações de biomassa seca acima do solo	61
Figura 37 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica, em biomassa seca, após etapa de extração seletiva de toras: cenário de exploração mínima.....	63
Figura 38 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica, em biomassa seca, após etapa de extração seletiva de toras: cenário de exploração média.....	63
Figura 39 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica, em biomassa seca, após etapa de extração seletiva de toras: cenário de exploração máxima	63

Figura 40 - Distribuição do carbono na floresta Amazônica antes e após extração convencional de madeira.....	65
Figura 41 - Produtos de madeira nativa serrada	70
Figura 42 - Estoque de toras em serrarias	71
Figura 43 - Processamento de tora de grande porte em serraria da região Amazônica	71
Figura 44 - Exemplos de infraestrutura e equipamentos de diferentes serrarias da região Amazônica	72
Figura 45 - Serraria portátil	73
Figura 46 - Sequência de divisão da tora em peças comerciais.....	73
Figura 47 - Resíduos da serraria: pó de serragem (a), pedaços de cascas das toras (b), pedaços sem aproveitamento (c) e (d), aparas (e) e (f)	74
Figura 48 - Exemplo de subdivisão de uma tora de 45 cm de diâmetro em peças de madeira serrada.....	75
Figura 49 – Exemplos de destinação dos resíduos da serraria	79
Figura 50 - Destinação dos resíduos da serraria.....	80
Figura 51 – Faixa de consumo energético (a) e faixa de emissão de CO ₂ (b) para extração de toras na floresta.....	84
Figura 52 - Consumo de energia por tonelada de tora processada (MJ/t), por fonte energética, nas serrarias entrevistadas	86
Figura 53 – Emissão de CO ₂ por tonelada de tora processada (kgCO ₂ /t), por fonte energética, nas serrarias entrevistadas	87
Figura 54 - Fator de emissão de CO ₂ por tonelada de tora processada (kgCO ₂ /t) em serrarias da região Amazônica e média admitida na pesquisa.	89
Figura 55 – Etapas de transporte da madeira serrada da Amazônia.....	90
Figura 56 – Diferentes cenários de condições das estradas, tipos de veículos e quantidade de carga no transporte da madeira em tora.....	91
Figura 57 - Bufete (sucata de caminhão) utilizada no transporte da madeira.	92
Figura 58 - Volume de toras no transporte da madeira.	92
Figura 59 - Exemplo de transporte de toras por balsa, provavelmente com carga de coníferas	93
Figura 60 - Diferentes modelos de caminhões e condições das estradas	94
Figura 61 – Fluxo esquemático de origem, destino e escala do volume de madeira transportado internamente e a escala de madeira exportada.	96
Figura 62 - Distância média ponderada e volume total dos principais estados de destino da madeira serrada legalmente transportada em 2007 com origem em Mato Grosso (a), Pará (b) e Rondônia (c)	99

Figura 63 - Histograma do número de registros da madeira serrada de origem Amazônica, a partir das distâncias de transporte.....	100
Figura 64 - Modelo A (4x2) - Caminhão sem composição com dois eixos.....	102
Figura 65 - Modelo B (6x4) - Caminhão trucado sem composição com três eixos.	102
Figura 66 - Modelo C (6x4) - Caminhão trator e semirreboque.	103
Figura 67 - Modelo D (6x4) - Bitrem articulado.....	103
Figura 68 - Faixa do fator de consumo de combustível para transporte de toras de madeira serrada (L/t.km), com base nas referências	107
Figura 69 - Comparativo entre faixa de fator de emissão de CO ₂ (gCO ₂ /t.km) adotado para transporte de toras e de madeira serrada e referências internacionais.....	111
Figura 70 - Análise de sensibilidade da emissão de CO ₂ (gCO ₂ /t.km), em função do fator de emissão de CO ₂ para transporte de tora e de madeira serrada.....	112
Figura 71 - Análise de sensibilidade da emissão de CO ₂ (gCO ₂ /t.km), em função da densidade da madeira, exemplo do produto serrado.....	112
Figura 72 - Variação na geração total de CO ₂ no transporte de madeira em tora, para diferentes fatores de emissão de CO ₂	114
Figura 73 - Variação na geração total de CO ₂ no transporte de madeira serrada, para diferentes fatores de emissão de CO ₂	115
Figura 74 - Emissão total de CO ₂ para cada modelo de caminhão, com uso de fator médio de emissão em percurso de 1.000 km (a) e faixa de emissão (kgCO ₂ /t carga.km) para cada modelo de caminhão, considerando carga máxima (b).....	115
Figura 75 - Emissão total de CO ₂ no transporte de carga em função da parcela da capacidade máxima de carga para cada modelo de veículo, em percurso de 1.000 km: emissão de CO ₂ total (a); emissão de CO ₂ por massa de carga (b)	116
Figura 76 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica: cenário bbb associado ao rendimento superior na serraria (45,7%)	121
Figura 77 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica: cenário mmm associado ao rendimento médio na serraria (41,1%)	121
Figura 78 – Fluxo do material da madeira serrada Amazônica: cenário aaa associado ao rendimento inferior na serraria (35,4%)	121
Figura 79 - Distribuição entre madeira serrada, resíduos da extração e resíduos do processamento na exploração convencional.....	122
Figura 80 - Fluxo do carbono na extração seletiva de toras na floresta Amazônica: cenário bbb associado ao rendimento superior na serraria (45,7%)	123
Figura 81 - Fluxo do carbono na extração seletiva de toras na floresta Amazônica: cenário mmm associado ao rendimento médio na serraria (41,1%)	123

Figura 82 - Fluxo do carbono na extração seletiva de toras na floresta Amazônica: cenário aaa associado ao rendimento inferior na serraria (35,4%).....	123
Figura 83 - Influência do impacto na extração e do rendimento da serraria no fator de emissão de CO ₂ (tCO ₂ /t tora, em biomassa seca)	126
Figura 84 - Composição do fator de emissão de CO ₂ no processo produtivo da madeira serrada, por geração de resíduos e consumo de energia (tCO ₂ /t tora, em biomassa seca)	127
Figura 85 - Faixa de variação do fator de emissão de CO ₂ em unidade de massa de tora e de madeira serrada, considerando as etapas de extração, transporte de toras para serraria e processamento (tCO ₂ /t, em biomassa seca).....	127
Figura 86 - Faixa de variação do estoque de CO ₂ na madeira serrada, emissão total de CO ₂ na produção e balanço líquido (tCO ₂ /m ³).....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de Avaliação do Fluxo de Materiais	7
Tabela 2 – Exemplo de teor de carbono, hidrogênio e oxigênio na biomassa seca, admitindo 50% celulose + 35% lignina + 15% hemicelulose	18
Tabela 3 - Porcentagem de água da madeira verde por componente da floresta.	19
Tabela 4 - Densidade média da madeira da floresta (g/cm ³), em função do tipo de floresta e localização	21
Tabela 5 - Biomassa seca acima do solo por hectare de florestas tropicais (t/ha).	25
Tabela 6 - Lista de espécies das principais madeiras comerciais Amazônicas, densidade verde, aparente e seca e dimensões comerciais de toras	32
Tabela 7 - Biomassa seca acima do solo (t/ha) em diferentes regiões da floresta Amazônica, segundo as referências.	33
Tabela 8 – Estimativas da faixa de variação de carbono armazenado na massa vegetal do bioma Amazônico.....	34
Tabela 9 - Teor de carbono na biomassa seca por componente da floresta.	35
Tabela 10 - Teor médio de carbono na biomassa seca para proporção de componentes da floresta de alta e baixa concentração de biomassa.	36
Tabela 11 – Influência da intensidade de extração de madeira em tora, de acordo com as referências adotadas.....	53
Tabela 12 - Influência da intensidade de exploração na geração de resíduos por hectare: volume, massa e parcela da biomassa florestal destruída, de acordo com as referências adotadas.	57
Tabela 13 - Dados de entrada dos cenários de exploração convencional: concentração de biomassa, porcentual de biomassa extraída e porcentual de biomassa destruída	59
Tabela 14 - Cenários-hipótese de exploração convencional na floresta Amazônica	59
Tabela 15 - Classificação e dimensão dos produtos de madeira serrada, segundo padrão do IBAMA.....	69
Tabela 16 - Rendimento da madeira processada na Amazônia Legal em 2009 e participação por categoria de produto.	77
Tabela 17 - Consumo energético dos equipamentos empregados na extração de toras	83
Tabela 18 - Emissão de CO ₂ por tipo de combustível e total para extração de toras.....	84
Tabela 19 - Consumo energético para processamento primário em cinco serrarias da floresta Amazônica, por tipo de fonte de energia e total, por tonelada de biomassa seca em tora.....	86

Tabela 20 – Quantificação da emissão de CO ₂ para carvão mineral, com base em dados nacionais de 2005.	87
Tabela 21 - Demanda energética e emissão de CO ₂ para geração de eletricidade em serrarias da região Amazônica.	88
Tabela 22 - Principais estados de origem da madeira em tora Amazônica.	97
Tabela 23 - Distância média de transporte e composição do trajeto por volume de madeira em tora, para cada estado da região Amazônica, em 2009.	98
Tabela 24 - Principais estados de origem da madeira serrada Amazônica.	99
Tabela 25 - Peso bruto total combinado (PBTC) por categoria de caminhão.	102
Tabela 26 - Especificações técnicas dos quatro modelos de veículos de transporte de carga e quantificação da carga máxima total permitida.	104
Tabela 27 - Consumo de diesel por tonelada-quilômetro, segundo referências nacionais*	105
Tabela 28 - Emissão de CO ₂ por transporte (gCO ₂ /t.km), segundo referências internacionais. Dados diretamente fornecidos pelos autores estão em negrito.	109
Tabela 29 – Faixa de emissão total de CO ₂ (kgCO ₂) e unitária (kgCO ₂ /m ³ e kgCO ₂ /t) para cenários típicos de transporte de toras e madeira serrada.	117
Tabela 30 - Emissão de CO ₂ por consumo energético nas etapas de produção	118
Tabela 31 - Emissão de CO ₂ das etapas de extração e serragem e valor total (tCO ₂ /ha), para os cenários prováveis na Amazônia	124
Tabela 32 - Emissão de CO ₂ por geração de resíduos (tCO ₂ /t tora, em biomassa seca)... ..	125
Tabela 33 - Quadro geral da variação do fator de emissão de CO ₂ do processo produtivo da madeira serrada, com base em unidades de massa e volume, para tora e madeira serrada.....	128
Tabela 34 – Faixa de variação estimada da emissão de CO ₂ no transporte da madeira serrada ao mercado consumidor em distâncias mediana (1.956 km) e máxima (4.362 km), e emissão total para os dois cenários de transporte.....	129
Tabela 35 – Faixa de variação do balanço líquido de CO ₂ da madeira serrada por massa e volume de produto.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM	Análise de Fluxo do Material
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
DAP	Diâmetro à Altura do Peito
DOF	Documento de Origem Florestal
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, em português: Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development, em português: Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
PBTC	Peso Bruto Total Combinado
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change, em português: Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	X
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XVII
SUMÁRIO.....	XVIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	1
1.2 Objetivo	4
2 METODOLOGIA.....	5
2.1 A Análise de Fluxo do Material	6
2.2 Fluxo do material da madeira serrada da Floresta Amazônica.....	8
2.3 Biomassa na Floresta Amazônica.....	9
2.4 Extração de toras e resíduos da exploração convencional	9
2.5 Processamento das toras em madeira serrada.....	10
2.6 Consumo de energia no processo produtivo da madeira serrada	10
2.7 Conversão da biomassa e das fontes energéticas em CO ₂	10
2.8 Alocação do carbono	11
2.9 Balanço líquido de CO ₂	11
2.10 Estrutura do texto	12
3 FLORESTA AMAZÔNICA: ESTIMATIVAS DE CONCENTRAÇÃO DE BIOMASSA, CARBONO E ESPÉCIES MADEIREIRAS	14
3.1 Caracterização da floresta Amazônica.....	14
3.1.1 Relevância do bioma	14
3.1.2 Composição da biomassa.....	16
3.1.3 Composição da vegetação	21
3.1.4 Concentração de biomassa	24
3.2 Caracterização da exploração madeireira na floresta Amazônica.....	27
3.2.1 Fatores de interesse da indústria madeireira	28
3.2.2 Espécies e densidade da madeira comercial	29
3.2.3 Biomassa em áreas atualmente exploradas	33
3.3 Estoque de carbono na floresta Amazônica.....	34
3.4 Conclusão	36

4	IMPACTOS E EFEITOS DA EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL DE MADEIRA NA FLORESTA AMAZÔNICA.....	37
4.1	Procedimento da extração convencional da madeira Amazônica	37
4.1.1	Fatores diretos de intensidade de exploração no modelo convencional.....	41
4.1.2	Fatores indiretos da intensidade de exploração no modelo convencional.....	46
4.1.3	Histórico e distribuição das áreas degradadas.....	49
4.2	Biomassa em toras extraída na exploração convencional.....	52
4.3	Biomassa destruída na exploração convencional	54
4.4	Cenários de extração convencional da madeira Amazônica	58
4.5	Fluxo do material da extração convencional de toras	62
4.6	Dinâmica da floresta Amazônica após extração de toras comerciais	64
4.6.1	Degradação dos resíduos e crescimento de nova vegetação	64
4.6.2	Efeitos indiretos da degradação	66
4.7	Conclusão	68
5	PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA NA REGIÃO AMAZÔNICA	69
5.1	Produtos de madeira serrada e sua aplicação na construção civil	69
5.2	Procedimentos de serragem e equipamentos.....	70
5.3	Rendimento de toras em madeira serrada.....	75
5.4	Destino dos resíduos de biomassa das serrarias.....	78
5.5	Conclusão	81
6	EMIÇÃO DE CO₂ PELO CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO PRODUTIVO DA MADEIRA SERRADA	82
6.1	Extração	82
6.2	Serraria.....	85
6.3	Transporte da madeira	89
6.3.1	Distâncias de transporte da madeira Amazônica no Brasil	95
6.3.1.1	Distância de transporte de toras	96
6.3.1.2	Distância de transporte de produtos serrados.....	98
6.3.2	Veículos rodoviários de transporte da madeira nativa e capacidade de carga	101
6.3.3	Consumo de combustível de veículos rodoviários	104
6.3.4	Emissão de CO ₂ pelo consumo energético no transporte da madeira Amazônica.....	108
6.3.4.1	Equações básicas	113
6.3.4.2	Fatores de sensibilidade da emissão de CO ₂ no transporte da madeira	114
6.3.4.3	Cenários típicos de emissão de CO ₂ no transporte da madeira	117
6.4	Panorama geral das emissões de CO ₂ por consumo energético	117

6.5	Energia incorporada na madeira serrada	118
6.6	Conclusão	119
7	FLUXO DO MATERIAL DA MADEIRA SERRADA DA AMAZÔNIA.....	120
7.1	Fluxo do material a partir da floresta Amazônica	120
7.1.1	Fluxo de biomassa seca por área de floresta explorada	120
7.1.2	Fluxo do carbono por área de floresta explorada	122
7.2	Emissões de CO ₂ da madeira serrada	125
7.2.1	Cenários de emissão de CO ₂ por geração de resíduos	125
7.2.1	Emissão de CO ₂ por energia de processamento	126
7.2.1	Fator de emissão de CO ₂ do processo produtivo da madeira serrada	127
7.2.1	Emissão de CO ₂ por transporte da madeira serrada.....	128
7.3	Balanço líquido de CO ₂ da madeira serrada	129
7.4	Impactos nacionais da produção de madeira serrada da Amazônia	132
7.5	Oportunidades para redução das emissões de CO ₂ e benefícios em sustentabilidade	133
7.6	Conclusão	134
8	CONCLUSÃO	136
8.1	Contribuições do trabalho	138
8.2	Sugestões para trabalhos futuros	138
	REFERÊNCIAS	140
	APÊNDICE A.....	149
	APÊNDICE B.....	150
	ANEXO A	152

1 Introdução

1.1 Justificativa

A recente evolução das mudanças climáticas no planeta vem sendo percebida a partir do monitoramento de ecossistemas naturais, com verificação de alterações nos diversos meios, como por exemplo, sistemas hídricos, fauna, flora e produtividade da terra, com influências diretas sobre a saúde humana (IPCC, 2007a). Correlacionaram-se esses fenômenos com o incremento recente da quantidade de gases de efeito estufa presentes na atmosfera do planeta, já que esses gases são responsáveis por conter a radiação solar dentro da atmosfera. A concentração de dióxido de carbono passou de 280 partes por milhão no período pré-industrial para 379 ppm em 2005 (IPCC, 2007a), gerados por atividades humanas que liberam o carbono terrestre para a atmosfera. Viabilizar a redução, ou mesmo a estabilização, da concentração de gases estufa na atmosfera demanda esforços em escala global.

A correlação das mudanças climáticas com emissão de gases estufa vem sendo classificada como muito evidente por especialistas. Nessa premissa, a perspectiva de frear ou mitigar as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera, e as iniciativas de adaptação dos sistemas humanos às alterações futuras, devem perpassar todos os setores econômicos, possivelmente com restrições maiores para os mais impactantes.

No ano de 2004, as emissões antrópicas globais representaram 50 GtCO₂e (dióxido de carbono equivalente) (IPCC, 2007a). Praticamente todas as atividades humanas implicam na liberação de carbono para a atmosfera, que se encontra fixo em combustíveis fósseis, calcário, biomassa ou dissolvido na água. Evitar o desmatamento de florestas nativas, reduzir o consumo de combustíveis fósseis, desenvolver melhoria nos processos industriais e na agricultura são exemplos de mitigação que poderiam permitir o controle da temperatura em níveis de adaptação para a humanidade.

Segundo o inventário brasileiro de gases de efeito estufa de 2010, referente à 2005, a floresta Amazônica, isoladamente, responderia por 50% das emissões nacionais de CO₂ (MCT, 2010a). Isso porque a supressão de sua biomassa por degradação ou desmatamento representa a redução de um estoque terrestre de carbono em larga escala e de longa duração, com idade média das árvores estimada entre 195 (região de Santarém) e 381 anos (região de Manaus) (Vieira et al., 2005). Além de acumular uma importante reserva de carbono terrestre, a preservação dessa área florestal é uma prioridade em escala global e nacional por ser composta por biodiversidade única de fauna e flora e integrar sistemas

naturais, como os ciclos hidrológicos e ciclos de massas de ar (Anderson et al., 2009; Asner et al., 2005; Laurance, et al., 2000; Malhi et al., 2008; Nobre; Sellers; Shukla, 1991).

Há duas formas principais de liberação do carbono da floresta Amazônica por ações antrópicas: uma seria o desmatamento total, por episódios de corte raso e queima da vegetação; ou a retirada parcial da biomassa, chamada de degradação, principalmente associada à extração seletiva de madeira. Em muitos casos, a degradação por exploração madeireira, é a primeira etapa do desmatamento da floresta, que objetiva introduzir outros usos, como agricultura e pecuária (Asner et al., 2006; Cederberg et al., 2011; Fearnside; Graça; Rodrigues, 2001; Laurance et al., 2010; Nepstad et al., 2001; Nepstad et al., 1999; Verissimo et al., 1992).

A floresta Amazônica tem sido uma relevante fonte de madeira para mercados brasileiros e internacionais desde a década de 1970, época em que foi iniciada a exploração madeireira de forma intensa na região (Pereira et al., 2010; Uhl et al., 1991; Verissimo et al., 1992). A extração de madeira na Amazônia promove a degradação parcial da vegetação, pois segue o modelo de exploração seletiva de toras. Nesse processo, apenas árvores de elevado valor comercial são extraídas em meio à vasta diversidade de espécies, sendo grande parte da vegetação danificada para abertura de trilhas, derrubada e retirada das árvores comerciais. Nesse caso, a vegetação destruída na exploração é abandonada na floresta para degradação, processo com elevada geração de dióxido de carbono a partir do carbono presente na vegetação.

A exploração seletiva é predominantemente realizada no modelo convencional, sem qualquer compromisso com o bioma. Uma alternativa seria a exploração com práticas de manejo da floresta, em que são adotados cuidados para minimizar a destruição de madeira não comercial visando a conservação da floresta. Entretanto, o manejo florestal é pouco representativo na Amazônia, enquanto a exploração seletiva convencional pode ser considerada a prática mais comum de retirada de madeira na região (Pereira et al., 2010).

Devido à ilegalidade na atividade, em que a madeira nativa é extraída sem qualquer autorização dos órgãos competentes, há apenas estimativas aproximadas sobre a quantidade de madeira extraída anualmente. Estima-se que o consumo de madeira serrada da Amazônia, em 2009, tenha sido de $14,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ de toras, dos quais foram obtidos $5,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ de madeira serrada (Pereira et al., 2010). Devido ao baixo aproveitamento das serrarias, mais resíduos de madeira são gerados no processo. Do volume de madeira serrada produzido, admite-se que 79% tenham sido destinados ao mercado consumidor brasileiro, com utilização predominante (84% do consumo nacional) no setor de construção civil, para aplicações de longa duração e curta duração (Sobral et al., 2002).

A madeira aplicada em usos duráveis na construção vem sendo considerada um estoque de carbono. Essa premissa provavelmente baseia-se em dados internacionais, estabelecidos

para madeira extraída de florestas de coníferas. Neste caso, todas as árvores da floresta são comerciais, o que reduz a destruição de biomassa da floresta. Adicionalmente, o formato regular dessas espécies permite melhor aproveitamento das toras em produtos serrados, se comparadas às espécies nativas da Amazônia.

No caso da produção de madeira serrada da Amazônia, a geração de CO₂ deve-se aos resíduos por destruição da floresta e por processamento. Além disso, outra fonte de CO₂ refere-se ao consumo de energia fóssil nas etapas de extração, processamento e transporte da madeira. Um exemplo é que longas distâncias são percorridas para deslocamento dos produtos serrados, desde a região Amazônica até os mercados consumidores. Apenas o estado de São Paulo representou 17% do consumo em 2009 (Pereira et al., 2010). Estas emissões não são incorporadas na abordagem única de estoque de carbono do material.

Desta forma, deve ser atribuída à atividade madeireira da região Amazônica sua escala de contribuição para as emissões brasileiras de gases de efeito estufa. Diversos países têm estabelecida uma meta de redução da emissão de CO₂, sendo que todos os países devem conjuntamente estar comprometidos com a redução global. Nesse contexto, a informação de CO₂ relacionada a cada atividade humana torna-se fundamental para ações de mitigação e gerenciamento setorial.

No setor de construção civil, gerar informações sobre os fluxos de material e impactos ambientais é o ponto inicial para a quantificação do impacto do setor e proposição de ações de mitigação. Analisar o impacto de uma edificação implica em levantar as emissões de gases estufa tanto da execução e operação como da fabricação dos materiais que as constitui. A adoção de referências ou de dados de madeira plantada sobre a quantidade de carbono emitido e estocado no processo produtivo, como se esses modelos tivessem resultados similares ao da madeira nativa da Amazônia, incorpora distorções. A quantificação de CO₂ relacionada ao setor de construção demanda o levantamento de dados específicos dos produtos empregados, que considerem a realidade de fabricação de cada material no país de produção. Com o objetivo de fornecer ao setor uma estimativa atrelada à realidade da madeira nativa Amazônica, a presente pesquisa analisou o fluxo de material em sua cadeia de produção, quantificando a emissão de CO₂ em cada etapa.

No caso da madeira Amazônica, a quantificação das fontes de CO₂ envolve todo o processo produtivo da madeira serrada, ou seja, degradação de resíduos de madeira da exploração da floresta e da serraria e queima de energia fóssil. A quantificação pode alimentar bases de dados que agrupem informações de CO₂ dos produtos de construção, além de inventários de emissão CO₂ do setor de construção, além de colaborar com diretrizes e políticas públicas relacionadas à madeira amazônica.

1.2 Objetivo

Quantificar o fator de emissão de dióxido de carbono (CO₂) da madeira serrada originária de floresta tropical da Amazônia, extraída por processo de exploração convencional, que envolve a extração seletiva de toras, com recorte desde o ambiente florestal até sua oferta no mercado consumidor, abordando as emissões de CO₂ ao longo do processo produtivo.

2 Metodologia

O foco de interesse do trabalho envolveu o processo produtivo da madeira Amazônica desde o ambiente florestal até sua disponibilidade no formato de madeira serrada no mercado consumidor. A madeira serrada foi definida como objeto de análise por ser o primeiro formato de produto obtido na transformação das toras em produtos de madeira. As emissões de CO_2 do processo produtivo da madeira serrada da Amazônia foram identificadas como originárias da degradação da biomassa residual e da queima de energia fóssil. Para estimar o impacto em CO_2 foram adotadas duas leituras complementares: a abordagem de fluxo do material, no caso de biomassa e de carbono, e consumo de energia ao longo da produção.

Na metodologia de Avaliação de Fluxo do Material (AFM), a transformação e destinação do material ou produto são analisadas ao longo das etapas de fabricação, uso e descarte, de acordo com o objetivo e interesse do estudo. Foram delineadas como etapas para o fluxo do material: extração da madeira em tora da floresta Amazônica e processamento primário das toras para obtenção de madeira serrada em serrarias típicas da região. O fluxo do material foi estabelecido pela quantidade de biomassa envolvida nessas etapas e, a partir desses dados, a biomassa foi convertida em massa de carbono, elemento que compõe o material, e finalmente, convertida em unidade de massa de dióxido de carbono (CO_2).

Nas etapas do processo produtivo, foi conjuntamente estimado o consumo de energia e levantado o teor de carbono contido nas fontes de energia utilizadas, admitidas como geração de CO_2 . Há consumo de energia em todas as atividades do processo produtivo: extração das toras, transporte das toras entre floresta e serraria, processamento das toras em produtos de madeira serrada e transporte da madeira serrada entre serraria e mercado consumidor. Diesel é a fonte de energia predominantemente empregada.

Ao final da pesquisa foi quantificado o CO_2 líquido da madeira serrada amazônica, o que envolve o carbono liberado em todo o processo produtivo e o carbono estocado na madeira. Para isso, consideraram-se os produtos madeireiros como valor negativo (estoque de CO_2) e a liberação a partir de biomassa residual e de energia como valor positivo (emissão de CO_2).

A pesquisa foi quase que inteiramente baseada em literatura, extraídos de diversas áreas do conhecimento, e complementada por entrevistas com madeireiras sobre consumo de energia. A proposta deste trabalho foi reunir o conhecimento existente sobre floresta e processo produtivo da madeira serrada, e organizá-lo, de forma a construir o fluxo do material da madeira serrada Amazônica e associá-lo ao consumo energético na produção.

2.1 A Análise de Fluxo do Material

A Análise de Fluxo do Material (AFM) é uma metodologia baseada na construção de um mapa analítico de um determinado material dentro de um sistema definido, podendo ser aplicado na escala de uma empresa, atividade econômica, país ou região. Permite avaliar as transferências de massa, podendo ser traduzido como o estudo físico dos fluxos de materiais para dentro de, através de e para fora de um dado sistema (OECD, 2008).

A base conceitual desta metodologia segue a lógica do princípio de conservação da energia, ou a Primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece que na natureza não há criação ou destruição de energia, pois esta é constantemente convertida em outra forma de energia. Aplicar esse conceito aos recursos naturais significa afirmar que a soma das massas inseridas em um sistema é idêntica à soma das massas que são retiradas (OECD, 2008).

Partindo-se deste princípio, a metodologia de Fluxo dos Materiais é uma ferramenta para se compreender a base física das sociedades e as relações de fluxos entre meio ambiente e atividades humanas, ou seja, os impactos antrópicos sobre a natureza pela retirada (recursos naturais) ou deposição de matéria (resíduos ou emissões). Dentro da análise de fluxo dos materiais, alguns destes aspectos são analisados. Há dois grupos principais de análise, cada um com três diferentes abordagens. Um dos grupos relaciona-se com a categoria de análise dos objetos de interesse: substâncias, materiais ou produtos. O outro grupo foca a avaliação no contexto espacial: micro, meso ou macro. O cruzamento destes parâmetros define seis diferentes abordagens de análise, que podem ser acompanhadas na Tabela 1.

O tipo de análise mais adequado para cada caso dependerá da definição de objetivos e do interesse dos estudos (OECD, 2008).

- **Análise de Fluxo de Substâncias** é utilizada com a intenção de rastrear elementos químicos, visando compreender suas rotas de entrada, disseminação e interações químicas, físicas e biológicas na natureza. São exemplos os estudos sobre metais pesados, nutrientes, carbono e compostos halogênicos.
- **Análise de Fluxo de Materiais** são especialmente úteis no levantamento de informações sobre os impactos ambientais na extração de recursos e sua disposição final.
- **Avaliação de Ciclo de Vida** é o formato mais conhecido da ferramenta de Análise de Fluxo de Materiais, sendo bastante empregada no levantamento de impactos ambientais de produtos e serviços do “berço ao túmulo”, em que são avaliados os impactos nas fases de produção, uso e descarte.

Tabela 1 - Categorias de Avaliação do Fluxo de Materiais

Tema de interesse	Interesse específico relacionado aos impactos ambientais, segurança da cadeia de suprimentos e desenvolvimento tecnológico			Interesse ambiental e econômico relacionado à produção		
	Negócios, atividades econômicas, países ou regiões			Substâncias, materiais ou produtos finais		
	associados a:			em nível de:		
Objeto de interesse	Substâncias	Materiais	Produtos finais	Negócios	Atividades econômicas	Países e regiões
	Elementos químicos e compostos	Matérias primas e produtos semi acabados	Edifícios, carros, computadores, etc.	empresas, empreendimentos	Construção, agricultura, educação, transporte	Totalidade, grupos ou materiais específicos
Tipo de análise	Análise de Fluxo de Substâncias	Análise de Sistemas de Materiais	Avaliação de Ciclo de Vida	Análise de Fluxo de Material em Negócios	Análise de Insumo-produto	Análise de Fluxo de Materiais na Economia de Escala
	<i>Substance Flow Analysis</i>	<i>Material System Analysis</i>	<i>Life Cycle Assessment</i>	<i>Business level MF Analysis</i>	<i>Input-Output Analysis</i>	<i>Economy-wide MF Analysis</i>
Tipo de ferramenta de medição	Contabilização do Fluxo de Substâncias	Contabilização do Fluxo de Material	Inventário de Ciclo de Vida	Contabilização do Fluxo de Material em Negócios	Matriz Insumo-produto	Contabilização de Fluxo de Materiais na Economia de Escala
	<i>Substance Flow Accounts</i>	<i>Individual Material Flow Accounts</i>	<i>Life Cycle Inventories</i>	<i>Business Material Flow Accounts</i>	<i>Physical Input-Output Tables, NAMEA-type approaches</i>	<i>Economy-wide Material Flow Accounts</i>

Extraído de: OECD (2008), baseado em Bringezu e Moriguchi (2002); tradução livre.

- **Análise de Fluxo de Materiais em Negócios** pode ser visto como a análise do metabolismo de uma empresa, avaliando o fluxo de carga associado. É bastante útil na identificação dos principais problemas do sistema de produção, dando suporte ao estabelecimento de prioridades. Adicionalmente, é aplicada na otimização do uso de recursos, pois permite avaliar futuros benefícios da introdução de novas tecnologias e da alteração de matérias-primas, bem como monitorar as melhorias quando estas são implementadas.
- **Avaliação de Insumos-produto** aborda os setores industriais ou atividades da economia, como indústria de minérios, indústria química, setor de construção civil, setor de transportes, setor de geração de energia, etc. fornecendo um panorama dos fluxos mais críticos.
- **Análise de Fluxo de Materiais na Economia de Escala** representa a análise direcionada para substâncias ou produtos de interesse, ou mesmo para o fluxo total de materiais, em cidades, regiões ou nações. É vastamente aplicada por países na elaboração de indicadores que permitem comparar demanda de recursos naturais (explorados ou importados) pelo PIB gerado. Portanto, possui um enfoque político,

pois suas informações podem apoiar decisões como exploração interna de matérias-primas, uso de recursos, taxa de importações e exportações, entre outras.

Há diversos modelos de análise por meio da metodologia AFM, assim como diversas possibilidades de aplicação. Podem ser citados como exemplos: identificar as ineficiências dos sistemas, compreender as interferências mútuas entre ambiente e processos, fornecer informações aos tomadores de decisão para o estabelecimento de prioridades e vislumbrar futuras consequências em intervenções nas bases materiais, tecnológicas e políticas (OECD, 2008). O presente estudo pode ser classificado como contabilização do fluxo de material de produto semiacabado, com interesse relacionado aos impactos ambientais, no caso emissão de CO₂, associados à madeira serrada.

2.2 Fluxo do material da madeira serrada da Floresta Amazônica

Na presente análise, o fluxo do material refere-se à atividade produtiva da madeira serrada nativa da floresta Amazônica, produto madeireiro amplamente empregado na construção civil. O sistema foi limitado a um hectare (ha) de floresta Amazônica e o fluxo do material expresso em toneladas (t) de biomassa seca acima do solo ou toneladas (t) de carbono. A unidade de biomassa seca é vastamente empregada em literatura que relacionam carbono e florestas. Sendo o carbono contido na madeira o interesse último da análise, subtrai-se a massa de água por não exercer influência no resultado.

Há diversos fatores que interferem no sistema, como, por exemplo, concentração de biomassa da floresta, intensidade de exploração, escala de geração de resíduos de biomassa por rendimento na serraria, eficiência dos equipamentos e características de transporte, entre outros parâmetros que podem apresentar resultados diversos em função de especificidades de processo, localização ou contexto. Para incorporar as incertezas pertinentes a essas especificidades, a cada etapa do processo produtivo e à qualidade dos dados de literatura existentes, tornando-os aplicáveis aos cenários típicos da floresta Amazônica, optou-se por quantificar todos os parâmetros em valores mínimo, máximo e mediana.

As etapas do processo produtivo da madeira serrada que constituem o fluxo do material, expresso na unidade de biomassa seca, são: (1) ambiente florestal; (2) toras extraídas; (3) resíduos de biomassa gerados na floresta para extração seletiva de toras; (4) produtos de madeira serrada obtidos no processamento das toras; (5) resíduos gerados no processamento das toras. Os dados foram obtidos em literatura, estimados separadamente para cada etapa e posteriormente consolidados no fluxo do material. Alguns dados de consumo energético foram obtidos em pesquisa desenvolvida concomitantemente a este

estudo, realizada por Katia Punhagui, por meio de entrevistas e preenchimento de questionários com madeireiras da região Amazônica.

2.3 Biomassa na Floresta Amazônica

O fluxo do material tem início na biomassa seca acima do solo da floresta tropical Amazônica, unidade habitualmente empregada nos estudos sobre carbono da floresta. A biomassa abaixo do solo vem sendo usualmente desconsiderada, o que foi adotado na pesquisa. Informações sobre quantidade de biomassa seca acima do solo em diferentes regiões da Floresta Amazônica são vastamente disponíveis em literatura, geralmente estimados pelo método de medição direta de parte da biomassa e extrapolados a partir de padrões de textura e cor identificados em imagens de satélite. Os dados adotados para a biomassa seca da floresta foram extraídos de diversas fontes bibliográficas (Anderson et al., 2009; Araújo et al., 1999; Carvalho et al., 1995; Carvalho Jr. et al., 2001; FAO, 2005; Fearnside et al., 1999; Fearnside et al. 2001; Fearnside et al., 2009; Gerwing; Farias, 2000; Houghton et al., 2000; Saatchi et al., 2007; Soares Neto et al., 2009), tendo como parâmetro a estimativa de biomassa seca por classificação de fisionomia da vegetação no bioma amazônico estabelecido pela Segunda Comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCT, 2010a).

2.4 Extração de toras e resíduos da exploração convencional

Para obter a quantidade de madeira em toras extraída, ou intensidade de extração, foram levantadas em literatura estimativas de biomassa ou volume de toras extraídos por hectare, em diferentes localizações da floresta (Asner et al., 2005; Gerwing; Vidal, 2002; Huang; Asner, 2010; Johns; Barreto; Uhl, 1996; Keller; Palace; Hurtt, 2001; Verissimo et al., 1992). Os valores de biomassa extraída foram divididos pela biomassa seca acima do solo da floresta na região, obtendo-se o percentual da biomassa florestal usualmente extraída na forma de toras. Os valores percentuais mínimo, mediano e máximo foram considerados como faixa de intensidade de extração.

O procedimento para quantificação dos resíduos da extração foi similar ao utilizado para a quantificação da biomassa extraída. Foram levantados dados preferencialmente relacionados à biomassa, evitando-se o uso de unidades como área de solo com intervenção ou área de copa suprimida. A variação da parcela de biomassa destruída foi baseada em dados de literatura (Asner et al., 2002; Gerwing; Vidal, 2002; Johns; Barreto; Uhl, 1996; Keller et al., 2001; Verissimo et al., 1992) e na Segunda Comunicação Nacional do Brasil (MCT, 2010a).

2.5 Processamento das toras em madeira serrada

O fluxo do material nessa etapa está relacionado com o rendimento das serrarias para conversão da biomassa de toras em produtos serrados. Poucos dados primários estão disponíveis em literatura sobre esse assunto, portanto o fator de rendimento foi baseado em fonte bibliográfica que apresenta uma faixa de variação típica das serrarias da região Amazônica (Pereira et al., 2010).

2.6 Consumo de energia no processo produtivo da madeira serrada

Todas as etapas do processo produtivo da madeira serrada envolvem consumo de energia fóssil ou com componente fóssil. As principais fontes energéticas são os combustíveis diesel e gasolina. Nas etapas de extração seletiva e processamento das toras há o consumo energético por equipamentos como motosserra, trator, serra de fita, etc. Para o transporte das toras entre floresta e serraria e entre serraria e mercado consumidor são empregados veículos de transporte de carga, como caminhões. Os dados de consumo energético dos equipamentos de corte, processamento e transporte diretamente empregados no estudo foram obtidos em literatura (EPE/MME, 2010; INEE, 2003; Transporte Mundial, 2010; Uhl et al., 1991) e em pesquisa associada ao presente estudo, em desenvolvimento por Katia Punhagui, que foram cedidos à pesquisadora por auto declaração de empresas madeireiras.

2.7 Conversão da biomassa e das fontes energéticas em CO₂

Os valores de biomassa seca que compõe o fluxo do material da madeira serrada Amazônica foram convertidos em unidades de massa de carbono e de dióxido de carbono (CO₂), com uso dos seguintes fatores de conversão:

- Densidade da madeira seca em estufa (0% umidade): 0,69 g/cm³ (Fearnside, 1997);
- Densidade da madeira com umidade em equilíbrio com a umidade do ar (cerca de 15% de umidade): 0,81 g/cm³;
- Densidade da madeira verde (cerca de 40% de umidade): 1,15 g/cm³;
- Teor de carbono na madeira seca em estufa: 0,49 (IPCC, 2006);
- Conversão entre carbono (C) e dióxido de carbono (CO₂): baseado na massa molecular, sendo C=12 e CO₂=44.

A energia do processo produtivo da madeira serrada foi quantificada em unidade de massa de dióxido de carbono (CO₂), gerado unicamente pela combustão da fonte energética, sem se considerar a emissão no ciclo de vida, com uso dos seguintes fatores:

- Emissão média do combustível óleo diesel: 2.799 gCO₂/L (MCT, 2006);
- Emissão média do combustível gasolina: 2.210 gCO₂/L (MCT, 2006);
- Emissão média do combustível óleo lubrificante: 1.353 gCO₂/L (MCT, 2006);
- Emissão média da eletricidade brasileira: 51,2 gCO₂/kWh (MCT, 2011).

Por integrarem de forma mais clara o desenvolvimento do trabalho, maiores detalhes dos fatores de conversão constam no desenvolvimento da pesquisa.

2.8 Alocação do carbono

Todas as emissões de CO₂ do processo produtivo da madeira serrada foram alocados no produto, tanto provenientes de combustíveis fósseis como dos resíduos de biomassa. A queima dos combustíveis fósseis implica na liberação direta de CO₂. No caso dos resíduos de biomassa da floresta e serraria considerou-se que o carbono estocado no material é liberado para a atmosfera, pois sua destinação envolve queima ou degradação. Essa premissa é amparada pela definição de alocação neutra de carbono em resíduos, conforme admitido pela normatização ISO 14.041.

Desta forma, os resíduos de biomassa foram considerados neutros em carbono, já que foram unicamente obtidos para produção da madeira serrada. A mesma definição foi atribuída a qualquer resíduo incorporado no processamento da madeira serrada. Os resíduos de lixívia e biomassa, por exemplo, foram inseridos como emissão zero na geração de energia na serraria. Demais gases de efeito estufa não foram considerados na queima da energia, sendo todo o carbono convertido em CO₂.

2.9 Balanço líquido de CO₂

Para o cálculo do balanço líquido de CO₂, considerou-se o carbono presente em produtos madeireiros como fator negativo (estoque CO₂), e o carbono presente na biomassa residual e energia, a ser liberado para a atmosfera, como fator positivo (emissão CO₂). Essa definição segue a abordagem do IPCC (2007b), que coloca a concentração de carbono na atmosfera como referência para definir a redução ou a contribuição do objeto de análise para o fenômeno das mudanças climáticas.

2.10 Estrutura do texto

Os capítulos da dissertação apresentam informações das atividades envolvidas na produção convencional de madeira serrada na Amazônia, sendo complementares para a composição do fluxo do material e quantificação da emissão de CO₂.

No capítulo 1 são apresentados dados sobre a relevância da floresta Amazônica para as emissões nacionais de gases de efeito estufa, o impacto da exploração madeireira sobre o bioma e o objetivo da pesquisa.

A metodologia da pesquisa e sua aplicação no estudo; as etapas que constituem o processo produtivo da madeira serrada da Amazônia; as unidades básicas adotadas e os fatores de conversão entre biomassa, combustível fóssil, carbono e CO₂; e as principais referências bibliográficas e fontes de informação da pesquisa constam no Capítulo 2.

O Capítulo 3 reúne dados da floresta Amazônica, primeiramente abordando sua importância como bioma natural e o impacto da supressão e degradação de sua biomassa. São detalhados dados de elementos de composição da madeira como material, parcela de carbono presente na biomassa, padrões de composição da vegetação ao longo da floresta, caracterização das espécies de árvores de interesse comercial e densidade da madeira. É estabelecido o dado inicial do fluxo do material, que é a faixa de concentração de biomassa na floresta Amazônica típica da exploração madeireira.

No capítulo 4 são apresentados dados relacionados à etapa de extração de toras no modelo convencional de exploração de árvores comerciais, que representa a primeira atividade do processo produtivo da madeira serrada. São propostos e validados cenários típicos de intensidade de exploração, com base em dados mínimos, medianos e máximos de concentração de biomassa na floresta, de extração de toras e destruição de biomassa. Fatores diretos e indiretos da intensidade de degradação da floresta são apresentados e discutidos. As informações estão sintetizadas no fluxo do material preliminar ao final do capítulo. A dinâmica da floresta Amazônica degradada também é abordada, apesar de não contabilizada.

O capítulo 5 oferece um panorama da etapa de conversão das toras na serraria, em que a madeira serrada é produzida em diversos formatos e dimensões. Conjuntamente, resíduos são gerados nesse processo. Estimou-se o rendimento da transformação das toras em madeira serrada, além de dados sobre a destinação dos resíduos, informações que irão fundamentar a quantificação da etapa de processamento no fluxo do material.

No capítulo 6 são quantificados os fatores de emissões de dióxido de carbono pela demanda energética para extração, processamento, transporte de toras entre floresta e serraria e transporte de madeira serrada entre serraria e mercado consumidor brasileiro. A participação de cada etapa nas emissões por consumo de energia é explicitada. Dados para

quantificação das emissões de CO₂ na etapa de transporte da madeira serrada são fornecidos, o que pode ser utilizado para qualquer outra categoria de carga.

O capítulo 7 consolida as informações dos demais capítulos e, a partir delas, quantifica as emissões de CO₂ em função da área de floresta explorada e os fatores de emissão dos produtos de madeira serrada. O impacto da atividade de exploração madeireira foi contextualizado para a escala nacional, além de levantadas oportunidades para mitigação das emissões de CO₂ na atividade madeireira.

3 Floresta Amazônica: estimativas de concentração de biomassa, carbono e espécies madeireiras

Este capítulo apresenta referências sobre a floresta Amazônica. Primeiramente, é abordada sua importância como bioma natural e o impacto de sua supressão e degradação. São destacadas informações sobre os elementos de composição da madeira, demonstrando a parcela de carbono presente na biomassa; caracterizadas as espécies de árvores de interesse comercial, com sua respectiva densidade; e apresentadas informações sobre os diversos padrões de vegetação em toda sua extensão. Ao final do capítulo, são contabilizadas as faixas de concentração de biomassa e carbono presentes em um hectare de floresta Amazônica, dados que compõem o fluxo do material da madeira serrada.

3.1 Caracterização da floresta Amazônica

3.1.1 Relevância do bioma

A dinâmica de formação da floresta Amazônica teve início há mais de 30 milhões de anos, em decorrência do tectonismo e clima do continente que, pela formação topográfica e hidrológica, criaram condições propícias para evolução da biodiversidade de fauna e flora (Hoorn et al., 2010). A Floresta Amazônica brasileira ocupa uma área de cerca de 380×10^6 hectares, equivalente a 59% do território brasileiro, por nove estados do país: Acre, Amazonas, Amapá, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e Maranhão (Pereira et al., 2010). Sua área representa 17,5% do total mundial de florestas, sendo a Amazônia brasileira equivalente a 9,6% (Figura 1). Segundo dados do censo demográfico de 2000, cerca de 20,3 milhões de pessoas habitavam a floresta brasileira no início deste século (IBGE, 2007a).

Figura 1 - Área florestal da Amazônia Brasileira, Amazônia total, florestas da América do Sul e florestas do mundo.

Fonte: FAO (2005) apud Nabuurs et al (2007); IBGE (2007b)

A floresta Amazônica é fundamental para os ciclos da biosfera. A presença e composição da vegetação influenciam as correntes climáticas locais, interagindo de forma dinâmica com os sistemas regionais. A integração desse ecossistema com sistemas globais, como correntes de ventos e umidade (Malhi et al., 2008), dinamização do ciclo hídrico da região (IBGE, 2007a), reciclagem de nutrientes (Nobre et al., 1991) e a rica biodiversidade de fauna e flora (Foley et al., 2007; Laurance et al., 2000), que fazem da Amazônia um ambiente único e demonstram que a supressão da vegetação pode trazer impactos globais relevantes. Um exemplo é a influência da umidade da floresta Amazônica sobre o clima e precipitação na região Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, que sofrem os efeitos do desmatamento na redução de seus índices de chuva (Nobre et al., 1991).

Globalmente, as florestas estocam mais que 80% de todo o carbono existente acima do solo (Dixon et al., 1994). Com elevada concentração de biomassa e, portanto, elevada quantidade de carbono terrestre incorporado na vegetação, há regiões da floresta Amazônica nas quais a maior parcela das árvores tem mais de 300 anos de idade (MCT, 2010a). Ações como queima e degradação da biomassa induzem à liberação do carbono na forma de gases de efeito estufa para a atmosfera e, desta forma, a supressão da floresta Amazônica tem relação direta com as mudanças do clima. Neste cenário, sua conservação adquire importância nacional e global.

Segundo o inventário brasileiro de gases de efeito estufa de 2010, referente às atividades de 2005, a emissão total do Brasil foi de 2.192 MtCO₂e no ano de 2005. Cerca de 77% do total de emissões de dióxido de carbono (CO₂) foram decorrentes de mudanças do uso da terra e alterações em ambientes florestais¹, totalizando 1.259 MtCO₂. Em 1990, essas emissões foram de 766 MtCO₂ (MCT, 2010a), tendo aumentado 64% no período (MCT, 2010a). Alterações no bioma Floresta Amazônica, que levaram à perda de biomassa e, conseqüentemente, de liberação de carbono para a atmosfera, representaram isoladamente cerca de 50% das emissões nacionais de CO₂ (MCT, 2010a), conforme Figura 2, o que faz deste o principal alvo para ações nacionais de mitigação.

Figura 2 - Participação por setor nas emissões de CO₂ no ano de 2005, segundo inventário nacional.

¹ Mundialmente, o setor de Mudança no Uso da Terra e Florestas correspondeu a 17,4% (IPCC, 2007a)

3.1.2 Composição da biomassa

A madeira é um sólido formado por processo de fotossíntese, no qual o carbono presente na atmosfera na forma de dióxido de carbono (CO_2) é absorvido por um vegetal vivo, a partir da presença de luz solar e água. O carbono associa-se a diversos nutrientes presentes no solo, formando macromoléculas, como celulose, hemicelulose e lignina, que compõe a estrutura da madeira. A fonte de energia do processo de fotossíntese é a luz e, na sua ausência, a vegetação libera CO_2 , porém em quantidade reduzida se comparada com a absorção (Figura 3).

Figura 3 - Esquema da captação de carbono pela vegetação e os demais componentes químicos da biomassa.

Fonte: extraído de www.quimicalizando.com

A **Figura 4** mostra esquematicamente a formação estrutural da madeira: (a) cerne, (b) albúrnio; (c) casca; (d) anéis de crescimento; (e) estrutura anatômica interna em forma de túbulos, que tem a função de conduzir água e seiva; (f) parede celular formada por fibras sobrepostas em diferentes direções; (g) os componentes poliméricos celulose, hemicelulose e lignina; e (h) moléculas da composição do material.

Figura 4 - Representação da estrutura celular da madeira.

Fonte: Harrington (1999) extraído de Badel (1999)

A madeira é composta pelos polímeros orgânicos: celulose (40 a 50%), hemicelulose (20 a 30%) e lignina (20 a 30%), com diferentes funções na fisiologia do material. A celulose ($C_6H_{10}O_5$) compõe a parede celular do vegetal, sendo responsável pela resistência estrutural da madeira. A lignina (variação na formulação: $C_9H_{10}O_2$; $C_{10}H_{12}O_3$; $C_{11}H_{14}O_4$) encontra-se aderida na parede celular, agrupando fisicamente as células e dando rigidez e impermeabilidade ao material. A hemicelulose ($C_5H_{10}O_5$; $C_6H_{12}O_6$) forma uma rede de fibras cruzadas que proporciona elasticidade e variação dimensional à madeira (USE, 2011). Uma hipótese de composição, fórmula e peso molecular da madeira é apresentada na Equação A.

Equação A – Composição, fórmula e peso molecular da madeira na hipótese 50% celulose + 35% lignina + 15% hemicelulose

$$\begin{aligned}
 &= 50\% C_6H_{10}O_5 + 35\% C_{10}H_{12}O_6 + 15\% C_6H_{12}O_6 \\
 &= 0,5 (6 \times 12 + 10 \times 1 + 5 \times 16) + 0,35 (10 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16) + 0,15 (6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16) \\
 &= 0,5 (162) + 0,35 (228) + 0,15 (180) \\
 &= 81 + 80 + 27 \\
 &= 188 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

A partir de sua formulação, identifica-se o carbono e o oxigênio como os principais elementos químicos de sua constituição. A Tabela 2 demonstra a composição da madeira a partir de cada elemento. Nesta hipótese, o teor de carbono da biomassa seca pode ser estimado como 47%, o que justifica a relevância da madeira viva como estoque de carbono. Outras hipóteses de composição entre celulose, lignina e hemicelulose podem trazer ligeiras variações para o teor dos elementos químicos.

Tabela 2 – Exemplo de teor de carbono, hidrogênio e oxigênio na biomassa seca, admitindo 50% celulose + 35% lignina + 15% hemicelulose

Elemento	Peso molecular	Celulose	Lignina	Hemicelulose	
		$C_6H_{10}O_5$	$C_{10}H_{12}O_6$	$C_6H_{12}O_6$	
C	12	72	120	72	
H	1	10	12	12	
O	16	80	96	96	
Total		162	228	180	
Massa molar (g/mol)		81	80	27	188
Fração (m/m)		0,5	0,35	0,15	Teor (m/m)
Carbono		0,22	0,18	0,06	0,47
Hidrogênio		0,03	0,02	0,01	0,06
Oxigênio		0,25	0,15	0,08	0,47

Além dos elementos que constituem a biomassa, a madeira também incorpora ar e água livre, que preenchem os túbulos de sua estrutura (item “e” da Figura 4). A quantidade de água que preenche estes vazios é variável, caracterizando o que chamamos de umidade da madeira. Na madeira viva, ou recém extraída (madeira verde), esses túbulos são completamente preenchidos com água. Após a extração, a madeira começa a perder sua umidade até o ponto de equilíbrio com a umidade do ambiente, havendo uma substituição parcial da água por ar (madeira com umidade em equilíbrio). A madeira pode ficar completamente ausente de água livre por ação de secagem artificial em estufa, sob temperaturas acima de 100°C, denominada nesse estudo como biomassa seca ou madeira seca.

Embora com pequena variação, cada componente da floresta também apresenta parcelas distintas de água livre. Troncos são elementos com menor teor de umidade se comparados a folhas e pequenas árvores (Araújo et al., 1999; Carvalho et al., 1995; Soares Neto et al., 2009), conforme pode ser verificado na Tabela 3.

Tabela 3 - Porcentagem de água da madeira verde por componente da floresta.

Componente	%	Referência
Geral	42	Soares Neto et al, 2009
Troncos DAP > 30cm	38,3	Carvalho Jr. et al, 1995
Troncos DAP < 30cm	39,3	
Galhos D > 10 cm	40	
Galhos D < 10 cm	41,7	
Árvores h<1m	55	
Árvores h>1m ou DAP<5cm	40,5	
Folhas	51,9	
Matéria morta entre 2 mm e 10 cm	62,5	Araújo et al, 1999
Cipós	40	
Troncos DAP > 10 cm	40,1	
Troncos caídos	44	
Galhos D > 10 cm	40,3	
D ≤ 5 cm	40,1	
Folhas	53	
Matéria morta entre 2 mm e 10 cm	64,3	
Cipós	49,6	

Para a madeira nativa da Amazônia, estima-se que toras verdes têm cerca de 40% de água livre e madeiras com umidade em equilíbrio com a umidade do ar, em torno de 15% (Araújo et al., 1999; Zenid, 2009). Esses valores podem ser adotados como uma média para a madeira Amazônica, porém pode haver variações. O Departamento de Agricultura e Florestas dos Estados Unidos (USDA, 2010) apresenta valores entre 40% e 160% para umidade para madeira verde de espécies características do hemisfério Norte, o que

demonstra a variabilidade e especificidade de cada tipo vegetal e espécie. Cerne e alburno podem apresentar diferenças de porosidade e umidade, já que a madeira perde umidade pela periferia do tronco.

De forma geral, a proporção dos principais elementos químicos na composição da madeira verde e da madeira com umidade em equilíbrio com o ar, seguem representados na Figura 5. Portanto, madeiras verdes seguem a composição da Figura 5a e madeiras com umidade em equilíbrio seguem a proporção da Figura 5b.

Figura 5 – Parcela dos elementos químicos carbono, hidrogênio e oxigênio na composição da biomassa e parcela de água livre nos poros da madeira verde (a) e da madeira com umidade em equilíbrio com o ar (b)

A composição molecular e a quantidade de vazios determinam a densidade da madeira. Essa característica varia para cada espécie de árvore. Na floresta Amazônica há uma grande diversidade de espécies de árvores e, conseqüentemente, diferentes densidade de madeira. Espécies tropicais geralmente têm densidade elevada, entre 0,5 g/cm³ e 1,2 g/cm³ (Fearnside, 1997), enquanto algumas espécies coníferas têm densidades baixas, entre 0,3 g/cm³ e 0,6 g/cm³ (USDA, 2010). A densidade da madeira varia entre espécies e também ao longo do tronco de uma mesma árvore. Os pontos de maior densidade encontram-se no cerne e na base das árvores, com redução da dureza da madeira em direção à casca e ao topo da árvore (Carvalho, et al., 1995; Nogueira et al., 2008; Nogueira; Nelson; Fearnside, 2005). Além da característica natural das espécies e das características do bioma, as condições de crescimento podem interferir na densidade da madeira. Segundo Nogueira et al (2007), a densidade apresenta relação com fatores como fertilidade do solo, disponibilidade de luz solar, presença de água, umidade na floresta, distúrbio naturais, entre outros fatores, que influenciam a densidade de diferentes árvores de uma mesma espécie.

3.1.3 Composição da vegetação

Em cada região da floresta Amazônica há uma tipologia vegetal, que compreende um conjunto de espécies, com diferentes números de árvores de cada espécie e de densidades de madeira. O mapa de tipologia vegetal da Amazônia encontra-se no Anexo A e ilustra a localização das diferentes composições florestais e sua extensão. Regiões de floresta ombrófila densa apresentam elevada densidade de madeira, bem como alta concentração de biomassa, devido às condições ambientais da região.

A Tabela 4 apresenta a densidade média da madeira a partir da classificação de tipologia vegetal. De acordo com o levantamento de Nogueira et al (2007), a densidade média da madeira em regiões de floresta Amazônica densa, estaria entre 0,63 g/cm³ e 0,69 g/cm³, e em regiões de floresta Amazônica aberta, de 0,53 g/cm³ a 0,60 g/cm³. Fearnside et al (1997) estimou a densidade média geral da madeira Amazônica em 0,69 g/cm³, ponderando a densidade média da espécie com a quantidade de árvore de cada espécie nos tipos vegetais e a extensão de cada tipologia.

Tabela 4 - Densidade média da madeira da floresta (g/cm³), em função do tipo de floresta e localização

		AC	AP	AM	MA	MT	PA	RO	RR	TO	Méd.*
Floresta Ombrófila Densa											
Aluvial	Da		0,63	0,64		0,61	0,63	0,55	0,64	0,63	0,63
Terras Baixas	Db	0,57	0,63	0,66	0,63		0,70	0,67	0,64		0,67
Montana	Dm		0,65	0,65			0,65	0,65			0,65
Submontana	Ds	0,69	0,69	0,70	0,69	0,58	0,70	0,60	0,67	0,69	0,69
Média											0,67
Floresta Ombrófila Aberta											
Aluvial	Aa	0,53		0,53			0,53	0,53			0,53
Terras Baixas	Ab	0,55		0,62				0,60			0,60
Submontana	As			0,59		0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Floresta Estacional											
Decidua Submontana	Cs				0,60	0,60	0,60			0,60	0,60
Semidecidual Aluvial	Fa					0,60					0,60
Semidecidual Submontana	Fs					0,60		0,60	0,60	0,60	0,60
Campinarana											
Arborizada	La			0,71					0,71		0,71
Florestada	Ld			0,60					0,60		0,60

* ponderação por área da tipologia vegetal

Fonte: extraído de Nogueira et al (2007)

A distribuição de biomassa reflete as interações ecológicas da floresta (Nogueira et al., 2008) e, assim como a densidade, o porte das árvores também varia regionalmente por razão de incidência solar, clima, espécies predominantes, idade das árvores, etc. (Feldpausch et al., 2004). Grande parte da biomassa da floresta Amazônica está contida em árvores de grande porte de espécies de alta densidade, que são o maior interesse da indústria madeireira. Estima-se que em florestas densas, com alta concentração de biomassa, árvores de grande porte possam acumular cerca de 25% da biomassa acima do solo, sendo que, em número de árvores, representem menos de 2% do total (Laurance et al., 2000). O porte de uma árvore pode ser determinado pela altura de seu tronco e copa, mas principalmente pelo diâmetro dos troncos das árvores, chamado de diâmetro à altura do peito (DAP). As árvores extraídas pelos madeireiros podem apresentar troncos com DAP a partir de 30 cm, sendo que Schulze et al (2008) classifica como tamanho subcomercial árvores com DAP > 20 cm.

Feldpausch et al (2006) estimou o diâmetro à altura do peito médio das árvores entre 57 cm e 67 cm ao inventariar 25.000 ha, em fazenda na cidade de Juruena (MT). As três árvores com maior porte que o autor relatou ter encontrado atingiram DAP de 197,4 cm, 255 cm e 296 cm. A porcentagem de biomassa presente em troncos de árvores com DAP > 30 cm foi estimada em dois levantamentos de distribuição da biomassa nos elementos vegetais em área de alta e de baixa concentração de biomassa na floresta Amazônica (Araújo et al., 1999; Carvalho et al., 1995). Foram inventariadas árvores de grande e médio porte, galhos, folhas, matéria orgânica morta e cipós e as estimativas de biomassa foram realizadas por medição direta do peso da biomassa verde e seca de parte da área florestal (0,2 ha).

A parcela de biomassa em troncos e demais elementos da floresta está demonstrada na Figura 6, para os dois cenários especificados.

* Folhas, pequenos galhos, cipós, matéria morta, etc.

Figura 6 - Distribuição da biomassa seca acima do solo, considerando o DAP das árvores, em regiões com alta e baixa concentração de biomassa

Fonte: Araújo et al (1999) e Carvalho et al (1995)

Considerando a biomassa seca acima do solo, para áreas com alta concentração de biomassa, como Manaus, os troncos com DAP acima de 30 cm podem conter até 50% da biomassa seca acima do solo (Carvalho et al., 1995). Em regiões de baixa concentração de biomassa, essa parcela seria de 28% (Araújo et al., 1999).

O número de árvores com DAP > 30 cm pode ser estimado em torno de 105 árvores por hectare em florestas densas (Nogueira; Nelson; Fearnside, 2006) e 74 árvores por hectare em florestas com baixa densidade (Araújo et al., 1999), conforme Figura 7. O número médio de árvores, considerando diversos tamanhos de diâmetro de tronco, foi estimado em 1.332 unidades em floresta de alta densidade (Nogueira et al., 2006) e, na região de baixa densidade, em 1.130 árvores (Araújo et al., 1999). É possível observar que a porcentagem de árvores com DAP > 30 cm é similar em ambas as áreas, entre 7% e 8%. Nogueira Nelson e Fearnside (2006) levantaram o número de árvores em seis diferentes pontos dentro de uma área de 4500 ha; Araújo et al (1999), inventariou 0,2 ha de floresta; extrapolações foram realizadas pelos autores para cálculo da quantidade total de árvores por hectare.

Figura 7 – Número de árvores, classificadas pelo diâmetro à altura do peito (DAP), em regiões com alta e baixa concentração de biomassa

Fonte: Araújo et al (1999) e Nogueira, Nelson e Fearnside (2006)

Árvores de DAP elevado são mais raras na floresta em comparação com árvores de menor porte. Na Floresta Nacional de Tapajós, estado do Pará (PA), Keller; Palace e Hurtt (2001) quantificaram em média 29 árvores por hectare com DAP entre 45 cm e 85 cm. Para árvores com DAP acima de 85 cm, foram encontradas de 3,3 árvores/ha. Segundo Feldpauch et al (2006), em região do estado do Mato Grosso (MT), cerca de 22 árvores por hectare apresentam DAP entre 45 cm e 85 cm, enquanto árvores com DAP acima de 85 cm estão presentes na média de 5 árvores/ha, podendo haver áreas com nenhuma e áreas com até 12 unidades.

Nem todas as árvores de DAP elevado são de espécies comerciais. Um número ainda mais reduzido é de interesse da indústria madeireira. Para ser extraída como tora, além do diâmetro que possibilite aproveitamento razoável do tronco, a árvore precisa ser de espécie com demanda no mercado consumidor, entre outros fatores que determinam o interesse do madeireiro.

Schulze et al (2008) compararam a presença de madeira comercial em sete diferentes áreas da floresta Amazônica, nos estados do Acre, Amazonas, Pará e Rondônia. Estimam que árvores de espécies muito valiosas podem estar presentes, em dimensão comercial, na quantidade de uma por hectare. Acrescentam que 20% das espécies comerciais podem ser encontradas na floresta em quantidade menor do que três árvores em cem hectares². De forma geral, a quantidade de árvores comerciais, em diferentes áreas da floresta Amazônica, pode ser admitida na faixa entre 3 e 10 árvores por hectare (Gerwing; Vidal, 2002; Verissimo et al., 1992), valores abordados de forma mais detalhada no item 4.1, que trata da extração de madeira comercial.

3.1.4 Concentração de biomassa

A concentração de biomassa é resultado de fatores como composição da vegetação, idade da floresta, porte das árvores e densidade das espécies. Ao longo do território ocupado pela floresta Amazônica, diferentes tipologias florestais podem ser identificadas, que refletem diretamente na quantidade de biomassa (Alves et al., 1997; Anderson et al., 2009; Fearnside et al., 2009; Feldpausch et al., 2006; Houghton et al., 2000; Nogueira et al., 2008; Pereira et al., 2010; Saatchi et al., 2007). A vegetação estabelece um sistema mútuo com a dinâmica natural do local: geomorfologia, hidrologia, características do solo, índices de precipitação, radiação, temperatura, interação da fauna e até mesmo ações humanas, entre outros fatores (Hoorn et al., 2010; Malhi et al., 2008; Nobre et al., 1991; Nogueira et al., 2007).

As florestas tropicais concentram elevada quantidade de biomassa devido à vasta vegetação e madeira de alta densidade. Em estimativas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC), as florestas tropicais figuram entre as mais elevadas concentrações de biomassa dentre os biomas mundiais, com quantidade de biomassa seca acima do solo entre 120 t/ha e 410 t/ha, para diferentes categorias de floresta tropical (Tabela 5).

² A relação de três árvores para cada 100 ha é o critério adotado pela legislação brasileira para definição de espécie nativa rara.

Tabela 5 - Biomassa seca acima do solo por hectare de florestas tropicais (t/ha).

Zona Ecológica	Mínimo	Médio	Máximo
Floresta tropical	120	300	400
Floresta tropical úmida descídua	210	220	280
Floresta tropical seca	200	210	410

Fonte: (IPCC, 2006)

Segundo dados do governo brasileiro, fornecidos na Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCT, 2010a), a variação da biomassa seca total na floresta Amazônica seria de 150 t/ha a 562 t/ha, em regiões de floresta ombrófila aberta e densa, respectivamente. Os valores foram calculados com base em dados de carbono na floresta (74 tC/ha a 275 tC/ha). Uma ilustração da concentração de biomassa viva acima do solo ao longo da floresta Amazônica foi realizada por Saatchi et al (2007), por meio de imagens de satélite e levantamento de biomassa em 25 diferentes localidades da floresta, representada na Figura 8.

Figura 8 - Distribuição da quantidade de biomassa viva acima do solo (t/ha), estimada por inventário de biomassa e imagens de satélite

Fonte: extraído de Saatchi et al (2007)

Pode-se identificar que áreas com elevada quantidade de biomassa viva acima do solo, superior a 300 t/ha, estão localizadas nas áreas centrais da floresta. De forma geral, essas áreas concentram alta taxa de diversidade de espécies de árvores, entre 150 e 300 espécies por hectare, e são caracterizadas por alto índice pluviométrico e presença de

curtos fluviais. Regiões com vegetação mais aberta, com biomassa viva acima do solo entre 200 t/ha e 300 t/ha, possuem árvores de médio porte e espécies de menor densidade. Áreas com pouca concentração de biomassa viva acima do solo, inferior a 150 t/ha, possuem árvores esparsas e localizam-se na borda da floresta, fazendo a transição para outros biomas, como áreas de savana (Nogueira et al., 2008; Saatchi et al., 2007).

Áreas com concentração média de biomassa viva acima do solo, entre 200 t/ha e 400 t/ha, são equivalentes a cerca de 60% da área da floresta Amazônica, tanto em áreas de floresta classificadas como de várzea e de terra firme. A Figura 9 ilustra a parcela de área por quantidade de biomassa.

Figura 9 - Porcentagem da área, estimada por faixa de concentração de biomassa, em duas tipologias vegetais da floresta Amazônica: várzea (a) e terra firme (b)

Fonte: Saatchi et al (2007)

Além da vegetação viva acima do solo, a matéria morta sobre solo e a matéria abaixo do solo, na forma de raízes de árvores, completam a biomassa da floresta. A biomassa viva acima do solo representa valores próximos de 85% da biomassa total acima do solo, composta por biomassa viva e morta (Araújo et al., 1999; Gerwing; Vidal, 2002). Já a relação entre biomassa abaixo do solo e biomassa acima do solo pode ser estimada entre 20% a 37% (Cederberg et al., 2011; Fearnside et al., 2001; Houghton et al., 2000; IPCC, 2006; Saatchi et al., 2007). Estabelecendo a relação entre essas parcelas sobre a biomassa acima do solo, estima-se que a biomassa total da floresta seja distribuída, em média, pela seguinte proporção: 68% como biomassa viva acima do solo, 10% como biomassa morta acima do solo e 22% como biomassa abaixo do solo. Esses valores são aproximações, pois essa proporção relaciona-se com a composição das espécies vegetais de cada região, entre outros fatores.

A literatura que trata do carbono na floresta sob o ponto de vista de gases de efeito estufa não aborda a quantidade de carbono abaixo do solo como fonte de emissão (Huang; Asner, 2010), podendo o carbono ser considerado como inserido no ciclo dos elementos da floresta (Fearnside, 1997).

3.2 Caracterização da exploração madeireira na floresta Amazônica

A quantidade de madeira nativa extraída anualmente da floresta Amazônica não é um dado consolidado. Segundo o IBGE (2009), no ano de 2009, a extração de toras de estados da Amazônia soma $13,1 \times 10^6 \text{ m}^3$. A partir de dados de Pereira et al (2010), obtidos com processadores de madeira da região, estima-se que $14,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ de madeira em tora foram extraídos em 2009, o que significou um decréscimo de 58% no consumo de madeira serrada comparado a 2004, que foi de $24,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Nepstad et al (1999) levantaram dados dos principais centros madeireiros³ e estimaram que em torno de $27,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ de toras teriam sido processados entre os anos de 1996 e 1997. Para os anos de 2000, 2001 e 2002, Asner et al (2005) estima que a retirada de madeira em tora tenha sido de $49,8 \times 10^6 \text{ m}^3$, $29,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $26,6 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente. A Figura 10 apresenta algumas estimativas encontradas em literatura sobre a quantidade, em volume, de madeira Amazônica consumida nos anos explicitados.

Figura 10 - Volume de madeira Amazônica consumido, em milhões de metros cúbicos, para os anos de 1997, 1998, 2000, 2001, 2002, 2004 e 2009, segundo as referências.

Asner et al (2005) estimou além do volume total consumido nos anos de 2000 a 2002, a área total que teria sido explorada, conforme identificado em imagens de satélite. Esses dados permitiram estimar a média anual de extração da madeira Amazônica para os anos 2000, 2001 e 2002 como sendo $26,6 \text{ m}^3/\text{ha}$, $21,7 \text{ m}^3/\text{ha}$ e $21,4 \text{ m}^3/\text{ha}$, respectivamente. Esses valores representam uma referência média aproximada da quantidade de madeira extraída por área de floresta.

Os autores não estimam a parcela de madeira que tem origem em extração ilegal ou de florestas manejadas. Segundo Lentini (2010), 38% da madeira consumida em 2004 seria

³ Classificaram a amostra como responsáveis por mais de 90% da produção nacional.

originária de florestas manejadas, sendo apenas 3% com certificação florestal. Outras referências que fornecessem essa informação não foram identificadas. Pereira et al (2010) estimou em 36% a parcela de ilegalidade para o volume consumido em 2009. O componente de ilegalidade do setor certamente é um fator que dificulta a definição precisa da quantidade de madeira consumida anualmente.

3.2.1 Fatores de interesse da indústria madeireira

Alguns fatores contribuem de forma decisiva para a atividade madeireira na floresta Amazônica: presença de toras comerciais em grande quantidade e acessibilidade. Outro fator que pode ser citado é a fiscalização da exploração da floresta, que inibiria a atividade madeireira ilegal se intensificada. Entretanto, por falta de informações que permitam fazer a associação entre locais com alta incidência de fiscalização, presença dos madeireiros e intensidade de extração, esse fator não será devidamente incorporado.

Usualmente, a atividade de extração convencional de madeira move-se de acordo com a disponibilidade de espécies em dimensões comerciais, avançando para áreas não exploradas da floresta depois de esgotada a madeira de alto ou médio valor comercial no local de ação (Gerwing; Vidal, 2002; Pinedo-Vasquez et al., 2001; Uhl et al., 1997). Pereira et al (2010) classifica a região florestal por época de exploração: fronteiras antigas, acima de 30 anos; intermediárias, entre 10 e 30 anos; e novas fronteiras, menos de 10 anos, demonstrando a prática de avanço para novas áreas ainda não exploradas.

A acessibilidade da floresta está relacionada com a distância entre a área explorada e vias existentes, sendo visadas florestas próximas a vias rodoviárias ou fluviais, por permitirem maior potencial de lucro na exploração em razão do menor custo de transporte (Asner et al., 2006; Barros; Uhl, 1995; Bauch; Amacher; Merry, 2007; Gerwing; Vidal, 2002; Verissimo et al., 1992). De acordo com Asner et al (2006), a extração convencional ocorre predominantemente em áreas com distâncias de até 25 km entre floresta e rodovias existentes, sendo possível estimar que 80% da atividade madeireira se concentraria na faixa de até 5 km das rodovias. Outro fator é a distância entre floresta e serraria. Bauch et al (2007) consultou 527 serrarias de diferentes estados da Amazônia, e levantou que seriam percorridos cerca de 90km (± 59 km)⁴, sendo a parcela do custo de transporte sobre o custo total de produção da madeira serrada em torno de 14% (± 8 %).

⁴ Cerca de 13,5 km (± 28 km) seriam vias pavimentadas.

3.2.2 Espécies e densidade da madeira comercial

Apesar da presença de outras atividades econômicas, como comercialização de produtos florestais não-madeireiros (frutas, sementes, fibras e óleos) e carvão, as toras de espécies de alta densidade permanecem como a principal fonte de renda obtida da floresta.

É vasta a diversidade de espécies de árvores na floresta Amazônica. Entretanto, apenas algumas são comercialmente atraentes, prioritariamente as de alta densidade, presentes em poucas unidades por hectare. A definição de espécies e dimensões comerciais varia de acordo com fatores como: disponibilidade da espécie, preço da madeira e demanda de mercado, influenciados por aspectos de localização da floresta (Uhl et al., 1997).

No início dos anos 90, Uhl et al (1991) descrevem o número de espécies exploradas em novas fronteiras como menos de 20. Em região com indústria madeireira em funcionamento desde a década de 1970, Veríssimo et al (1992) citam 100 espécies comerciais. Uma hipótese para a diferença no número de espécies atraentes comercialmente é que florestas exploradas por longos períodos, sem qualquer controle da quantidade de árvores extraídas, atingem o empobrecimento de madeira comercial. Com o constante esgotamento da madeira valiosa, predominam dois modelos de exploração não excludentes: migração para áreas ainda não exploradas, as novas fronteiras, e ampliação do conjunto de árvores consideradas comerciais, seja pela maior gama de espécie ou pelo interesse em árvores de menores dimensões. Portanto, ao mesmo tempo em que a fronteira da degradação avança, áreas com primeira retirada são novamente exploradas, alterando o padrão de madeira comercial na região (Cochrane, 2003; Gerwing; Vidal, 2002; Pinedo-Vasquez et al., 2001; Uhl et al., 1997).

Algumas das principais espécies exploradas são: maçaranduba (*Manilkara huberi*), jatobá (*Hymenaea courbaril*), piquiá (*Caryocar villosum*) e copaíba (*Copaifera reticulata*) (Uhl et al., 1991; Veríssimo et al., 1992); aroeira (*Astronium gracile*), angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*), freijó (*Cordia goeldiana*) (Uhl et al., 1991). Segundo Lentini (2010), um conjunto maior de espécies comercializadas na região Amazônica seriam: maçaranduba (*Manilkara huberi*), jatobá (*Hymenaea courbaril*), aroeira ou muiracatiara-rajada (*Astronium lecointei*), angelim-saia (*Parkia pendula*), tauari (*Couratari oblongifolia*), ipê-amarelo (*Tabebuia serratifolia*), freijó (*Cordia goeldiana*), angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*), angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), tatajuba (*Bagassa guianensis*), piquiá (*Caryocar villosum*), amesclão (*Trattinnickia cf. burseraefolia*), cerejeira (*Amburana acreana*), cedrorama (*Cedrelinga catenaeformis*), entre outras (Schulze et al., 2008; Sist; Ferreira, 2007). As principais madeiras com destino ao estado de São Paulo são cupiúba (*Goupia glabra*), cedrinho (*Erismia sp.*), garapeira (*Apuleia sp.*) e cambará (*Qualea sp.*) (Lentini, 2010). Algumas espécies citadas estão ilustradas na Figura 11.

Amesclão

Angelim

Angelim pedra

Angelim saia

Aroeira

Caixeta

Cedrinho

Cumaru

Cupiuba

Freijó

Goiabão

Ipê

Jatobá

Louro

Pequiá

Quaruba

Sucupira

Sumaúma

Tatajuba

Tauari

Figura 11 - Imagem das principais espécies comerciais de árvores da Amazônia

Fonte: Ibama (2010)

Em questionário respondido por empresas madeireiras que comercializam madeira serrada Amazônica, as principais espécies atualmente disponíveis no mercado, por nome popular⁵, são: angelim, breu, carnaúba, cedrinho, cedro, maçaranduba, cumaru, cupiúba, freijó, grápia, ipê, itaúba, piquiá, sucupira, tatajuba, entre outras (em fase de elaboração)⁶.

De acordo com dados das madeireiras e literatura recente, as espécies comumente exploradas estão listadas na Tabela 6. Os nomes foram identificados por meio do Banco de Dados de Madeiras Brasileiras, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2010), no qual foram também obtidos os valores de densidade, altura e diâmetro à altura do peito⁷, além do nome científico das espécies. Dentre as espécies listadas na Tabela 6, as madeiras comerciais possuem densidade aparente, classificação de densidade popularmente empregada no mercado de madeiras, entre 0,46 g/cm³ e 1,07 g/cm³; valores para densidade verde e densidade básica, ou seca, são conjuntamente apresentados.

A densidade média calculada para esse conjunto de espécies é 0,63 g/cm³. No entanto é necessário ponderar pelo real consumo de madeira de diferentes espécies no mercado. Como não há informações disponíveis sobre a quantidade de madeira de cada espécie Amazônica comercializada anualmente, que possibilitariam calcular a densidade média da madeira no mercado, a estimativa foi arbitrada seguindo dados de literatura. Fearnside (1997) estimou a densidade média da madeira Amazônica ponderada pela quantidade de espécies e área de floresta em 0,69 g/cm³. Autores importantes no tema como Cederberg et al (2011), Gerwing e Vidal (2002) e Asner et al (2005) adotaram a referência ou valor semelhante. Admitindo a densidade média da madeira Amazônica seca como 0,69 g/cm³, a densidade média para madeira verde e para madeira com umidade em equilíbrio seria de 0,81 g/cm³, e 1,15 g/cm³, respectivamente. Esses três valores foram adotados na conversão entre massa e volume da madeira comercial Amazônica.

⁵ As empresas madeireiras usam os nomes populares das espécies, muitas vezes típicos da região, o que dificulta a identificação precisa das principais espécies comerciais.

⁶ Energia incorporada e CO₂ no processo produtivo de casas de madeira, tese de autoria de Katia Punhagui, a ser defendida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

⁷ As dimensões de altura e diâmetro à altura do peito comerciais apresentadas pelo IBAMA podem não refletir as dimensões comerciais de toras extraídas em exploração seletiva convencional da madeira. De forma geral, nesse tipo de exploração, DAP de interesse comercial pode ser estimado como acima de 30 cm, enquanto a Instrução Normativa 05 (IBAMA, 2006a) e algumas legislações estaduais (SEMA-MT, 2006) definem para corte em planos de manejo florestal sustentável da floresta Amazônica DAP ≥ 50 cm, para qualquer espécie, informação provavelmente acatada no catálogo do IBAMA para definição dos valores apresentados.

Tabela 6 - Lista de espécies das principais madeiras comerciais Amazônicas, densidade verde, aparente e seca e dimensões comerciais de toras

Nome popular	Nome científico	Densidade (g/cm ³) ^a			Altura (m) ^b	DAP (m) ^b
		Verde	Aparente	Básica		
Cumaru	<i>Dipteryx odorata</i>	1,28		0,91	9	50
Maçaranduba	<i>Manilkara huberi</i>	1,27	1,07	0,87	13	61
Ipê-amarelo	<i>Tabebuia serratifolia</i>			0,89		
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	1,24		0,85	13	53
Sucupira	<i>Bowdichia nitida</i>	1,22		0,85	9	53
Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>	1,26		0,83	11	56
Maçaranduba	<i>Manilkara amazonica</i>	1,26		0,83	11	54
Breu	<i>Protium sp.</i>	1,12		0,76	2	39
Goiabão	<i>Pouteria pachycarpa</i>	1,17		0,74	8	47
Grapia	<i>Apuleia leiocarpa</i>	1,25	0,88	0,75	11	62
Aroeira	<i>Astronium lecointei</i>			0,75		
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	1,17	0,88	0,71	11	52
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>			0,70		
Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i>	1,14		0,70	7	47
Peroba	<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	1,11	0,78	0,65	11	66
Piquiá	<i>Caryocar villosum</i>	1,17	0,78	0,63	10	61
Louro	<i>Ocotea sp.</i>	1,04		0,63	10	54
Angelim-pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	1,19	0,71	0,59	10	65
Guariúba	<i>Clarisia racemosa</i>	1,16		0,60	13	66
Mandioqueira	<i>Qualea dinizii</i>	1,14	0,69	0,54	11	64
Amesclão	<i>Trattinnickia burseraefolia</i> cf.	1,10		0,50	9	39
Quaruba	<i>Vochysia maxima</i>	1,11		0,49	12	61
Angelim-saia	<i>Parkia pendula</i>	1,13		0,50	10	58
Tauari	<i>Couratari oblongifolia</i>	1,13		0,50	9	58
Cedrinho	<i>Erisma uncinatum</i>	1,11		0,46	10	61
Cerejeira	<i>Amburana acreana</i>	1,13	0,57	0,47	8	57
Cedrorama	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	1,10	0,56	0,45	14	86
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	1,06	0,47	0,39	11	63
Canela	<i>Nectandra cuspidata</i>	0,82	0,46	0,40	9	50
Caixeta	<i>Simarouba amara</i>	1,12		0,37	10	66
Freijó	<i>Cordia goeldiana</i>	0,92		0,48	27	61
Parapará	<i>Jacaranda copaia</i>	0,84		0,31	13	50
	Média	1,13	0,71	0,63	10	58

Fonte: Ibama (2010)

(a) Densidade verde: massa saturada de água / volume saturada de água; Densidade aparente: massa / volume, ambos com umidade em equilíbrio com umidade do ar; Densidade básica: massa seca em estufa / volume saturada de água (Calil Jr.; Lah; Brazolin, 2007; Simpson, 1993)

(b) Dimensões comerciais de cada espécie, segundo definição do Ibama (2010).

3.2.3 Biomassa em áreas atualmente exploradas

Na floresta Amazônica há uma ampla variabilidade na quantidade de biomassa seca acima do solo em cada localidade. Para definir a faixa de concentração de biomassa de áreas características da ação de madeireiros, foram assumidas algumas premissas. Admitiu-se que áreas com alta concentração de biomassa, atualmente de difícil acesso pela ausência de estradas e rodovias, podem ser consideradas como futuras fronteiras de exploração, e que florestas com pouca concentração de biomassa não se caracterizam como áreas prioritárias da extração convencional, pois seriam compostas por espécies de baixa densidade e árvores de pequeno porte. Na Tabela 7 são apresentados os valores de concentração de biomassa encontrados em literatura e adotados no fluxo do material.

Tabela 7 - Biomassa seca acima do solo (t/ha) em diferentes regiões da floresta Amazônica, segundo as referências.

Local	Estado	Biomassa seca (t/ha)	Referência
Manaus	AM	425	Carvalho Jr. et al (1995)
Caxiuanã	PA	408	Anderson et al (2009)
Florestas na América do Sul	geral	397*	FAO (2005)
Manaus (região de pasto)	AM	369	Fearnside et al (2001)
Paragominas	PA	364	Gerwing (2000)
Floresta Amazônica	geral	360*	RadamBrasil apud Houghton et al (2000)
Manaus	AM	346	Anderson et al (2009)
Floresta Amazônica densa	geral	308*	Fearnside et al (1993) apud Soares Neto et al (2009)
Alta Floresta	MT	300*	Soares Neto et al (2009)
Alta Floresta	MT	282*	Carvalho Jr et al (2001)
Floresta Amazônica densa	geral	273	Saatchi et al (2007)
Geral no estado	MT	269	Fearnside et al (2009)
Altamira (Rod. Transamazônica)	PA	263	Fearnside et al (1999)
Geral no estado	RO	259	Fearnside et al (2009)
Floresta Amazônica de várzea	geral	248	Saatchi et al (2007)
Floresta Amazônica	geral	225*	RadamBrasil apud Houghton et al (2000)
Tomé Açu	PA	214	Araújo et al (1999)
Floresta Amazônica aberta	geral	200	Saatchi et al (2007)

* Valores fornecidos pelos autores em unidade de massa de carbono e convertido com uso do teor 49% de carbono na biomassa seca.

Adotou-se a faixa de variação entre 200 t/ha (Saatchi et al., 2007) e 425 t/ha (Carvalho et al., 1995), valor mediano de 300 t/ha (Soares Neto et al., 2009), para áreas com potencial

para atividade de extração convencional da madeira nativa. A Figura 12 representa a faixa de valores de alta, mediana e baixa densidade vegetal na floresta Amazônica.

Figura 12 - Quantidades mínima, mediana e máxima de biomassa seca acima do solo, por hectare, adotadas para a floresta Amazônica

Fonte: Anderson et al., 2009; Araújo et al., 1999; Carvalho et al., 1995; Carvalho Jr. et al., 2001; FAO, 2005; Fearnside et al., 1999; Fearnside et al., 2001; Fearnside et al., 2009; Gerwing; Vidal, 2000; Houghton et al., 2000; Saatchi et al., 2007; Soares Neto et al., 2009)

3.3 Estoque de carbono na floresta Amazônica

Carbono é um dos principais elementos de composição da biomassa, conforme abordado no item 3.1.2. A formação da vegetação do bioma Amazônico é datada de milhões de anos (Hoorn et al., 2010) e, por esta razão, a biomassa da floresta pode ser considerada um estoque de carbono. A idade média das árvores é estimada em 300 anos; sendo a idade média do elemento carbono, incorporado na biomassa, próxima de 100 anos devido ao ciclo biológico, em que há trocas periódicas dos elementos químicos (Vieira et al., 2005). Por isso, as florestas são encaradas como grandes estoques de carbono terrestre de longo prazo.

Um grande fator de incerteza nessa discussão, além da dificuldade de se garantir a manutenção de florestas tropicais em longos prazos, é a estimativa de quantidade de carbono incorporado na floresta (Houghton, 2003), o que é determinado diretamente pela estimativa de quantidade de biomassa. Alguns valores citados em literatura para a totalidade do carbono fixado no bioma estão listados na Tabela 8. As amplas faixas de variação demonstram as incertezas envolvidas na quantificação de carbono na Amazônia e na extrapolação dos valores.

Tabela 8 – Estimativas da faixa de variação de carbono armazenado na massa vegetal do bioma Amazônico.

Floresta Amazônica	Faixa de variação (PgC)	Biomassa	Referências
Brasileira	39 a 93	Total	Houghton et al (2001)
Total	86 ± 20%	Total	Saatchi et al (2007)
5,76x10 ⁶ km ²	93 ± 23	Viva acima do solo	Malhi et al (2006)

Além da dificuldade de se estimar a quantidade de biomassa no ambiente florestal, há diferentes frações de carbono em cada componente da floresta, conforme apresentado na Tabela 9. A indicação padrão do IPCC (2006) para teor de carbono na biomassa seca acima do solo em floresta tropical é de 47%, semelhante ao resultado obtido por cálculo estequiométrico no item 3.1.2; para biomassa seca de troncos ou produtos de madeira, o teor seria de 49%.

Tabela 9 - Teor de carbono na biomassa seca por componente da floresta.

Componente	%	Referência
Default	47	IPCC, 2006
Tropical média	44 a 49	
Tropical DAP > 10cm	49	
Tropical DAP < 10cm	46	
Base das árvores	48,5	Carvalho JR. et al, 1995
Topo da árvore	48,2	
Troncos e galhos	48,4	
Árvores h<1m	46,5	
Árvores h>1m ou DAP<5cm	46,8	
Folhas	50,4	
Matéria morta	39,3	Soares Neto et al, 2009
Cipós	48,4	
Geral	48	
DAP > 10cm	47,9	Righi et al, 2009
5 < DAP < 10 cm	48,2	
DAP < 5 cm	48,4	
DAP > 10cm	49,3	Fearnside et al, 2001
DAP < 10cm	48,4	
Cipós	49,4	
Matéria morta	51,1	

DAP – diâmetro na altura do peito (1,3 m do chão); h - altura

Grande parte do carbono está concentrado em troncos, já que este representa elevada parcela da biomassa florestal. Se cruzados os dados de distribuição da biomassa na vegetação (Figura 6) com a parcela de carbono de cada elemento (Tabela 9), a média de teor de carbono na biomassa seca resulta em 49% (Tabela 10), consistente com o dado do IPCC (2006) e, portanto, valor empregado para a parcela de carbono na biomassa seca da Amazônia.

Tabela 10 - Teor médio de carbono na biomassa seca para proporção de componentes da floresta de alta e baixa concentração de biomassa.

	Alta concentração			Baixa concentração		
	Participação	teor C	tC/t	Participação	teor C	tC/t
Troncos DAP > 30 cm	50%	0,49	0,24	28%	0,49	0,14
Troncos DAP < 30 cm	10%	0,47	0,05	20%	0,47	0,09
Galhos	30%	0,48	0,14	29%	0,48	0,14
Outros*	11%	0,50	0,05	23%	0,50	0,11
Total	100%		0,49	100%		0,49

Considerando a biomassa seca acima do solo da floresta Amazônica entre 200 t/ha e 425 t/ha e o teor de 49% de carbono na biomassa seca, a massa de carbono por hectare pode ser estimada entre 98 tC/ha e 208 tC/ha. Admitindo 40% de umidade incorporada na biomassa da floresta, a massa total por hectare pode variar entre 333 t/ha e 708 t/ha. A **Figura 13** ilustra a variação na composição da floresta Amazônica.

Figura 13 - Elementos constituintes da biomassa verde, em toneladas por hectare da floresta Amazônica

3.4 Conclusão

A floresta Amazônica, além de integrar ciclos naturais de escala global e abrigar uma biodiversidade única, é um relevante estoque de carbono terrestre. Devido à sua vasta extensão territorial, idade de formação e alta densidade vegetal, a redução de sua biomassa reflete em elevada taxa de emissão de CO₂ em processos de degradação e desmatamento. A faixa de concentração de biomassa seca acima do solo pode ser admitida entre 200 t/ha e 425 t/ha, o que corresponde ao estoque de 98 tC/ha a 208 tC/ha, considerando que 49% da biomassa seca é composta por carbono. Precisar os valores de biomassa e carbono por hectare depende das características de composição da vegetação. A elevada quantidade de carbono acumulado na floresta, em grande parte, tem relação com a alta densidade da madeira, em média 0,81 g/cm³, para densidade aparente. Os troncos de árvores de grande porte acumulam a maior parte da biomassa da floresta, de 28% a 50%, sendo o tronco de espécies de elevado valor comercial, estipulado em função de sua alta densidade, o foco de interesse de madeireiros.

4 Impactos e efeitos da exploração convencional de madeira na floresta Amazônica

Nesse capítulo são descritas as atividades envolvidas na exploração da floresta Amazônica, relacionando os fatores naturais e humanos que influenciam a intensidade de impacto da exploração convencional. São apresentadas referências numéricas sobre o impacto da atividade madeireira e definidas as faixas de variação da quantidade de biomassa extraída em toras e a destruição provocada na biomassa sem valor comercial. São estabelecidos cenários típicos da exploração convencional, que agrupam dados de impacto na floresta e relação entre biomassa destruída e biomassa extraída. A dinâmica da floresta Amazônica após a intervenção pelos madeireiros, o que envolve tanto o aumento da degradação por suscetibilidade como o crescimento posterior da vegetação, é abordada, porém não incorporada na quantificação. Ao final do capítulo, o fluxo do material para essa etapa sintetiza o impacto na floresta Amazônica.

4.1 Procedimento da extração convencional da madeira Amazônica

Como apenas parte da madeira existente na floresta tem potencial comercial, a extração da madeira Amazônica é seletiva. Matricardi et al (2010) define a extração seletiva, ou corte seletivo, como “uma forma de extração madeireira de um grupo de árvores de espécies selecionadas em que apenas as árvores mais valiosas são removidas da floresta”⁸. Conforme visto no capítulo anterior, as árvores que fornecem madeira com valor comercial situam-se dispersas na floresta, em baixo número por hectare. Para obtê-las, no modelo seletivo, outras árvores são destruídas ou danificadas.

A Figura 14 ilustra o padrão de extração seletiva da madeira, na qual é possível identificar estradas, trilhas e clareiras criadas no processo de extração das toras. A destruição de parte da floresta para retirada de madeira pode ocorrer em diferentes intensidades, em grande medida determinada pelos procedimentos realizados pelos madeireiros (Barreto et al., 2005; Cochrane, 2003; INPE, 2008).

Inicialmente, as árvores a serem derrubadas são selecionadas pelo madeireiro (Asner et al., 2002). Os trabalhos de extração geralmente utilizam equipamentos como motosserra, trator sobre esteiras (bulldozer) e trator sobre rodas (skidder) (FFT, 2005; Johns; Barreto; Uhl, 1996). Os tratores são utilizados para abertura de estradas, de trilhas de arraste e de áreas de estoque das toras. As árvores a serem extraídas são cortadas em sua base com uso de motosserra e a copa é removida e abandonada na floresta. Posteriormente, as toras são

⁸ “Selective logging is a form of timber extraction of a group of trees from selected species where only the most valuable tree species are removed from the forest”. (Matricardi *et al.*, 2010)

presas ao trator e arrastadas até uma das áreas de estoque de toras, a partir de onde são transportadas para a serraria por caminhões de carga.

Figura 14 - Padrão de degradação por extração seletiva da madeira

Fonte: Google Earth (2011) – Latitude: 3° 36.177' S, Longitude: 48° 25.24' O

A extração seletiva, convencional ou manejada, envolve diversas atividades: criação de trilhas para acesso às árvores (Figura 15 e Figura 16), movimentação de equipamentos (Figura 17), derrubada das árvores comerciais (Figura 18a), deslocamento das toras até a estrada principal ou secundária existente (Figura 18b), abertura de clareiras para áreas de estocagem das toras (Figura 19 e Figura 20) (Asner et al., 2002; FFT, 2005; Johns; Barreto; Uhl, 1996; Matricardi et al., 2010; Schulze; Zweede, 2006; Uhl et al., 1991; Uhl et al., 1997).

Figura 15 - Caminhos e trilhas abertos na floresta sem planejamento

Foto: INPE (2011)

Figura 16 - Trilha de acesso às árvores comerciais em floresta manejada

Foto: Camila Numazawa/Sueo Numazawa

Figura 17 - Movimentação de equipamento

Foto: extraída de vídeo Futuro da Floresta (FFT, 2005)

(a)

(b)

Figura 18 – Derrubada de árvore (a) e arraste de tora (b)

Foto: extraída de vídeo Futuro da Floresta (FFT, 2005)

Figura 19 - Área de estocagem de toras na extração manejada

Foto: extraídas de vídeo Futuro da Floresta (FFT, 2005)

(a)

(b)

Figura 20 - Área de estocagem de toras na extração convencional

Foto: extraída de vídeo Futuro da Floresta (FFT, 2005) (a); Leonardo Freitas (b)

São conjuntamente apresentadas imagens da extração convencional e manejada da floresta devido à dificuldade em se obter ilustrações unicamente da exploração convencional. Embora o impacto dos dois modelos sobre a área seja diverso, as ações na floresta são similares.

As atividades realizadas no modelo de extração convencional de toras são caracterizadas pela ausência de planejamento sistemático na escolha e localização das árvores a serem derrubadas, pela falta de definição prévia e racional dos trajetos entre as árvores e pelo uso de técnicas de corte com alto grau de destruição da vegetação (Houghton et al., 2000; Saatchi et al., 2007). Nepstad et al (1999) afirma que a ação dos madeireiros “perfura” a floresta, matando ou danificando muitas árvores, o que pode representar a destruição de 10% a 40% da biomassa viva, realidade expressa na Figura 21.

Figura 21 - Clareiras de degradação

Foto: INPE (2011)

Durante esse processo, a floresta Amazônica é transformada em um ecossistema com biomassa parcialmente destruída e repleta de clareiras. A escala de destruição depende da forma na qual as atividades e os procedimentos são executados, mas também da localização relativa das espécies de interesse e até do relevo da área. Considerou-se como exploração da floresta não apenas a quantidade de madeira extraída, como também a quantidade de madeira destruída nas atividades de extração, esta classificada como resíduos da floresta.

4.1.1 Fatores diretos de intensidade de exploração no modelo convencional

Distintas intensidades de exploração (extração + resíduos) podem ser produzidas pelos madeireiros em função de fatores naturais e fatores humanos. Os fatores naturais são determinados pelas características do ambiente florestal, como relevo, tipologia e composição vegetal, densidade das espécies, conservação e idade da floresta. Os fatores humanos refletem a quantidade de madeira retirada e os procedimentos para a extração, sendo determinados por um conjunto de fatores como: a definição pelos madeireiros das espécies a serem extraídas, o limite de diâmetro e altura das árvores de interesse comercial, planejamento das trilhas, equipamentos empregados, entre outros quesitos. Os procedimentos realizados pelos madeireiros geralmente seguem a facilidade na execução das tarefas, descomprometidos com a destruição causada pela atividade. Todos esses fatores constituem informações de entrada para determinar a intensidade da exploração. A Figura 22 apresenta um esquema dos fatores de influência, destacando sua interação.

Figura 22 – Alguns fatores de influência na intensidade de exploração madeireira na floresta Amazônica.

O primeiro fator humano é a definição pelo madeireiro das características das árvores a serem extraídas, como espécies e dimensões comerciais. Essa decisão é diretamente baseada em fatores econômicos, atrelados à localização e acessibilidade da floresta, tipo de transporte empregado entre floresta e serraria, valor de mercado das espécies e demanda do mercado por madeira nativa. Ao acessar a floresta, o madeireiro identifica as árvores de interesse, determinando nesse momento a quantidade de madeira que será extraída, ou seja, a intensidade da extração a ser realizada. Estima-se que em média de três a nove árvores por hectare são extraídas no modelo convencional. As árvores comerciais podem estar posicionadas na floresta perto umas das outras ou dispostas de forma dispersa; assim como sua localização pode ser próxima de estradas e rodovias existentes. Asner et al (2005) afirma que a extração seletiva das árvores causa redução difusa do dossel da floresta exatamente pela dispersão das árvores comerciais. A variação do número de árvores e uma hipótese de sua localização relativa estão ilustradas na Figura 23.

Figura 23 – Exemplos de número de árvores por hectare extraídas em exploração convencional: cenário de baixa extração (a) e cenário de elevada extração (b)

Para acesso às árvores comerciais, trilhas são abertas na floresta a partir de uma estrada aberta anteriormente. A criação desses percursos, muitas vezes sem qualquer planejamento prévio, gera a destruição da biomassa sem valor, naquele momento, para o madeireiro. O grau de impacto dos caminhos abertos na floresta dependerá da localização das árvores e das técnicas e equipamentos utilizados. Algumas vezes, a tora pode ser retirada da floresta em caminhos diferentes dos usados para acessar a árvore, aumentando a degradação da vegetação para criação de nova trilha (FFT, 2005). Pode se associar a maior parte dos resíduos gerados na extração das árvores às trilhas de acesso às árvores comerciais (Johns; Barreto; Uhl, 1996; Uhl et al., 1991). Johns; Barreto e Uhl (1996) estimam a largura de trilhas abertas pelos madeireiros em 3,7 m, afetando a floresta em adicionais 4 m para cada lado da trilha. O comprimento das trilhas é estimado entre 40 m (Verissimo et al., 1992) e 53 m por árvore extraída (Uhl et al., 1991). Para Johns; Barreto e Uhl (1996) a abertura das trilhas afeta cerca de 10% da área florestal. Hipóteses de localização das árvores comerciais e rota de acesso para dois cenários de exploração estão ilustrados na Figura 24.

Figura 24 – Exemplos de trilhas para acesso às árvores comerciais para cenário de baixa extração (a) e cenário de elevada extração (b)

O corte e derrubada da árvore é outro relevante fator de destruição da biomassa da floresta. Tanto os procedimentos de movimentação dos equipamentos realizados pelos madeireiros, como o porte da árvore, determinam a destruição em seu entorno. Na queda das árvores, algumas vezes essas são derrubadas sobre outras árvores de menor porte, danificando ou matando essa vegetação, com objetivo de garantir a integridade do tronco comercial, para que não se quebrem no impacto com o solo (informação verbal)⁹. Estima-se que a biomassa em um raio de 12 m ao redor das árvores extraídas seja intensamente destruída na exploração convencional¹⁰ (Schulze et al., 2006). A **Figura 25** ilustra duas alternativas desse impacto na área da floresta.

Após a extração, as toras são encaminhadas para uma área de estocagem. A criação dessas áreas implica em intensa destruição, com remoção total da vegetação, chamada de corte raso (FFT, 2005). Em áreas de manejo florestal, uma área de estoque pode ser estimada em 25 m x 20 m (FFT, 2005), que atende a cerca de quatro hectares, portanto 125 m²/ha. Não foram encontradas referências para a dimensão dos estoques em exploração convencional, sendo provável que não exista qualquer padrão. A Figura 26 representa o possível efeito da extração seletiva na cobertura da floresta Amazônica para exemplos de cenário de baixa extração e de elevada extração.

⁹ Entrevista com funcionário de empresa do ramo de madeiras nativas na Amazônia, em 27 de abril de 2011.

¹⁰ O raio admitido em extração de impacto reduzido seria de 12 m (Schulze; Zweede, 2006).

Figura 25 – Exemplos de efeito da movimentação dos equipamentos, corte das árvores comerciais na floresta e criação de áreas de estocagem de toras para cenário de baixa extração (a) e cenário de elevada extração (b)

Figura 26 - Exemplos de efeito da extração seletiva na cobertura da floresta Amazônia para cenário de baixa extração (a) e cenário de elevada extração (b)

A degradação da floresta para extração de toras comerciais tem efeitos na concentração de biomassa por longos períodos. Na Figura 27, em imagens de satélite produzidas por Asner et al (2002), é possível identificar a recuperação da floresta em duas diferentes glebas. Em

uma delas, mesmo 3,5 anos após o episódio de exploração madeireira, tempo em que a vegetação de copa se reconfigurou e reduziu significativamente as clareiras na cobertura da floresta, ainda é possível identificar as áreas de estocagem de toras, abertas ao longo das trilhas secundárias.

Figura 27 - Intensidade de degradação do dossel em diferentes períodos após extração convencional de madeira, em leitura de imagens obtidas por satélite.

Fonte: extraído de Asner et al (2002)

Os equipamentos empregados também interferem na intensidade da exploração sobre a área. Segundo Asner et al (2002), o uso de um único tipo de trator para as diversas tarefas envolvidas na extração é um hábito comum, e contribui de forma relevante para aumentar o impacto causado pela atividade. Em uma floresta manejada, Johns; Barreto e Uhl (1996) comparou a degradação provocada por dois modelos de tratores, os *skidders* e os *bulldozers*, tendo este último afetado uma área 13% maior que o primeiro. Uma razão seria a adequação do equipamento para uso em atividades de exploração madeireira (Amata, 2008a).

4.1.2 Fatores indiretos da intensidade de exploração no modelo convencional

Há indutores indiretos que contribuem para determinar a intensidade da atividade de exploração convencional da floresta, como o interesse na conversão do uso da terra (Figura 28) e a ilegalidade na atividade, que podem levar a procedimentos de extração com altos níveis de destruição. A retirada de madeira comercial em muitos casos precede a sequência de mudança no uso da terra (Asner et al., 2006; INPE, 2008), causando a destruição de parte da floresta. Nesses casos, a extração de toras para obtenção de produtos de madeira tropical é o início do processo de desmatamento. Segundo Asner et al (2006), 16% das áreas destruídas parcialmente para a extração de toras são desmatadas dentro de um ano e 32,7% no período de quatro anos.

Figura 28 – Principais usos da terra que substituem a floresta Amazônica: pecuária e agricultura

Foto: Candido Neto; INPE (2011)

Em muitos casos, pode haver uma primeira entrada na floresta para extração de árvores de alto valor e grande porte e, anos depois, outro episódio de extração de madeira menos valiosa (Gerwing; Vidal, 2002; Macpherson et al., 2010), com posterior queima da biomassa remanescente para introdução de outros usos (Cederberg et al., 2011; Cochrane, 2003; INPE, 2008; Matricardi et al., 2010). Um exemplo de substituição gradual da floresta por outras atividades pode ser acompanhado na Figura 29.

Figura 29 – Exemplo do processo de substituição da floresta Amazônica por outros usos da terra, próximo à cidade de Ariquemes (RO), com imagens de 1975 (a), 1989 (b), 2001 (c) e 2008 (d)

Fonte: Google Earth (2011) - Latitude: 10° 15.092' S, Longitude: 63° 32.856' O

Interessante frisar que historicamente as rotas criadas pelos madeireiros criam estradas e infraestrutura, mesmo que precárias, que atraem e são utilizados posteriormente para outros usos (Uhl et al., 1997). Asner et al (2006) sugere que recentemente os lucros da madeira atuam como investimento na introdução de novas atividades, sendo que, frequentemente, a substituição de usos da terra ocorre antes mesmo de a floresta se regenerar o suficiente para uma segunda extração de madeira.

Outro fator indireto para a intensidade de degradação, estima-se que pelo menos metade da madeira Amazônica é oriunda de práticas ilegais (Barreto et al., 2005; Lawson, 2010; Lentini, 2010; OESP, 2011). Poucas estimativas foram identificadas sobre a parcela de ilegalidade na atividade. Estimativa para o estado do Pará indica que 65% da madeira seja ilegal (OESP, 2011), sendo esse estado a principal fonte de madeira da Amazônia (IBAMA, 2007; Pereira et al., 2010). Uma referência indica que a fração da ilegalidade teria sido reduzida na década de 2000 e poderia ser estimada em 40% para o ano de 2009 (Lawson, 2010), dado semelhante aos 36% estimado para o mesmo ano por Pereira et al (2010).

4.1.3 Histórico e distribuição das áreas degradadas

Estima-se que a área degradada pela extração seletiva de madeira seja similar à área de desmatamento (corte raso) na região Amazônica (INPE, 2010a; Nepstad et al., 1999). Há mais de duas décadas, os índices históricos de desmatamento da floresta Amazônica brasileira são acompanhados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por meio de imagens de satélite, principal método utilizado para rastrear desmatamento e degradação na floresta Amazônica.

Resultados recentes indicam que teriam sido desmatados entre $2,7 \times 10^6$ ha em 2004 e $0,7 \times 10^6$ ha em 2010 (INPE, 2010a), demonstrando uma tendência de redução do índice. Já dados dos índices de degradação da Amazônia foram divulgados apenas entre os anos 2007 e 2009, tendo variado de $1,6 \times 10^6$ ha, em 2007, a $2,7 \times 10^6$ ha, em 2008, e reduzido para $1,3 \times 10^6$ ha, em 2009 (INPE, 2010b). Índices de desmatamento e degradação podem ser acompanhados na Figura 30. Relatório do INPE (2010b) declara que 12,4% do total de áreas degradadas em 2007 sofreram corte raso em 2008, constatando que a degradação pode anteceder o desmatamento.

Figura 30 - Taxa de desmatamento anual entre 1988 e 2010 (Prodes) e degradação anual entre 2007 e 2009 na Amazônia brasileira (Degrad)

Fonte: INPE - Prodes e Degrad (2010a, 2010b)

O monitoramento da floresta Amazônica é realizado de forma constante pelo INPE. Ao receber alertas de desmatamento, as imagens de satélite da área em questão são avaliadas em maior resolução, buscando-se validar ou invalidar o alerta. As áreas com ações de desmatamento e degradação validadas em 2010 e 2011 estão expressas na **Figura 31**. Esse sistema de avaliação não totaliza as áreas com interferência antrópica, pois envolve

apenas as áreas que receberam alerta, mas oferece um parâmetro da intensidade e tendência das ações de degradação ao longo do tempo, assim como a identificação dos meses com maior incidência de alertas validados.

Figura 31 - Área com corte raso e diferentes níveis de degradação na Amazônia brasileira, nos anos de 2010 e 2011, segundo avaliação por sistema Deter.

Fonte: INPE - Deter (2012)

As estimativas de degradação da Amazônia brasileira também estão presentes em literatura: de acordo com Nepstad et al (1999), a extração de madeira pode trazer danos entre uma taxa de $1,0 \times 10^6$ ha.ano⁻¹ a $1,5 \times 10^6$ ha.ano⁻¹; Asner et al (2005) estima entre $1,2 \times 10^6$ ha.ano⁻¹ e $2,0 \times 10^6$ ha.ano⁻¹; e segundo Huang e Asner (2010), a taxa de degradação seria de $1,6 \times 10^6$ ha.ano⁻¹. Conforme afirma Asner et al (2005), na Amazônia, a extração seletiva de madeira pode incrementar o impacto gerado por processos de desmatamento em até 25%.

A extração seletiva pode ser de difícil identificação por meio de imagens de satélite, pois a atividade madeireira causa redução difusa da copa da floresta (Asner et al., 2005). Os obstáculos apresentados pelo método são: resolução das imagens, identificação das ocorrências e interpretação das cores (Huang; Asner, 2010). Além disso, o tempo desde o episódio de extração pode mascarar a degradação, pois o crescimento de nova vegetação promove o rápido fechamento do dossel (Asner et al., 2002; Gerwing; Vidal, 2002). Por esse método, Matricardi et al (2010) estima que de 40% a 50% da cobertura da floresta pode ser subtraída em operações de corte seletivo intenso das árvores comerciais (Schulze et al., 2008). Gerwing e Vidal (2002) estima a redução da cobertura vegetal entre 20% e 40%.

Huang e Asner (2010) levantaram a distribuição e tamanho das áreas com extração seletiva nos estados do Pará, Mato Grosso, Rondônia, Tocantins e Maranhão (Figura 32). Os autores estimaram que 37% da área foi intensamente degradada e 63% moderadamente degradada. Em artigo posterior na mesma área¹¹, ao analisarem imagens de satélite¹² dos estados do Pará, Mato Grosso, Rondônia e Acre, Asner et al (2006) identificaram que entre 8% e 17% da cobertura vegetal havia sido subtraída intensamente (acima de 40%); em 68% da área, o dossel havia sido reduzido moderadamente (entre 10% e 40%); o restante da área foi danificada em menos de 10%. Explicam a diferença nos resultados em razão da resolução das imagens, o que possibilitou melhor classificação das áreas, ou seja, a identificação de pequenas áreas intensamente degradadas em meio a trechos de floresta sem danos. A comparação entre os estudos demonstra que diferentes resultados podem ser obtidos em função do método.

Figura 32 - Distribuição da extração seletiva de madeira nos estados do Pará, Mato Grosso, Rondônia, Tocantins e Maranhão e tamanho das áreas exploradas.

Fonte: extraído de Huang e Asner (2010)

¹¹ Uso de imagens de satélite com resolução de 30 m.

¹² Resolução de imagem de 1 km.

Além da dificuldade de identificação de áreas degradadas, as imagens da cobertura vegetal da floresta não permitem estimar de forma precisa o porte das árvores subtraídas ou a quantidade de biomassa extraída ou danificada na exploração. A relação entre os parâmetros de biomassa extraída, redução da copa da floresta e área de solo afetada não são vastamente estabelecidos em literatura. Uma comparação foi realizada por Pereira Jr. et al (2002), em que observaram uma proporção linear entre as variáveis com base em fontes bibliográficas e levantamento direto¹³. Estimam que para a extração seletiva de 70 m³/ha de madeira em toras, pouco mais de 50% do dossel seria perdido e 20% da área de solo seria afetada. Para extração em torno de 15 m³/ha de madeira, a intervenção afetaria em torno de 12% da área de copa e 8% em área de solo.

As variáveis de área de solo afetada e área de copa subtraída são frequentes em literatura, mas não refletem as dimensões de altura da árvore e diâmetro de tronco, fatores determinantes da quantidade de biomassa. Pela ausência de fatores de conversão consolidados, que relacionem quantidade de biomassa destruída, área de dossel subtraída e área de solo afetada, optou-se por usar apenas a literatura que apresentasse dados de biomassa. Outra razão para restringir a adoção de dados aos de biomassa é que estes representam equivalência direta com a quantidade de carbono.

Para se quantificar o fluxo de material da extração seletiva convencional realizada pela atividade madeireira na floresta Amazônica, foram levantados na literatura dados mínimos e máximos sobre a quantidade de biomassa extraída e de biomassa destruída que, combinados com a concentração de biomassa na floresta Amazônica (item 3.2.3), definiram os cenários de intensidade de exploração.

4.2 Biomassa em toras extraída na exploração convencional

Com base na literatura que trata da quantidade de madeira extraída no modelo de exploração convencional na floresta Amazônica, foi definida uma faixa de extração típica para as diversas características vegetais da Amazônia. Os valores mínimo¹⁴ e máximo¹⁵ de volume de madeira extraída foram estimados, respectivamente, em 18 m³/ha (Veríssimo et al., 1992) e 72 m³/ha (Gerwing; Vidal, 2002), conforme Tabela 11. Veríssimo et al (1992) levantou esses valores por meio de questionários e entrevista com serrarias da região de Paragominas (PA) e, portanto, trata-se da opinião de agentes diretamente envolvidos na

¹³ Equação linear de área de solo afetada (y) por volume extraído (x): $y = 0,0023x + 0,050$ ($r^2 = 0,65$); Equação linear de copa subtraída (y) por volume extraído (x): $y = 0,0048x - 0,013$ ($r^2 = 0,81$).

¹⁴ Para atividade de manejo florestal, um cenário de mínima extração ocorre quando são extraídas apenas toras com DAP elevado.

¹⁵ Duas referências apresentaram dados semelhantes para a parcela máxima de extração. A seleção foi baseada na maior quantidade de madeira extraída entre elas, dado fornecido por Gerwing e Vidal (2002).

atividade madeireira. Gerwing e Vidal (2002) estimaram o volume por equações de regressão a partir da medição na floresta do toco das árvores extraídas anteriormente. A média das referências levantadas, pode ser estimada em 35 m³/ha (Asner et al., 2005; Asner et al., 2002; Gerwing; Vidal, 2002; Johns; Barreto; Uhl, 1996; Keller et al., 2001; Nepstad et al., 1999; Verissimo et al., 1992).

Utilizando-se o fator de densidade média da madeira comercial de 0,69 g/cm³ (Fearnside, 1997), a faixa estimada de biomassa seca extraída seria de 12 t/ha a 50 t/ha, com valor médio de 24 t/ha. Os estudos foram desenvolvidos em regiões com biomassa seca acima do solo entre 300 t/ha e 364 t/ha, todas na faixa de média concentração. Com base nesses dados, a intensidade de extração de madeira comercial na forma de toras em exploração seletiva convencional pode ser admitida entre 4% e 14%, valor médio de 7% da biomassa seca acima do solo. Os dados completos constam no Apêndice A.

Tabela 11 – Influencia da intensidade de extração de madeira em tora, de acordo com as referências adotadas.

Biomassa seca acima do solo		Extração				Referências
t/ha	m ³ /ha	t/ha ^a	%	Árvore/ ha	m ³ / arvore	
300	18	12	4	2,9	5,2	Veríssimo et al (1992)
	19	13				Nepstad et al (1999)
309	21	15	5			Asner et al (2005) e Keller et al (2001)
309	22	15	5			Asner et al (2005) e Keller et al (2001)
309	23	16	5	6,4	3,6	Asner et al (2002) e Keller et al (2001)
309	23	16	5	3,7	6,3	Asner et al (2002) e Keller et al (2001)
309	27	18	6			Asner et al (2005)
	28	19				Nepstad et al (1999)
364	28	19	5	5,0	5,6	Gerwing e Vidal (2002)
364	30	21	6	5,6	5,4	Johns; Barreto e Uhl (1996)
364	30	21	6	6,0	5,0	Gerwing e Vidal (2002)
300	35	24	8	6,4	5,5	Veríssimo et al (1992)
364	38	26	7	4,0	9,5	Gerwing e Vidal (2002)
	40	28				Nepstad et al (1999)
364	46	32	9	5,0	9,2	Gerwing e Vidal (2002)
364	48	33	9	6,0	8,0	Gerwing e Vidal (2002)
300	62	43	14	9,3	6,4	Veríssimo et al (1992)
364	72	50	14	9,0	8,0	Gerwing e Vidal (2002)
Média	35	24	7	5,8	6,5	

^a Densidade média de 0,69 g/cm³.

Etapa do Fluxo do Material

Madeira em toras extraída da floresta =
4% a 14% da biomassa seca acima do solo

4.3 Biomassa destruída na exploração convencional

Ainda segundo os autores de Veríssimo et al (1992) e Gerwing e Vidal (2002), estima-se que a biomassa extraída como tora esteja incorporada em 2,9 a 9,0 árvores por hectare. A altura média seria de 24 m a 26 m (Miller et al., 2011), com espécies atingindo 45 m (Macpherson et al., 2010), o que deve incluir tronco e copa. Conforme detalhado do item 4.1.1, essas árvores encontram-se dispostas de forma aleatória, inexistindo um padrão de composição vegetal. Para alcançar as árvores selecionadas, parte da biomassa da floresta acaba sendo destruída. No processo de abertura de trilhas, abertura de áreas de estoque de toras, corte e queda das árvores uma grande quantidade de resíduos é gerada. Esses resíduos, formados por galhos, folhas, raízes e pedaços de madeira das árvores cortadas, são abandonados na floresta, sendo encaminhada para a serraria apenas a madeira de valor comercial (Amata, 2008b; Numazawa; Barros, 2009). Exemplos de biomassa abandonada na floresta em exploração manejada, modelo que certamente gera quantidade menor de resíduos em comparação com modelo convencional, são apresentados na Figura 33.

A ausência de destinação economicamente viável (informação verbal)¹⁶ e distância de transporte (Asner et al., 2006) são duas das razões para a falta de utilização dos resíduos de biomassa gerados na floresta. Huang e Asner (2010) quantificaram que, de toda a biomassa viva cortada no processo de extração, 13% são retirados da floresta como produtos no formato de toras e os demais 87% são abandonados na floresta na forma de resíduos de madeira. Segundo Miller et al (2011), o abandono da madeira não comercial é uma prática tanto em processos de extração convencional como em áreas manejadas em que, da biomassa total danificada, 95% é abandonada no solo da floresta e 5% fica como árvores mortas em pé (Figura 34).

¹⁶ Em comunicação pessoal com Prof. Dr. Edson José Vidal da Silva, em 28 de novembro de 2011.

Figura 33 - Biomassa abandonada por defeitos ou falta de aproveitamento como produto serrado, em floresta manejada

Fotos: Camila Numazawa/Sueo Numazawa

Gerwing e Vidal (2002) levantaram por medição direta que, após a exploração intensa de madeira, a biomassa morta (árvores mortas em pé e matéria orgânica sobre o solo), saltou de 15% para 47%¹⁷ da biomassa total na floresta. Os autores identificaram que pelo menos 70% das árvores com potencial de valor econômico sofreram danos moderados a graves em

¹⁷ Em comparação, Palace et al (2007) estimam a quantidade de biomassa morta em áreas com extração seletiva de madeira com impacto reduzido como 50% superior à de florestas intactas.

tronco ou copa, o que denota a ação predatória nos procedimentos realizados em extração seletiva de alta intensidade.

Figura 34 - Biomassa destruída nos procedimentos de extração de toras

Foto: Camila Numazawa/Sueo Numazawa

A quantificação da destruição da biomassa na exploração seletiva convencional da floresta Amazônica seguiu a mesma metodologia empregada para a parcela de extração, sendo dividido o valor de biomassa seca destruída pela biomassa seca acima do solo, a partir de dados de literatura acerca do tema, conforme exposto na Tabela 12.

A porcentagem mínima de conversão da biomassa da floresta em resíduos foi de 7% (Gerwing; Vidal, 2002), obtida a partir do dado de degradação de 27 t/ha em floresta de 364 t/ha de biomassa seca acima do solo. Os dados citados foram fornecidos diretamente pelos autores e obtidos pela medição de parte da biomassa morta da floresta, e extrapolados para um hectare, por meio do método de interseção planar. A média dos valores apresentados pelas referências pode ser estimada em 19% (Asner et al., 2005; Gerwing; Vidal, 2002; Johns; Barreto; Uhl, 1996; Keller et al., 2001; Verissimo et al., 1992).

Tabela 12 - Influência da intensidade de exploração na geração de resíduos por hectare: volume, massa e parcela da biomassa florestal destruída, de acordo com as referências adotadas.

Biomassa seca acima do solo	Toras		Resíduos			Relação resíduos / toras	Referência
t/ha	t/ha	%	m³/ha	t/ha ^a	%	t/t	
364	19	5	39	27	7	1,4	Gerwing e Vidal (2002)
300	12	4	47	32	11	2,6	Veríssimo et al (1992)
364	21	6	58	40	11	1,9	Johns; Barreto e Uhl (1996)
364	21	6	63	43	12	2,1	Gerwing e Vidal (2002)
364	33	9	71	49	13	1,5	Gerwing e Vidal (2002)
300	24	8	62	43	14	1,8	Veríssimo et al (1992)
300	43	14	77	53	18	1,2	Veríssimo et al (1992)
309	15	5	99	68	22	4,6	Asner et al (2005) e Keller et al (2001)
364	50	14	144	99	27	2,0	Gerwing e Vidal (2002)
364	26	7	155	107	29	4,1	Gerwing e Vidal (2002)
364	32	9	158	109	30	3,4	Gerwing e Vidal (2002)
309	18	6	145	102	33	5,5	Asner et al (2005)
Média			93	64	19	2,7	

(a) Densidade média de 0,69 g/cm³.

A taxa máxima de resíduos pode ser estimada em 33%, baseada em Asner et al (2005), que estabeleceu a relação entre biomassa destruída e biomassa extraída em exploração intensa como sendo 50 tC/ha para 8 tC/ha, respectivamente, para extração de 23,2 m³/ha, o que totaliza 102 t/ha de resíduos com densidade média de 0,7 g/cm³, sugerida pelo autor, em área de biomassa acima do solo de 309 t/ha (Keller et al., 2001). A referência de Asner et al (2005) é adotada como redução do carbono florestal na prática de corte seletivo pela Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCT, 2010a).

Etapa do Fluxo do Material

Resíduos da floresta =
7% e 33% da biomassa acima do solo

4.4 Cenários de extração convencional da madeira Amazônica

Os valores percentuais de biomassa extraída e biomassa destruída quantificados nos itens 4.2 e 4.3 foram analisados conjuntamente. A Figura 35 mostra que não existe correlação entre biomassa extraída e biomassa destruída, embora a tendência seja de crescimento. Os dados levantados em literatura são relativos à exploração de florestas com concentração intermediária de biomassa seca acima do solo, próximos de 300 t/ha. Em extrações de baixa intensidade, que retiram em toras comerciais menos de 6% da biomassa da floresta Amazônica, podem ser encontrados o menor (7%) e o maior (33%) índice de destruição levantado em literatura. As áreas com parcelas elevadas de extração de toras, próximas de 14%, apresentam destruição mediana a alta da biomassa (18% e 27%). Os dados completos de extração de toras e resíduos, oriundos da exploração convencional na Amazônia, encontram-se no Apêndice A.

Figura 35 - Relação entre parcela de biomassa extraída e parcela de biomassa destruída, segundo as referências adotadas

Com base nas três variáveis de influência na intensidade de exploração da floresta: concentração de biomassa acima do solo na floresta, biomassa extraída e biomassa destruída, possíveis cenários de exploração foram estabelecidos. Os valores mínimo, médio e máximo das três variáveis foram cruzados entre si, determinando 27 cenários, no formato de matriz 3 x 3. Os valores de entrada para cada variável constam na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados de entrada dos cenários de exploração convencional: concentração de biomassa, percentual de biomassa extraída e percentual de biomassa destruída

		Mínimo (b)	Médio (m)	Máximo (a)
Concentração de biomassa seca acima do solo	t/ha	200	300	425
Extração	%	4	7	14
Destruição	%	7	19	33

Os valores percentuais (mínimo, médio e máximo) de toras e resíduos foram diretamente aplicados aos valores de concentração de biomassa na floresta, obtendo-se uma estimativa em quantidade de biomassa. Os 27 cenários estão listados na Tabela 14.

Tabela 14 - Cenários-hipótese de exploração convencional na floresta Amazônica

Cenários		Concentração de biomassa	Extração	Destruição	Extração	Destruição	Destruição/ Extração	Supressão total	Biomassa remanescente	
		t/ha	%	%	t/ha	t/ha	t/t	t/ha	t/ha	%
1	bbb	200	4	7	8	14	1,8	22	178	89
2*	bmb	200	7	7	14	14	1,0	28	172	86
3*	bab	200	14	7	28	14	0,5	42	158	79
4	bbm	200	4	19	8	38	4,8	46	154	77
5	bmm	200	7	19	14	38	2,7	52	148	74
6	bam	200	14	19	28	38	1,4	66	134	67
7*	bba	200	4	33	8	66	8,3	74	126	63
8	bma	200	7	33	14	66	4,7	80	120	60
9	baa	200	14	33	28	66	2,4	94	106	53
10	mbb	300	4	7	12	21	1,8	33	267	89
11*	mmb	300	7	7	21	21	1,0	42	258	86
12*	mab	300	14	7	42	21	0,5	63	237	79
13	mbm	300	4	19	12	57	4,8	69	231	77
14	mmm	300	7	19	21	57	2,7	78	222	74
15	mam	300	14	19	42	57	1,4	99	201	67
16*	mba	300	4	33	12	99	8,3	111	189	63
17	mma	300	7	33	21	99	4,7	120	180	60
18	maa	300	14	33	42	99	2,4	141	159	53
19	abb	425	4	7	17	30	1,8	47	378	89
20*	amb	425	7	7	30	30	1,0	60	366	86
21*	aab	425	14	7	60	30	0,5	89	336	79
22	abm	425	4	19	17	81	4,8	98	327	77
23	amm	425	7	19	30	81	2,7	111	315	74
24	aam	425	14	19	60	81	1,4	140	285	67
25*	aba	425	4	33	17	140	8,3	157	268	63
26	ama	425	7	33	30	140	4,7	170	255	60
27	aaa	425	14	33	60	140	2,4	200	225	53

* Cenários em letras cinza foram considerados improváveis no contexto da Amazônia.

Com todos os cenários quantificados, em um segundo momento, foi realizada a análise de representatividade de cada um deles, com o objetivo de excluir cenários atípicos da realidade de exploração convencional na Amazônia. Um grupo de cenários considerados inválidos seriam os que apresentam quantidade de madeira extraída superior à quantidade de madeira destruída. Isso porque, não foi identificada, em literatura, relação entre essas variáveis abaixo de 1,2 t biomassa destruída / t biomassa extraída (Verissimo et al., 1992), tendo sido excluídos seis cenários com base nesse critério. Huang e Asner (2010) supõem que, da biomassa suprimida da floresta, toras são 13% e biomassa abandonada são 87%. A relação entre biomassa destruída e biomassa extraída resultaria em 6,7 t/t, segundo os dados dos autores. Esse valor foi adotado como índice máximo e, em função dele, três cenários foram descartados. Por meio da **Figura 35**, nota-se que os cenários excluídos estariam fora da área considerada provável. Todos os cenários excluídos foram expressos em letras de cor cinza na Tabela 14.

Para o Prof. Sueo Numawaza¹⁸, no manejo florestal, a relação entre biomassa destruída e biomassa extraída estaria entre 1,2 t/t e 1,7 t/t em floresta aberta e entre 4,0 t/t e 4,8 t/t em floresta densa, constatação que ratifica a proporção dos cenários considerados válidos. Nenhum outro cenário foi invalidado devido ao fato de a análise ter sido realizada com base no manejo que, provavelmente, apresenta melhores resultados que o impacto da extração convencional. Os cenários de alta destruição (33%) não foram eliminados, pois esse valor é a referência brasileira do impacto por corte seletivo da madeira na região Amazônica (MCT, 2010b).

Excluídos os cenários classificados como atípicos da atividade madeireira, 18 cenários foram considerados válidos:

- Em região de floresta aberta, com biomassa seca acima do solo de cerca de 200 t/ha, seriam retirados entre 12 m³/ha e 41 m³/ha de toras (8 - 28 t/ha), sendo convertido em resíduos entre 20 m³/ha e 96 m³/ha (14 - 66 t/ha).
- Em região de floresta com biomassa seca acima do solo de cerca de 300 t/ha, seriam retirados entre 17 m³/ha e 61 m³/ha de toras (12 - 42 t/ha), sendo convertido em resíduos entre 30 m³/ha e 143 m³/ha (21 - 99 t/ha).
- Em região de floresta densa, com biomassa seca acima do solo de cerca de 425 t/ha, seriam retirados entre 25 m³/ha e 86 m³/ha de toras (17 - 60 t/ha), sendo convertido em resíduos entre 43 m³/ha e 203 m³/ha (30 - 140 t/ha).

De acordo com a intensidade de exploração seletiva, poderiam ser subtraídos da floresta uma parcela de biomassa, entre toras e resíduos, que varia de 11% a 47% (Figura 36). O valor é consistente com a estimativa entre 10% e 40% de redução da biomassa florestal

¹⁸ Em comunicação pessoal com Prof. Dr. Sueo Numawaza, em 28 de fevereiro de 2012.

fornecida por Nepstad et al (1999). A relação entre resíduos gerados e toras extraídas varia entre 1,4 t/t e 4,8 t/t.

Figura 36 - Variação da supressão da floresta, considerando biomassa em toras (azul) e resíduos (cinza), para diferentes concentrações de biomassa seca acima do solo

Dentro desse conjunto, a partir dos valores de soma da biomassa extraída e da biomassa destruída, foram definidos dois cenários extremos e um intermediário que representassem de forma geral a exploração madeireira na Amazônia. Entretanto, para cada região da Amazônia existirão cenários típicos, que dependem de fatores naturais e humanos próprios da localidade, conforme abordado ao longo do presente capítulo. Os cenários mínimo, médio e máximo, em uma abordagem macro para a floresta Amazônica, podem ser caracterizados como:

- **Cenário mínimo (bbb):** Em floresta com biomassa seca acima do solo de 200 t/ha, a supressão total seria de 22 t/ha, com 89% de floresta remanescente. Admitindo a extração de 12 m³/ha de toras (8 t/ha) e a conversão em resíduos de 20 m³/ha (14 t/ha), a relação entre resíduos e toras seria de 1,8 t/t.
- **Cenário médio (mmm):** Em floresta com biomassa seca acima do solo de 300 t/ha, a supressão total seria de 78 t/ha, com 74% de floresta remanescente. Admitindo a extração de 30 m³/ha de toras (21 t/ha) e a conversão em resíduos de 83 m³/ha (57 t/ha), a relação entre resíduos e toras seria de 2,7 t/t.
- **Cenário máximo (aaa):** Em floresta com biomassa seca acima do solo de 425 t/ha, a supressão total seria de 200 t/ha, com 53% de floresta remanescente. Admitindo a extração de 86 m³/ha de toras (60 t/ha) e a conversão em resíduos de 203 m³/ha (140 t/ha), a relação entre resíduos e toras seria de 2,4 t/t.

Os cenários descritos foram selecionados com base na redução total de biomassa viva da floresta, o que engloba toras extraídas e resíduos gerados. Eles representam a faixa de variação esperada da quantidade de biomassa destruída quando se extrai a madeira comercial, variando de 20 m³/ha até 203 m³/ha. Esse valor depende da densidade de biomassa da floresta e de decisões de fatores humanos, como a quantidade extraída. Eles também representam o fato de que em uma floresta de maior densidade de biomassa espera-se uma maior quantidade de madeira comercial.

Do ponto de vista prático, é interessante a definição de cenários com base em diferentes critérios como, por exemplo, taxa de geração de resíduos por quantidade de tora extraída. Existirão valores mínimos e máximos relacionados a cada critério. Para análise de CO₂ do produto madeira serrada, a relação entre resíduos e tora determina o impacto. Essa abordagem integra o item 7.2, em que são retomados os 18 cenários delineados para a quantificação das emissões de CO₂ por produto final.

4.5 Fluxo do material da extração convencional de toras

Os fluxos de biomassa seca por extração convencional de toras da floresta, para os cenários mínimo, médio e máximo selecionados, estão representados por gráficos Sankey na Figura 37, Figura 38 e Figura 39, respectivamente. Outros fluxos resultariam dos demais cenários expressos na Tabela 14, sendo esses destacados por sua representatividade para uma abordagem de impacto da atividade madeireira nas emissões nacionais, em que podem ser quantificadas as faixas de emissão a partir de levantamentos de área desmatada de floresta.

A extração de toras da floresta é a primeira etapa do fluxo do material da madeira serrada da Amazônia originária de exploração convencional. Considerando que apenas uma fração da biomassa é de árvores comerciais e que a floresta tem grande quantidade de biomassa, o impacto da extração de madeira no bioma é relevante. A destruição de parte da biomassa da floresta é inerente à atividade e estará presente tanto em exploração convencionais como em exploração de baixo impacto em florestas manejadas, logicamente com escalas diferentes de destruição para um mesmo volume de madeira extraído. Mas a diferença fundamental entre os dois modelos de exploração está na existência ou não de compromisso com a conservação da floresta após a exploração, que é assegurada apenas enquanto o manejo da floresta for mantido.

Figura 37 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica, em biomassa seca, após etapa de extração seletiva de toras: cenário de exploração mínima

Figura 38 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica, em biomassa seca, após etapa de extração seletiva de toras: cenário de exploração média

Figura 39 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica, em biomassa seca, após etapa de extração seletiva de toras: cenário de exploração máxima

4.6 Dinâmica da floresta Amazônica após extração de toras comerciais

4.6.1 Degradação dos resíduos e crescimento de nova vegetação

Após a exploração comercial da madeira da floresta Amazônica, ocorrem dois processos simultâneos: degradação da biomassa que foi morta durante a ação dos madeireiros e a recuperação da biomassa viva pelo crescimento de nova vegetação. Ao mesmo tempo em que parte do carbono terrestre da biomassa destruída é transformada em gases estufa, as clareiras da floresta dão lugar a uma nova formação vegetal, que absorve carbono da atmosfera. Esses processos foram estudados separadamente por diversos autores, sendo que apenas Huang e Asner (2010) desenvolveram uma análise conjunta com foco na exploração madeireira.

Com relação aos resíduos, a biomassa que é destruída durante o processo de extração de toras, e abandonada na floresta, é biologicamente decomposta. Mesmo que o carbono de resíduos da extração seletiva esteja inicialmente integrado à biomassa da floresta, na forma de matéria morta, sua tendência é de contribuir por décadas para a liberação de carbono na forma de gases de efeito estufa. Segundo Fearnside (1997), na decomposição da biomassa morta, 97% do carbono é convertido em dióxido de carbono e pouco mais de 3% em metano. A umidade e temperatura da floresta Amazônica propicia esse processo natural de decomposição, ambiente que apresenta elevada taxa de degradação da biomassa morta (Keller et al., 2004). De acordo com Houghton et al (2000), a madeira morta na floresta Amazônica degrada em taxa de 0,1/ano a 0,4/ano. Para Huang e Asner (2010) essa taxa é de 0,25/ano. Portanto, seriam necessários entre 2,5 e 10 anos para a completa degradação da madeira e conversão do carbono em emissão de CO₂ e CH₄.

Huang e Asner (2010) simularam os efeitos da extração seletiva de madeira sobre o carbono contido na floresta Amazônica por meio de análise de irradiação solar da vegetação em imagens de satélite e uso do software CASA3D. Segundo os autores, após a extração seletiva, os resíduos contribuem para a emissão de carbono por décadas e, mesmo que a floresta esteja em processo de recuperação, apenas após 30 anos poderia haver um equilíbrio entre emissão e absorção de carbono. A **Figura 40** ilustra esse processo. Para a fração de carbono absorvido pelo solo, pode-se perceber que há pequena variação. Cerca de 20 anos seriam necessários para os resíduos voltarem ao nível da floresta original.

Figura 40 - Distribuição do carbono na floresta Amazônica antes e após extração convencional de madeira

Fonte: Huang e Asner (2010)

Com relação ao crescimento da nova vegetação, para Huang e Asner (2010), em um cenário de 100 anos, o incremento médio da biomassa seria de 0,6 t/ha.ano a 1,4 t/ha.ano. O primeiro ano de crescimento apresentaria índice de 14,7 t/ha, decrescendo para 4,5 t/ha no quinto ano e 0,61 t/ha no vigésimo ano. Silva et al (1995) avaliou o crescimento da biomassa em um período de onze anos após a extração de 75 m³ madeira em área de manejo na Floresta Nacional de Tapajós (PA): nos primeiros seis anos o crescimento da madeira foi de 4,3 t/ha/ano¹⁹, e nos cinco anos posteriores, de 2,9 t/ha/ano.

Para dados de crescimento da biomassa em áreas de corte raso, Feldpausch et al (2004) quantificaram o crescimento da biomassa seca acima do solo, em área completamente desmatada na região central da Amazônia, na taxa média de 11 t/ha.ano, durante primeiros 14 anos após abandono do uso como pasto. Segundo Houghton et al (2000), a taxa média varia de 3,1 t/ha.ano a 5,5 t/ha.ano, respectivamente para áreas com biomassa acima de 200 t/ha e 380 t/ha. Vieira et al (2005) mediram crescimento de 3,7 t/ha.ano e 5,3 t/ha.ano, para floresta com 200 t/ha, na região de Rio Branco (AC), e 370 t/ha, na região de Manaus (AM), respectivamente.

A completa recuperação do valor inicial de carbono na biomassa viva pode exigir longos períodos e algumas vezes pode não ocorrer completamente. Para Johns; Barreto e Uhl (1996), seriam necessários de 75 a 100 anos para regeneração da biomassa que permitisse

¹⁹ Dados originais da autora: 6,1 m³/ha.ano em seis anos e 4,2 m³/ha.ano nos cinco anos seguintes, convertidos por densidade média de 0,7 g/cm³.

nova retirada de madeira. Huang e Asner (2010) estimam que a recomposição do carbono contido na biomassa viva acima do solo seria de 89% após 60 anos da extração seletiva. Para degradação de intensidade moderada, a recuperação seria de 94% ao fim de 100 anos.

Huang e Asner (2010) estimaram terem sido extraídos em média 23,2 m³/ha de toras na exploração. Com base nos dados de simulação (Figura 40), se considerados a degradação dos resíduos e o crescimento da biomassa viva em período de 30 anos, a emissão líquida seria de 6,0 tCO₂/m³ de toras. Entretanto, considerar a emissão líquida de carbono no fluxo do material apenas seria válido em casos de floresta manejada ou se garantidas a recuperação da biomassa e a longa permanência do ambiente florestal.

No caso de extração convencional da madeira, não é possível assegurar que a floresta seja regenerada ou que não ocorra sua substituição por outros usos da terra, o que impediria por completo a assimilação do carbono liberado. Desta forma, na ausência de responsabilidade pela continuidade da floresta por parte dos madeireiros, estes seriam indevidamente beneficiados com uma quantificação que incorporasse o crescimento posterior da biomassa. Além disso, a dinâmica do carbono na floresta, envolvendo crescimento e degradação da biomassa, é bastante complexa e apenas a publicação de Huang e Asner (2010) apresenta estimativas.

Devido às incertezas de futuro uso da terra, velocidade e capacidade de completa recuperação do carbono na floresta Amazônica, foi adotado o cenário mais conservador no fluxo de carbono da madeira serrada, convertendo imediatamente todo o carbono dos resíduos da etapa de extração convencional em emissão de dióxido de carbono. O fluxo de carbono da madeira nativa é abordado mais detalhadamente no Capítulo 4.4.

4.6.2 Efeitos indiretos da degradação

Além da destruição imediata de parte da biomassa da floresta Amazônica, a retirada seletiva de madeira promove uma alteração na composição vegetal e eleva a suscetibilidade da floresta a efeitos naturais, agravados no caso de exploração convencional.

De acordo com Uhl et al (1991), a regeneração da madeira em áreas com exploração seletiva pode não necessariamente reproduzir a mesma composição florestal inicial. Isso acontece porque, com a retirada de parte da cobertura da floresta, espécies que demandam a luz crescem mais rapidamente, havendo a substituição de árvores de grande porte por espécies pioneiras e cipós (Gerwing; Vidal, 2002; Huang; Asner, 2010; Macpherson et al., 2010; Silva et al., 1995). Essa nova vegetação cresce rapidamente para fechar o ambiente florestal, mas tem baixa concentração de biomassa e vida de curta duração, comparadas às espécies existentes antes da exploração (Huang; Asner, 2010). Vieira et al (2005), sugere

que o restabelecimento das espécies da floresta Amazônica, conforme composição inicial, levaria centenas de anos.

Em função da velocidade de crescimento das espécies de alta densidade, a quantidade de madeira comercial também pode demandar décadas para se restabelecer. Segundo Macpherson et al (2010), 41 m³ de toras estariam inicialmente presentes na floresta. Em um modelo que simula as interações na floresta, o autor estima que após 30 anos da extração de 30 m³/ha de toras, estariam disponíveis para nova extração apenas 14 m³/ha. Em simulação por período de 120 anos, sem nova retirada de madeira, a quantidade de madeira comercial ainda não teria sido totalmente recuperada. É também provável que durante a exploração madeireira sejam retiradas árvores-semente (Gerwing; Vidal, 2002; Pinedo-Vasquez et al., 2001) e destruídas árvores de espécies comerciais com pequeno porte, o que reduz a oferta de madeira comercial durante algumas décadas (Gerwing; Vidal, 2002; Uhl et al., 1991).

Com relação à suscetibilidade de uma floresta degradada, Schulze, M. et al (2006) quantificam a taxa de mortalidade de árvores com DAP $\geq$ 35 cm, posterior ao corte seletivo, em 2,6%, nos primeiros cinco anos. Áreas não exploradas apresentam taxa natural de mortalidade de 0,9%. Isso porque, após a retirada de parte da vegetação, a floresta apresenta maior risco de episódios de incêndio em períodos de seca (Cochrane, 2003; Costa et al., 2010; Matricardi et al., 2010; Nepstad et al., 2001). As clareiras permitem a entrada de luz solar no interior da floresta e, ao mesmo tempo em que a incidência de luz promove o aumento da fotossíntese, a floresta perde sua umidade. Com a presença de resíduos de biomassa de pequenas dimensões, geradas na extração de madeira, o ambiente torna-se propício à disseminação do fogo (Gerwing; Vidal, 2002). Em efeitos indiretos de maior escala, a supressão da cobertura vegetal da floresta por degradação e desmatamento altera os níveis de umidade e precipitação da região Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Nobre et al., 1991). O rompimento da dupla estabilidade entre clima e vegetação poderia desencadear alterações na temperatura, umidade e flora de âmbito local e regional (Nobre; Borma, 2009)

A inter-relação entre Amazônia e mudanças climáticas também se constituiria como um efeito indireto da destruição da floresta. Assim como a alteração na cobertura da floresta Amazônica contribui para as mudanças do clima, as consequências desse fenômeno afetam a floresta, podendo causar maiores períodos de seca, o que provocaria menor taxa de crescimento da vegetação e redução na quantidade de biomassa viva. Com isso, distúrbios realizados na floresta provocariam efeitos a longo prazo (Saleska et al., 2003).

4.7 Conclusão

Em processos de exploração madeireira convencional da floresta Amazônica, a redução pode ser estimada entre 11% e 47% da biomassa inicial acima do solo; fatores naturais e fatores humanos determinam a intensidade da exploração. Entre 12 m³/ha e 86 m³/ha são geralmente extraídos em florestas de baixa a alta concentração de biomassa, que podem representar entre 4% e 14% da biomassa acima do solo. A faixa de destruição varia entre 7% e 33%, o que equivale à faixa entre 20 m³/ha e 203 m³/ha de biomassa abandonada à degradação. Alguns fatores para determinar a parcela de extração e de destruição são: densidade e concentração de biomassa na floresta, quantidade das espécies comerciais e procedimentos de extração.

A escassa literatura existente atualmente sobre o efeito da exploração madeireira na floresta, principalmente relacionando os três parâmetros citados, implicou na adoção de cenários e aplicação de modelos matemáticos que permitissem estimar esses valores para diferentes regiões da floresta, com base em dados disponíveis. Os cenários servem como balizadores do impacto causado pela atividade, e embutem diversas incertezas.

Após a exploração madeireira, a floresta pode ser abandonada ou ser realizado o manejo; ambos oferecem potencial para recuperação da biomassa e do carbono estocado. Entretanto, efeitos indiretos da intervenção podem atingir a floresta, como aumento dos períodos de seca e episódios de incêndio, além de alteração da composição vegetal no crescimento da floresta secundária. Esses fatores podem agir como obstáculos para a recuperação da biomassa em quantidade similar à existente antes da exploração madeireira. Como não há garantia da conservação da floresta, admitiu-se que todo o impacto da extração de toras seria associado ao produto madeira serrada no fluxo do material.

5 Produção de madeira serrada na região Amazônica

Este capítulo oferece um panorama do processamento primário das toras em serrarias típicas da região Amazônica. Nessa etapa, a madeira serrada é produzida em diversos formatos e dimensões, sendo conjuntamente gerados grandes volumes de resíduos de biomassa. São levantados os procedimentos de serragem das toras, estimada a faixa de variação de rendimento das serrarias da região e apresentadas as formas de destinação dos resíduos da serraria. A relação entre produtos e resíduos do processamento é aplicada na estimativa de emissões de CO₂ em capítulo posterior.

5.1 Produtos de madeira serrada e sua aplicação na construção civil

A madeira em toras extraída da floresta Amazônica é encaminhada para serrarias localizadas na região Amazônica²⁰, onde é transformada em produtos de madeira de diversos formatos e dimensões. A madeira serrada é definida pelo Ibama (2009) como “A que resulta diretamente do desdobro de toras ou toretes, constituída de peças cortadas longitudinalmente por meio de serra, independentemente de suas dimensões, de seção retangular ou quadrada.”. Os formatos de madeira serrada produzidos na serraria e o padrão de dimensão das peças são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Classificação e dimensão dos produtos de madeira serrada, segundo padrão do IBAMA.

Nome	Espessura (cm)	Largura (cm)
Bloco, quadrado ou filé	> 12	> 12
Pranchões	> 7,0	> 20,0
Prancha	4,0 - 7,0	> 20,0
Viga	> 4,0	11,0 - 20,0
Vigota	4,0 - 8,0	8,0 - 11,0
Caibro	4,0 - 8,0	5,0 - 8,0
Tábua	1,0 - 4,0	> 10,0
Sarrafo	2,0 - 4,0	2,0 - 10,0
Ripa	< 2,0	< 10,0

Fonte: Extraído de Ibama (2009)

Após a serragem das toras em dimensões comerciais, a madeira serrada (Figura 41) pode posteriormente passar por outro processamento, chamado de beneficiamento, no qual é transformada em produtos finais acabados, como painéis, chapas, esquadrias, pisos, forros, tacos, entre outros. Raramente a madeira é vendida no formato de toras e o beneficiamento

²⁰ O modelo de transporte das toras e a distância de percurso entre floresta e serraria são discutidos no item 6.

geralmente é feito por empresa independente, sendo a maior parte da madeira Amazônica comercializada como madeira serrada (IBAMA, 2008; Pereira et al., 2010).

A construção civil é o principal setor consumidor de madeira nativa da Amazônia. A partir de dados de Sobral et al (2002), pode-se estimar que 84% dos produtos de madeira sejam absorvidos em edificações e execução de obras, podendo receber aplicações duráveis ou temporárias. No caso de usos duráveis, como casas pré fabricadas, estruturas de telhado, forros e esquadrias, a vida útil média pode ser estimada em torno de 30 a 40 anos (NIES, 2004; USDA, 2010), períodos estimados para mercados japonês e americano, sem discriminação das espécies de madeira. Já quando empregada em usos temporários, como andaimes e formas, é provável que em cerca de um ou dois anos, duração de uma obra, a madeira seja descartada. Geralmente a madeira é destinada a aterros, empregada em construções de baixa renda ou utilizada como combustível. Estima-se que um terço da madeira Amazônica receba usos temporários (Sobral et al., 2002).

(a)

(b)

Figura 41 - Produtos de madeira nativa serrada

Foto: Camila Numazawa/Sueo Numazawa (a), Claudio Almeida/Luis Maurano (INPE, 2011) (b)

5.2 Procedimentos de serragem e equipamentos

As toras comerciais são extraídas da floresta em época de menores índices pluviométricos na Amazônia, geralmente entre os meses de junho a dezembro (Johns; Barreto; Uhl, 1996), e encaminhadas para a serraria²¹. As toras são condicionadas na serraria para perda de água livre (Figura 42), conforme abordado no item 3.1.2 e, ao longo do ano, vão sendo transformadas em produtos de madeira serrada. A Figura 43 e a Figura 44 ilustram o ambiente de uma serraria da região Amazônica.

²¹ O modelo de transporte das toras e a distância de percurso entre floresta e serraria são discutidos no item 6.

Figura 42 - Estoque de toras em serrarias

Foto: extraída de www.uol.com.br - Paulo Santos/Reuters (a), Candido Neto (b), www.amazonteca.blogspot.com (c)

Figura 43 - Processamento de tora de grande porte em serraria da região Amazônica

Foto: extraído de Lentini (2010)

Figura 44 - Exemplos de infraestrutura e equipamentos de diferentes serrarias da região Amazônica

Foto: imagem extraída de vídeos “Serraria Cisotto e Pezzoni” (a), “Engenho serra de fita” (b) e “Serraria portátil” (c); Amazonteca (d)

(a) www.youtube.com/watch?feature=endscreen&NR=1&v=IXBseU8GDyA

(b) www.youtube.com/watch?NR=1&feature=endscreen&v=VVHp8uvR-JE

(c) www.youtube.com/watch?feature=endscreen&NR=1&v=3E_d7-bS1EE

(d) www.amazonteca.blogspot.com

Foi também identificada a serraria portátil (Globo Amazônia, 2009), ilustrada na **Figura 45**, uma modalidade ainda atípica. A serraria móvel pode tanto representar uma solução viável para comunidades locais, pelo menor custo de implantação, como implicar em facilidade de extração ilegal e avanços mais velozes das fronteiras de exploração.

Para conversão das toras em produtos serrados, a tora é subdividida em fatias, que gerarão peças de diferentes tamanhos, de acordo com o aproveitamento permitido pelo formato inicial (**Figura 46**). São comuns os defeitos nas extremidades das peças, que são cortadas e descartadas. Nesse processo, os equipamentos mais comumente empregados são serra de fita, serra circular e destopadeira (Biasi; Rocha, 2007).

Figura 45 - Serraria portátil

Foto: extraída de Globoamazônia (2012)

Figura 46 - Sequência de divisão da tora em peças comerciais

Foto: imagens extraídas de vídeo “Linha Automática Horizontal para Serragem de Madeiras”
<http://www.youtube.com/watch?v=hZBsROSK1ic>

Em cada uma das atividades, é inevitável a produção de pequenos pedaços sem utilização comercial e de grande quantidade de serragem. Os resíduos são compostos por costaneiras, pequenos pedaços de madeira sem aproveitamento na geometria da tora, pó

de serragem e perdas de partes da tora por rachaduras, podridão, quebra ou defeitos na madeira. A Figura 47 ilustra os resíduos gerados na serraria.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 47 - Resíduos da serraria: pó de serragem (a), pedaços de cascas das toras (b), pedaços sem aproveitamento (c) e (d), aparas (e) e (f)

Foto: extraído de Carbono Social (2012) (a); Camila Numazawa/Sueo Numazawa (b, c, d, e, f)

Segundo Dutra; Nascimento e Numazawa (2005), os resíduos da serraria na conversão de toras em produtos serrados podem ser distribuídos entre 50% aparas, 34% costaneiras e 16% pó de serragem. Estimativa semelhante apresenta que 70% a 76% dos resíduos sejam compostos por casca, costaneiras, pontas e aparas, sendo o restante pó de serragem das toras (Biasi et al., 2007; INEE, 2003)

5.3 Rendimento de toras em madeira serrada

O rendimento é a proporção entre a quantidade de madeira em toras e a quantidade de produtos serrados obtidos. O aproveitamento das toras está associado principalmente aos processos e equipamentos da serraria; propriedades e geometria da madeira e dimensões dos produtos serrados (Biasi et al., 2007); densidade e umidade da madeira (Ibama-MT et al., 2008); espessura, largura e tensão da lâmina de corte do equipamento (Iwakiri, 1990). O rendimento padrão para espécies nativas estabelecido pelo Ibama é de 50%. A Figura 48 demonstra o esquema de corte da tora em peças de madeira serrada com tamanhos variados. Além do aproveitamento em função da seção radial do tronco, há perdas no sentido longitudinal da tora, já que as extremidades das peças também são aparadas e algumas podem apresentar rachaduras e defeitos.

Figura 48 - Exemplo de subdivisão de uma tora de 45 cm de diâmetro em peças de madeira serrada

Estabelecendo uma comparação, na hipótese de conversão de uma tora com seção regular no produto chamado bloco, quadrado ou filé, que pode ser o resultado da primeira transformação, o aproveitamento máximo seria próximo de 64% (Equação 2):

Equação 2:

$$Ap = \frac{\text{área quadrado}}{\text{área círculo}} = \frac{l^2}{\pi r^2} = \frac{(r\sqrt{2})^2}{\pi r^2} = \frac{2r^2}{\pi r^2} = \frac{2}{\pi} = 0,636$$

Em que:

- Ap é o aproveitamento da tora em bloco de madeira
- l é o lado do quadrado
- r é o raio da circunferência

No caso da indústria ou serraria obter coeficiente superior ou inferior ao padrão de 50% de aproveitamento, é obrigatório que esta comprove o real rendimento através de estudo sujeito à fiscalização (IBAMA, 2011). Dados primários sobre o rendimento das serrarias Amazônicas não se encontram acessíveis, nem mesmo informações sobre quantos pedidos de revisão do coeficiente já foram encaminhados ao órgão público responsável. Adicionalmente, os dados de rendimento das toras Amazônicas são escassos também em literatura. A ausência de informações pode ser explicada pelo interesse das serrarias em manter a incerteza acerca desse assunto, o que facilita a incorporação de madeira irregular no processo (INEE, 2003).

Pereira et al (2010) estimaram dados de aproveitamento da madeira processada na região Amazônica para cada estado e a média geral, considerando os produtos madeira serrada, beneficiada, laminados e compensados (Tabela 16). Para o rendimento mínimo, foi estimado que 35,4% do volume de toras foi convertido em produtos, dado relativo ao Estado do Maranhão. Grande parte das toras foram convertidas em madeira serrada (85%). O baixo rendimento pode ser justificado pelo fato de o Estado do Maranhão ser uma região de transição da floresta Amazônica com outros biomas, o que provavelmente reflete em dimensões reduzidas de toras. O valor máximo foi de 45,7%, com base no rendimento do estado do Acre, em que laminados e compensados representaram 55% dos produtos gerados. A média de aproveitamento para o processamento da madeira seria de 41,1%.

Esse resultado incorpora laminados, compensados e outros produtos beneficiados, não sendo possível atrelar fatores de rendimento apenas para a madeira serrada, a partir dos dados divulgados pelo autor.

Tabela 16 - Rendimento da madeira processada na Amazônia Legal em 2009 e participação por categoria de produto.

Estado	Consumo de toras	Madeira processada	Rendimento	Madeira Serrada	Produtos Beneficiados	Laminados e Compensados
	10 ³ m ³	10 ³ m ³	%	%	%	%
Acre	422	193	45,7	23	22	55
Amapá	94	41	43,6	88	12	0
Amazonas	367	144	39,2	86	14	0
Maranhão	254	90	35,4	85	0	15
Mato Grosso	4.004	1.795	44,8	67	21	12
Pará	6.599	2.550	38,6	80	8	12
Rondônia	2.220	925	41,7	64	23	13
Roraima	188	70	37,2	68	20	12
Total	14.148	5.808	41,1	70	15	15

Fonte: Extraído de Pereira et al (2010)

Outros autores declararam resultados para aproveitamento da madeira em tora. Biasi e Rocha (2007) compararam espécies e analisaram o aproveitamento de toras de cedrinho (*Erismia uncinatum*), cambará (*Qualea albiflora*) e itaúba (*Mezilaurus itauba*). Foram selecionadas toras com diâmetros médios de 31 cm a 70 cm, com iguais números de árvore e de volumes para cada espécie, que foram serradas sob os mesmos procedimentos. O aproveitamento médio resultou em 59,8%, 62,6% e 53,9%, respectivamente para cada espécie. O estudo evidenciou duas hipóteses de baixo aproveitamento: para toras de baixos diâmetros de tronco, pois proporcionalmente apresentam muitas perdas com retirada das costaneiras e aparas; e para toras de diâmetros elevados (acima de 60 cm) em função de defeitos, como rachaduras, podridão e ocos. Para os autores, a deficiência tecnológica do processamento acarreta elevado custo do produto e grandes volumes de resíduos com destinação incerta.

Iwakiri (1990) analisou o rendimento específico por espécie para 20 diferentes madeiras Amazônicas. O resultado médio foi de 52,9%, com variação entre 41,9%, estimado para a espécie marupá, com diâmetro dos troncos entre 30 cm e 78 cm, e 61,8%, para espécie cedrorana, com diâmetro dos troncos entre 42 cm e 90 cm. Justifica a diferença de rendimento em função das características de cada espécie, como diâmetro médio, variação

do diâmetro ao longo da extensão da tora (conicidade) e densidade da madeira, que contribuem conjuntamente para o resultado.

A partir de dados de Barros e Uhl (1995), coletados por meio de entrevistas em madeireiras de pequeno e médio porte na região do Rio Amazonas, no estado do Pará, é possível estimar o aproveitamento de 35,1% com uso de serra circular e 34,3% com serra de fita. Já em Uhl et al (1991), o rendimento estimado em cenários extremos foi de 33% e 50%. Nepstad et al (1999) apud Huang e Asner (2010) declaram que 40% é convertido em produtos de madeira, enquanto 60% da biomassa de toras decompõe nas serrarias como pó de serragem e pequenos pedaços de madeira.

Pela escassez de dados sobre o rendimento das toras comerciais Amazônicas na serraria e pela abrangência do estudo de Pereira et al (2010), os valores mínimo (35,4%), médio (41,1%) e máximo (45,7%) dos autores, ratificados pelos valores de Huang e Asner (2010), foram adotados como fator de aproveitamento das toras no fluxo do material da madeira serrada Amazônica. Comparativamente, para toras de espécies coníferas de reflorestamento, é estimado o fator de aproveitamento de 50%. A estimativa é superior em função da geometria regular de tronco, fator em constante desenvolvimento pelo melhoramento genético dos brotos, visando árvores com o melhor aproveitamento da biomassa (Carvalho; Scarpinella, 2010).

Etapa do Fluxo do Material

Rendimento das toras na serraria

35,4% a 45,7%

A partir da variação da quantidade de madeira em toras extraída da floresta (item 4.2), estimada entre 12 m³/ha (8 t/ha) e 86 m³/ha (60 t/ha), seriam convertidos em produtos de madeira serrada entre 5,3 m³/ha (3,7 t/ha) e 30,5 m³/ha (21,1 t/ha), com mediana de 12,5 m³/ha (8,6 t/ha), em função da faixa de rendimento adotada. A quantidade de resíduos gerada estaria entre 6,3 m³/ha (4,3 t/ha) e 55,7 m³/ha (38,4 t/ha), com mediana de 17,9 m³/ha (12,4 t/ha).

5.4 Destino dos resíduos de biomassa das serrarias

Atualmente não há aproveitamento econômico de resíduos de biomassa na região Amazônica (INEE, 2003), devido à atual ausência de infraestrutura para sua incorporação em outros processos, como matéria prima em produtos de madeira prensada ou fonte de

energia para geração de eletricidade. A biomassa dos resíduos de serrarias da região Amazônica geralmente tem como destino a queima, com ou sem funcionalidade ou o abandono do material para degradação (Figura 49).

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 49 – Exemplos de destinação dos resíduos da serraria

Fonte: INPE (2011) (a); Camila Numazawa/Sueo Numazawa (b, c, d); Celso Meira (e); Carbono Social (2012) (f)

Segundo Pereira et al (2010), 19% do resíduo seria transformado em carvão, 18% encaminhado para olarias, 16% abandonado como entulho, 14% queimado para geração de energia e 9% queimado sem aproveitamento, sendo 24% destinado ao uso em aterros e lixões, adubo, entre outros. Com base nesses dados, pode-se considerar que 25% dos resíduos não foram incorporados em outros processos, sendo descartados ou queimados. A queima da biomassa, com ou sem aproveitamento energético, é o principal destino dos resíduos da serraria, envolvendo 60% do total gerado²². Na incineração ocorre a liberação imediata da quase totalidade do carbono estocado na biomassa dos resíduos (Fearnside et al., 2001). Nos demais usos, que envolvem 40% da biomassa, a madeira passa por lenta decomposição, seguindo o mesmo processo biológico dos resíduos da extração, no qual o carbono é convertido em dióxido de carbono (Fearnside, 1997).

A Figura 50 representa os destinos dos resíduos das serrarias na região Amazônica, conforme levantado por Pereira et al (2010). Os tons de laranja indicam os destinos com funcionalidade e os tons de amarelo a parcela de resíduos sem utilização.

* Inclui o aproveitamento dos resíduos como adubo, em aterros, entre outros.

Figura 50 - Destinação dos resíduos da serraria

Fonte: Pereira et al (2010)

Devido à incerteza na destinação dos resíduos, ao fato de que grande parte passa por queima ou degradação da biomassa e à premissa assumida no estudo de atrelar todos os impactos para o produto ao qual o processo produtivo é dedicado, os resíduos da serraria foram contabilizados no balanço de carbono da madeira nativa serrada como uma fonte de dióxido de carbono na etapa de processamento das toras em madeira serrada, assunto desenvolvido no Capítulo 4.4.

²² No estado do Mato Grosso está proibida a queima de resíduos, que são armazenados no limite de propriedade das serrarias (INEE, 2003).

5.5 Conclusão

Parte da madeira em tora, entre 35% e 46%, é transformada em madeira serrada nas serrarias da região Amazônica, o que geraria uma quantidade de produtos entre 5,3 m³/ha (3,7 t/ha) e 30,5 m³/ha (21,1 t/ha), com mediana de 12,5 m³/ha (8,6 t/ha). O restante da biomassa passa a ser resíduos do processamento, formado por cascas das toras, pó de serragem e pequenos pedaços, sem valor comercial ou aproveitamento. A quantidade de resíduos dessa etapa pode variar de 6,3 m³/ha (4,3 t/ha) a 55,7 m³/ha (38,4 t/ha); a mediana foi estimada em 17,9 m³/ha (12,4 t/ha).

A atual destinação para os resíduos da serraria é a queima direta ou o abandono da biomassa para degradação. Nesses casos, o carbono da biomassa é liberado para a atmosfera, o que deve ser contabilizado no balanço do carbono da madeira serrada como emissão de CO₂ (item 4.4) atrelada ao produto.

A grande quantidade de perda de biomassa das toras ocorre por ineficiência das serrarias e falta de aproveitamento do material. Podem ser citados como fatores para a ausência de destinação desses resíduos: a falta de estrutura das serrarias para produção de placas prensadas e produtos similares; a falta de incentivos fiscais e econômicos para a destinação dos resíduos como subproduto para outros processos; e o componente de ilegalidade da atividade, que contribui para desestimular o aproveitamento nas serrarias. Mesmo seu emprego como fonte energética é pouco praticado na região Amazônica, existindo apenas em empresas de maior porte.

6 Emissão de CO₂ pelo consumo energético do processo produtivo da madeira serrada

Nesse capítulo é quantificado o consumo energético e contabilizadas as emissões de dióxido de carbono pela queima de combustíveis fósseis para extração, processamento e transporte da madeira. O item sobre transporte aborda o deslocamento entre floresta e serraria e entre serraria e mercado consumidor no território brasileiro. Foi contabilizada apenas a liberação direta²³ de carbono pelo consumo das fontes energéticas. Os dados de consumo energético nas diversas fases da produção de madeira serrada foram obtidos em literatura e por meio de entrevistas e questionários com madeireiras da região Amazônica (em fase de elaboração)²⁴.

6.1 Extração

Grande parte da energia consumida na extração é empregada na abertura da vegetação para criação de trilhas e áreas de estoque de toras (Uhl et al., 1991) e arraste das toras. Essas atividades são geralmente realizadas com motosserra e trator, que demandam os combustíveis fósseis diesel, gasolina e óleo lubrificante. Entram na contabilização o consumo energético para abertura de trilhas e áreas de estoque, corte das árvores, retirada das toras até a estrada secundária e carregamento das toras no caminhão.

De acordo com Uhl et al (1991), a extração com uso de motosserra e facões implicaria no consumo de energia fóssil, para funcionamento da motosserra, de 0,2 L/m³ de gasolina e 0,1 L/m³ de óleo lubrificante. Para execução das trilhas com emprego de trator de esteiras (bulldozer), o autor estima o consumo energético em cerca de 2,1 L de diesel/m³, ou 76 MJ/m³, equivalente à demanda diária de 150 litros para extração de 70m³ de madeira. O trator de esteiras substituiria parte do uso da motosserra, porém o impacto desta medida no consumo não foi informado. Comparativamente, em região alpina no norte da Itália, a extração de madeira da floresta consome 15,2 MJ/m³ (Valente; Spinelli; Hillring, 2011), com densidade da madeira de 0,71 g/cm³, similar à média adotada para a madeira Amazônica, de 0,69 g/cm³. O menor consumo pode ser explicado pela ausência de atividades de abertura de trilhas, dispensada em florestas em que todas as árvores são extraídas,

²³ De forma indireta, outras fontes de emissão de CO₂ estão presentes ao longo do ciclo de vida de combustíveis, equipamentos e demais insumos como, por exemplo, emissões do processo de extração de petróleo e da fabricação do maquinário, mas que não foram consideradas.

²⁴ Energia incorporada e CO₂ no processo produtivo de casas de madeira, tese de autoria de Katia Punhagui, a ser defendida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

situação em que a energia é consumida apenas com o corte das árvores e movimentação de equipamentos.

Para quantificar o consumo energético na extração, foram empregados dados de quatro empresas de manejo florestal. Os dados foram fornecidos por tipo de combustível (gasolina e diesel) empregados na extração de toras verdes²⁵. Esses valores foram convertidos para consumo energético por volume de madeira e biomassa seca. O consumo de cada combustível na extração seria em média de 0,21 L/m³ de gasolina e 0,91 L/m³ de diesel. O consumo de óleo lubrificante na motosserra segue a proporção 1:50 com relação ao consumo de gasolina (em fase de elaboração)²⁶. Seguindo dados nacionais de poder energético unitário de cada combustível, o consumo energético pode ser estimado entre 15,7 MJ/m³ e 76,6 MJ/m³, com mediana de 39,4 MJ/m³, equivalentes à faixa de 22,7 MJ/t a 111 MJ/t de biomassa seca na forma de toras (Tabela 17).

Tabela 17 - Consumo energético dos equipamentos empregados na extração de toras

		Consumo de combustível			Consumo energético ^a					
		L/m ³			MJ/m ³			MJ/t ^b		
Equipamento	Tipo de combustível	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Motosserra	Gasolina	0,15	0,21	0,29	5,0	6,7	9,2	7,2	9,8	13,3
	Óleo lubrificante	0,0031	0,0042	0,0057	0,12	0,16	0,21	0,2	0,2	0,3
Trator^c	Diesel	0,30	0,91	1,89	10,6	32,5	67,2	15,3	47,0	97,4
Total					15,7	39,4	76,6	22,7	57,1	111,0

(a) O poder energético dos combustíveis pode ser estimado em 32,2 MJ/L de gasolina; 35,52 MJ/L de diesel e 37,29 MJ/L de óleo lubrificante (EPE/MME, 2010); (b) Densidade da madeira seca: 0,69 g/cm³; (c) Tratores ou equipamentos com consumo de diesel.

De acordo com o fator de emissão nacional de CO₂ de cada combustível (MCT, 2006, 2010a), estima-se que entre 1,18 kgCO₂/m³ e 5,9 kgCO₂/m³ (mediana de 3,0 kgCO₂/m³) sejam liberados na queima dos combustíveis fósseis no processo de extração das toras da área da floresta (Tabela 18). Em quantidade de biomassa seca a emissão seria de 1,7 kgCO₂/t a 8,6 kgCO₂/t. Esses valores compõem o consumo energético para extração das toras no balanço de carbono.

²⁵ Admitida densidade de madeira verde como 1,19 g/cm³.

²⁶ Energia incorporada e CO₂ no processo produtivo de casas de madeira, tese de autoria de Katia Punhagui, a ser defendida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

Tabela 18 - Emissão de CO₂ por tipo de combustível e total para extração de toras

Tipo de combustível	Faixa de emissão de CO ₂ na extração						
	Emissão do combustível	gCO ₂ /m ³			gCO ₂ /t ^c		
	gCO ₂ /L	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Gasolina	2.210 ^a	342	463	631	496	671	915
Óleo lubrificante	1.353 ^a	4	6	8	6	8	11
Diesel	2.799 ^b	833	2558	5296	1207	3707	7675
Total		1.179	3.027	5.935	1.708	4.387	8.601

(a) Fonte: MCT (2010a); (b) Fonte: MCT (2006); (c) Densidade da madeira seca: 0,69 g/cm³.

A Figura 51 explicita a parcela de energia consumida com cada combustível utilizado na extração: gasolina e diesel; o consumo de óleo lubrificante é pouco representativo e, por isso, não foi destacado no gráfico. Levando-se em consideração os dados medianos de consumo energético, a composição por tipo de combustível seria de 82% diesel, 17% gasolina e menos de 1% óleo lubrificante. Proporções semelhantes podem ser encontradas para emissão de CO₂: 85%-15%-0,2%. Portanto, o consumo de energia do trator é um fator crítico para as emissões na extração, com possibilidade de redução por menor demanda na abertura de trilhas e arraste de árvores. O planejamento dos percursos na floresta pode contribuir para reduzir a liberação de CO₂ tanto na queima de combustíveis fósseis como pelo impacto na destruição da biomassa florestal.

Figura 51 – Faixa de consumo energético (a) e faixa de emissão de CO₂ (b) para extração de toras na floresta

Emissão de CO₂

por consumo energético na extração =
1,7 - 8,6 kgCO₂/t biomassa seca em tora

6.2 Serraria

A energia na serraria é destinada aos equipamentos para conversão das toras em madeira serrada. A fonte energética advém de combustíveis fósseis queimados diretamente nos maquinários (empilhadeiras e carregadeira, por exemplo) e de energia elétrica, produzida por geradores instalados na própria serraria ou fornecida pelo sistema interligado nacional²⁷, que alimentam os equipamentos de serragem e infraestrutura do local de trabalho. Os principais equipamentos das serrarias são: serra de fita, destopadeira, empilhadeira e vagão de alimentação de toras. Além dos equipamentos de serragem, há demanda pela iluminação dos ambientes da serraria e por equipamentos de escritório.

O levantamento de consumo energético foi realizado com serrarias da região Amazônica de diferentes portes (em fase de elaboração)²⁸. Foram consultadas cinco serrarias, que declararam realizar manejo florestal e processar em toras entre 100 m³/mês e 10.000 m³/mês. Portanto as serrarias possuem escalas diversas e, provavelmente, características de produção bastante diferentes entre si. Os dados levantados constam na Tabela 19 e foram fornecidos por tipo de fonte energética em unidade de massa de tora processada. Em função do poder energético unitário de cada fonte, quantificou-se a demanda energética parcial e total. As serrarias apresentaram ampla variação no consumo energético para processamento das toras em produtos serrados, estima-se entre 141 MJ/m³ e 601 MJ/m³ de toras, ou 204 MJ/t a 872 MJ/t de tora em biomassa seca.

Todas as serrarias declararam usar diesel. Eletricidade e biomassa foram empregadas como fonte energética principal ou de forma complementar (serraria 2, 3 e 4). A eletricidade foi admitida como advinda da rede elétrica nacional. A biomassa para geração de eletricidade é constituída pelos resíduos da serraria, sendo que a empresa 3 declarou haver cogeração para secagem da madeira. A empresa 1 empregou também carvão mineral e lixívia, esta última obtida em outros processos, pois além da madeira serrada, há diversos outros produtos sendo fabricados pela empresa, entre eles papel e celulose, com geração

²⁷ Em menor parcela das serrarias pela baixa distribuição da rede brasileira de eletricidade na região Norte (ONS, 2009).

²⁸ Energia incorporada e CO₂ no processo produtivo de casas de madeira, tese de autoria de Katia Punhagui, a ser defendida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

residual de lixívia. A composição do consumo por fonte energética nas serrarias entrevistadas está expressa na Figura 52.

Tabela 19 - Consumo energético para processamento primário em cinco serrarias da floresta Amazônica, por tipo de fonte de energia e total, por tonelada de biomassa seca em tora

		Serraria				
		1	2	3	4	5
Toras processadas	t/mês	7.000	7.700	2.170	70	389
	m³/mês	10.145	11.159	3.145	101	564
Eletricidade^a	kWh/t	—	—	53,2	90,0	3,8
	MJ/t	—	—	192	324	14
Diesel^b	L/t	2,5	2,3	3,2	2,9	16,6
	MJ/t	88	83	115	102	588
Biomassa^b	kg/t	6,0	9,4	43,6	—	—
	MJ/t	77	121	565	—	—
Carvão mineral^b	kg/t	8,9	—	—	—	—
	MJ/t	258	—	—	—	—
Lixívia^b	kg/t	14,9	—	—	—	—
	MJ/t	178	—	—	—	—
Total	MJ/t	602	204	872	425	602
	MJ/m³ ^c	415	141	601	294	415

(a) 1 kWh = 3,6 MJ.

(b) O poder energético das fontes pode ser estimado em 35,52 MJ/L de diesel; 12,98 MJ/kg de lenha; 28,89 MJ/kg de carvão mineral e 11,97 MJ/kg de lixívia (EPE/MME, 2010).

(c) Densidade da madeira seca: 0,69 g/cm³.

Dados em negrito foram obtidos por Katia Punhagui na forma de auto declaração das serrarias.

Figura 52 - Consumo de energia por tonelada de tora processada (MJ/t), por fonte energética, nas serrarias entrevistadas

O consumo de energia foi convertido em emissão de CO₂ em função do teor de carbono de cada fonte energética, considerando apenas geração direta na combustão. Foram admitidos os fatores nacionais de emissão das fontes energéticas: média anual nacional de 51,2 gCO₂/kWh para eletricidade (MCT, 2011), 2.799 gCO₂/L de diesel (MCT, 2006) e emissão zero para biomassa e lixívia, a partir da premissa de que a emissão de resíduos é sempre alocada nos produtos matriz do processo. Portanto, considerou-se a biomassa como emissão neutra de CO₂ por ser constituída pelos resíduos da serraria, evitando sua dupla contabilização, assim como a lixívia, por ser um resíduo de outro processamento. A emissão de CO₂ do carvão mineral (869 gCO₂/kg) foi calculada com base em dados nacionais, conforme detalhado na Tabela 20.

Tabela 20 – Quantificação da emissão de CO₂ para carvão mineral, com base em dados nacionais de 2005.

	Unidade	Carvão mineral
Emissão nacional (2005) ^a	10 ⁹ gCO ₂	1.567
Consumo energético nacional (2005) ^a	10 ³ tep	353
Valor energético unitário ^b	tep/kg	0,00069
Consumo nacional (2005)	10 ⁶ kg	511
Emissão unitária	gCO ₂ /kg	3.063

Fonte: (a) MCT (2010a); (b) EPE/MME (2010)

A faixa de emissão de CO₂ das serrarias foi estimada entre 6,5 kgCO₂/t a 46,4 kgCO₂/t de tora. As empresas 1 e 5, que apresentaram elevada emissão por unidade de massa de tora serrada, demandaram carvão mineral e diesel no processamento, fontes energéticas com alto fator de emissão. As empresas 2, 3 e 4 utilizaram predominantemente biomassa e eletricidade, com fator de emissão de CO₂ baixo ou neutro. A Figura 53 ilustra a comparação entre as cinco serrarias.

Figura 53 – Emissão de CO₂ por tonelada de tora processada (kgCO₂/t), por fonte energética, nas serrarias entrevistadas

Em função da composição energética das serrarias, nem todas podem ser classificadas como típicas da região, devido à escassa rede de transmissão de eletricidade na região Amazônica (ONS, 2009) e a baixo número de serrarias com geração elétrica por queima de resíduos da serraria ou outras fontes (Pereira et al., 2010).

Outro levantamento de consumo energético em serrarias foi obtido em um plano de negócios para geração regional de eletricidade por queima de resíduos das serrarias, que apresenta dados de consumo mensal de diesel²⁹ para processamento de toras nativas e o volume mensal de toras processadas (INEE, 2003). No estudo foi apresentado apenas o consumo de diesel, não sendo citado o uso de demais fontes energéticas, o que foi considerado como inexistente. Foram incorporados dados de 10 serrarias do estado do Mato Grosso, com produção entre 500 m³/mês e 1.200 m³/mês. Segundo Pereira et al (2010) a produção média mensal de toras em serrarias da região Amazônica é de 575 m³/mês, um fator que pode indicar a representatividade desse conjunto de serrarias como amostra para o consumo energético.

As informações de consumo de diesel e volume processado foram cruzadas para quantificar o consumo energético e a emissão de CO₂ unitário nas serrarias, que podem ser estimados entre 150 MJ/t e 927 MJ/t de toras e entre 11 kgCO₂/t e 68 kgCO₂/t de tora, respectivamente, conforme consta em Tabela 21.

Tabela 21 - Demanda energética e emissão de CO₂ para geração de eletricidade em serrarias da região Amazônica.

		Empresas									
	Unidade	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Produção de toras	m³/mês	1200	250	1200	600	400	500	500	500	600	500
Consumo de Diesel	10³ L/mês	3,5	1,2	6,0	4,0	3,0	4,0	4,0	4,0	6,0	9,0
Energia ^a	MJ/t	150	247	257	343	386	412	412	412	515	927
	MJ/m³	104	170	178	237	266	284	284	284	355	639
Emissão ^b	kgCO ₂ /t	11	18	19	25	28	30	30	30	38	68
	kgCO ₂ /m³	8	13	13	17	20	21	21	21	26	47

(a) Poder energético do diesel: 35,52 MJ/L (EPE/MME, 2010)

(b) Fator de emissão do diesel: 2.799 gCO₂/L (MCT, 2006)

Dados em negrito foram extraídos de INEE (2003)

²⁹ Segundo o autor, foi listado o consumo de diesel de empresas instaladas e projeção para serraria sendo transferidas de outros pontos para a região do estudo (Rondolândia – MT)

Agrupando os dois levantamentos apresentados, os valores de 6,5 kgCO₂/t a 68 kgCO₂/t de tora compõem a faixa de variação da emissão de CO₂, equivalentes à faixa de 4,5 kgCO₂/m³ e 47 kgCO₂/m³. Estimou-se uma média geral em função da emissão unitária de CO₂ de cada serraria ponderada pela massa de madeira processada mensalmente. A média pode ser admitida como 21 kgCO₂/t de tora ou 15 kgCO₂/m³ de tora. O conjunto de dados de emissão para serrarias podem ser acompanhados na Figura 54, seguindo a correspondência alfanumérica das tabelas anteriores.

Figura 54 - Fator de emissão de CO₂ por tonelada de tora processada (kgCO₂/t) em serrarias da região Amazônica e média admitida na pesquisa.

Fonte: Katia Punhagui (em fase de elaboração)³⁰ e INEE (2003)

Emissão de CO₂

por consumo energético na serragem =
6,5 kgCO₂/t a 68 kgCO₂/t de tora

6.3 Transporte da madeira

Considerando o produto final de madeira, há cinco etapas de transporte que podem ser listadas no ciclo de vida: (a) da floresta para a serraria; (b) da serraria ao beneficiamento; (c) do beneficiamento para o depósito; (d) do depósito para o consumidor; (e) após o fim da vida útil do produto, para sua destinação final (Figura 55). No caso do produto serrado, definiu-se a existência apenas das etapas floresta → serraria → mercado consumidor, podem este último estágio ser o beneficiamento, depósito ou loja, ou mesmo o próprio consumidor final.

³⁰ Energia incorporada e CO₂ no processo produtivo de casas de madeira, tese de autoria de Katia Punhagui, a ser defendida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

Figura 55 – Etapas de transporte da madeira serrada da Amazônia.

De forma geral, os fatores de influência direta no consumo de combustível são constituídos por: tipo de transporte; tecnologia, eficiência e manutenção do veículo; tipo de combustível; capacidade de carga do veículo e peso da carga transportada; distância percorrida; topografia, condições e geometria do percurso; condições de fluxo do tráfego; condições climáticas no trajeto; hábitos do condutor; entre outros aspectos (Kamakaté; Schipper, 2009; Ruzzenenti; Basosi, 2009).

O tipo de transporte é um fator determinante e, no caso brasileiro, observa-se a predominância do modal rodoviário no deslocamento de produtos (DNIT, 2007), que apresenta o maior consumo energético e emissão de CO₂ por unidade de carga transportada³¹ em comparação com o transporte hidroviário ou ferroviário. Para os demais fatores de influência direta no consumo energético, há diferentes características para cada etapa de transporte da madeira serrada e, por essa razão, estas foram analisadas separadamente entre transporte de toras, que seria a primeira etapa, entre floresta e serraria; e transporte de madeira serrada, a segunda etapa, entre serraria e mercado consumidor.

Na etapa de transporte entre floresta e serraria, a carga é composta por toras saturadas de água e com casca. Deslocamentos típicos das toras na Amazônia podem ser assumidos como: longas distâncias, com veículos em condições inadequadas de manutenção e com excesso de carga para sua capacidade, conforme demonstraram imagens, vídeos e artigos consultados em pesquisa iconográfica (Google Images, 2011; Google Videos, 2011), conforme ilustrado em Figura 56, Figura 57 e Figura 58.

³¹ A relação de consumo de energia seria de 5 : 10 : 96 (Fialho, 2010), respectivamente para o consumo energético dos modais hidroviário, ferroviário e rodoviário; e de 1 : 1,4 : 4,9 (Fialho, 2007), em emissão de CO₂, segundo dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários do Brasil.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 56 – Diferentes cenários de condições das estradas, tipos de veículos e quantidade de carga no transporte da madeira em tora.

Fonte: site Revista Época (a); Greenpeace (b); extraído de vídeo Um pedaço do meu Brasil.wmv (c); site: www.divulgarciencia.com/categoria/amazonia (d); site Navegador MT (e); site República Federativa do Brasil (f)

(a)

(b)

Figura 57 - Bufete (sucata de caminhão) utilizada no transporte da madeira.

Fonte: Oscar Cabral - Veja On Line (a); site Transparência Rondônia (b)

(a)

(b)

Rodovia BR 364.

(c)

(d)

Figura 58 - Volume de toras no transporte da madeira.

Fonte: site Contilnet (a); extraído de vídeo Um pedaço do meu Brasil.wmv (b); extraído de Borelli et al (2012) (c); extraído de <http://buritisro.blogspot.com.br/2012/03/tora-cai-de-caminhao-e-esmagamotorista.html> (d)

As características de deslocamento entre floresta e serrarias estão diretamente relacionadas com a presença de estradas e rodovias (Asner et al., 2006). O ponto de acesso à floresta tem início em estradas existentes, abertas em atividades anteriores de exploração. Segundo Uhl et al (1997), a presença de rodovias exerce grande influência também na degradação da floresta, isso porque, quanto maior a acessibilidade da floresta pela presença de vias para escoamento das toras, maior a área florestal passível de exploração pela indústria madeireira, devido ao menor custo com transporte para a serraria.

A abertura de novos caminhos aumenta constantemente as distâncias percorridas até o limite da viabilidade econômica da ação. Segundo Johns; Barreto e Uhl (1996), as toras de alto valor eram transportadas por até 100 km até as serrarias. Com o tempo, as serrarias vão sendo transferidas para novas fronteiras de exploração, com os objetivos de vencer o esgotamento de madeiras de interesse comercial na região e minimizar os deslocamentos (INPE, 2008). Uma alternativa em regiões às margens dos rios é o uso do transporte fluvial, realizado por meio de balsas ou jangadas (Figura 59), que permite alcançar áreas de difícil acesso terrestre e possibilita maior facilidade de transporte de cargas ilegais³² (Globo, 2009). Esse tipo de transporte também pode ser utilizado entre cidades conectadas por rios.

Figura 59 - Exemplo de transporte de toras por balsa, provavelmente com carga de coníferas

Fonte: (a) e (b) site Globo Amazônia

Foi possível identificar pela pesquisa iconográfica (Google Images, 2011; Google Videos, 2011) que nessa etapa a carga é geralmente transportada por caminhões de média a grande capacidade de carga (Figura 60). As condições do trajeto dependem da região e município de origem e destino, podendo ser parcial ou integralmente composto por estradas sem infraestrutura e manutenção. As distâncias percorridas entre serraria e mercado consumidor variam de forma significativa.

³² Informação fornecida por Gustavo Müller de Podestá, chefe de fiscalização do IBAMA de Santarém.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 60 - Diferentes modelos de caminhões e condições das estradas

Fonte: www.ariquemes190.com.br/noticia.php?id=2480 (a e b); extraído de vídeo *Um pedaço do meu Brasil.wmv* (c e d); <http://claudia-mt.blogspot.com/2012/01/madeira-ilegal-e-apreendida-na-br-364.html> (e)

Na etapa de transporte de madeira serrada, entre serraria e mercado consumidor, é quando geralmente ocorrem as apreensões de cargas madeireiras, que evidenciam a ilegalidade da atividade. Aliás, o componente de ilegalidade pode ser uma explicação também para as escassas informações sobre o volume total de madeira transportado no Brasil.

Para a quantificação do impacto do transporte na produção da madeira nativa serrada, foram levantadas informações de distâncias de transporte da madeira no Brasil, veículos utilizados e peso de carga transportada, além de consumo médio de combustível do veículo.

6.3.1 Distâncias de transporte da madeira Amazônica no Brasil

No contexto brasileiro, a variável da distância possivelmente figura como o principal fator de sensibilização no consumo energético por transporte devido às dimensões continentais do país e o emprego predominante do modal rodoviário, não apenas no caso da madeira, mas para o transporte de cargas em geral. No caso da madeira serrada Amazônica esse fator é especialmente importante, já que os principais mercados consumidores estão localizados a longas distâncias da floresta (IBAMA, 2007).

A madeira nativa Amazônica é um produto de abrangência nacional e internacional. Grande parte da madeira extraída é destinada, no mercado nacional, à região Sudeste e Sul (IBAMA, 2007). No caso da exportação, os principais destinos são EUA, China e França (Pereira et al., 2010). A movimentação da madeira Amazônica e a escala do volume transportado estão representadas de forma esquemática na Figura 61. Optou-se por considerar apenas o transporte nacional, pela ausência de informações de deslocamentos internacionais, realizado por navios de carga.

Os principais pontos brasileiros de origem e destino das cargas de madeira utilizados nesse trabalho foram obtidos a partir da base de dados do IBAMA (2007), que representa a licença obrigatória para transporte de produtos e subprodutos florestais de origem nativa no Brasil. O relatório do IBAMA consolida dados de origem, destino e volume relativos aos DOFs fornecidos para transporte de toras e madeira serrada³³. Os dados da análise referem-se ao período de janeiro a dezembro de 2007³⁴. As informações de distâncias entre municípios foram extraídas da ferramenta Google Maps, com uso da simulação de veículo particular, e

³³ As duplas de cidade origem-destino foram consideradas como trajetos realizados diretamente entre as duas cidades, sem paradas intermediárias para transbordo, alteração no peso da carga ou no tipo de transporte, seguindo prescrição da Instrução Normativa 112: “Art. 15. Na hipótese de produtos e subprodutos florestais transportados por diversos veículos, e um único documento fiscal, deve ser emitido um DOF específico para cada veículo, e acompanhados do respectivo documento fiscal ou cópia.” (IBAMA, 2006b).

³⁴ O Relatório DOF 2007 foi utilizado como referência por ser a última consolidação anual de dados publicada pelo IBAMA. O relatório mais recente agrupa parcialmente dados de 2008, não incorporando o mês de dezembro. Devido à descentralização das informações do documento não foram mais disponibilizados os relatórios anuais.

escolhido o menor valor de distância dentre as alternativas apresentadas pelo programa. Com base nesses dados, foram identificados os principais deslocamentos por volume de carga. Demais referências foram apresentadas como comparativos dos resultados obtidos.

Figura 61 – Fluxo esquemático de origem, destino e escala do volume de madeira transportado internamente e a escala de madeira exportada.

Fonte: Geografia para todos apud Atlas do Brasil (2005)

6.3.1.1 Distância de transporte de toras

De acordo com a base de dados do Ibama (2007), teriam sido transportados legalmente no Brasil pouco menos de 1,3 milhões de metros cúbicos de madeira em toras em 2007. Originaram dos estados da região Amazônica, 68% do total nacional de tora, com destaque para os estados de Amazonas, Acre e Roraima (Tabela 22). Com relação aos destinos da madeira em toras, os principais destinos foram os próprios estados de Amazonas (397.032 m³) e Acre (269.212 m³), além do estado de Rondônia (75.624 m³). No caso das toras há grandes volumes transportados dentro de um mesmo município, porém não há estimativa de distâncias para esses deslocamentos.

Tabela 22 - Principais estados de origem da madeira em tora Amazônica.

Origem	Volume (m³)	Massa (t)	%
Total Brasil	1.297.196	1.478.804	100
Subtotal Origem Amazônica	883.948	1.007.701	68
AM + AC + RR	791.764	902.611	61
Amazonas (AM)	463.253	528.108	36
Acre (AC)	260.116	296.532	20
Roraima (RR)	68.395	77.970	5

Fonte: IBAMA (2007)

A partir da base de dados do Ibama (2007), a distância média para o transporte de toras foi estimada em função das cidades origem-destino com deslocamentos que envolveram cargas totais maiores que 4.000 m³, sendo a quilometragem estimada pela ferramenta Google Maps³⁵. A distância média ponderada pela massa totalizou 62 km, com desvio médio de ± 4 km. Foram excluídos da contabilização os deslocamentos que podem ser realizados por transporte fluvial, como nos casos em que as cidades estavam situadas às margens de rios.

Outra estimativa de distância percorrida com as toras foi quantificada por Pereira et al (2010), que estimam o deslocamento médio de toras entre floresta e serraria na região Amazônica em 117 km. O autor apresenta composições de percurso por diferentes tipos de pavimentação das estradas, sendo que na média 36% do volume de madeira seja transportado em estradas cobertas com piçarras e 30% em estradas de terra conforme apresentado na Tabela 23. Este também estima o deslocamento médio por vias fluviais em 81 km, com máxima identificada em 400 km no estado do Pará (Pereira et al., 2010).

A distância de 62 km calculada segundo a base do Ibama (IBAMA, 2007) refere-se a toras deslocadas com autorização de transporte. Esse valor pode estar subestimado com relação a distâncias de transporte da exploração convencional, pois não arcando com despesas de documentação e legalização da atividade, a obtenção de madeira em maiores distâncias pode ser viável economicamente. Por essa razão, considerou-se a distância de 117 km (Pereira et al., 2010) como típica do transporte de toras.

³⁵ Para municípios não cortados por estradas oficiais, a distância de transporte foi estimada a partir da estrada mais próxima identificada no mapa.

Tabela 23 - Distância média de transporte e composição do trajeto por volume de madeira em tora, para cada estado da região Amazônica, em 2009

Estados	Distância média (km)	Estradas asfaltadas	Estradas piçarradas	Estradas não piçarradas	Vias fluviais
	km	%	%	%	%
Acre	117	78	12	10	-
Amapá	26	1	57	18	23
Amazonas	56	4	29	35	31
Maranhão	164	12	56	32	-
Mato Grosso	105	9	54	36	-
Centro	131	17	64	19	-
Norte	86	8	53	39	-
Noroeste	87	3	46	51	-
Pará	134	13	23	43	21
Centro	112	1	39	60	-
Estuário	213	1	6	7	87
Leste	99	19	35	36	10
Oeste	108	38	2	51	10
Sul	121	3	33	63	1
Rondônia	87	24	52	24	-
Centro	47	7	57	36	-
Norte	85	34	49	18	-
Sudeste	125	30	50	20	-
Roraima	107	35	52	13	-
Média	117	19	36	30	15

Fonte: Extraído de Pereira et al. (2010)

6.3.1.2 Distância de transporte de produtos serrados

Do total de 7,6 milhões de metros cúbicos de madeira serrada transportados com DOF no Brasil, cerca de 6,1 milhões de metros cúbicos tiveram origem nos estados da região Amazônica. Os estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia forneceram 64% do total de madeira brasileira (Tabela 24) e 79% da madeira serrada Amazônica. A madeira serrada com origem no Pará percorreu em média 1.886 km, a partir do estado do Mato Grosso foi transportada por 1.977 km e de Rondônia, 2413 km.

Tabela 24 - Principais estados de origem da madeira serrada Amazônica.

Origem	Volume (m³)	Massa (t)*	%	Distância (km)**
Total Brasil	7.609.903	5.250.833	100	
Subtotal Origem Amazônica	6.135.840	4.233.730	81	
Subtotal rodoviário	5.322.451	3.672.491	70	1.956
PA + MT + RO	4.849.539	3.346.182	64	2.043
Pará (PA)	2.108.299	1.454.726	28	1.886
Mato Grosso (MT)	1.568.333	1.082.150	21	1.977
Rondônia (RO)	1.172.907	809.306	15	2.413

* dados fornecidos em volume de madeira e convertidos em massa de carga pelo fator 0,69 t/m³

** Valores calculados por média ponderada de carga transportada e distância.

Fonte: IBAMA (2007)

Os principais destinos externos à própria Amazônia foram São Paulo, que absorveu 869,5 mil toneladas; Paraná, que recebeu 427,4 mil toneladas e Minas Gerais, com 390,4 mil toneladas (IBAMA, 2007). A Figura 62 ilustra os principais estados de destino da madeira serrada originária dos estados de Mato Grosso, Pará e Rondônia. As distâncias apresentadas foram calculadas por média ponderada, considerando distância e volume de carga, a partir de todos os deslocamentos entre estados.

Figura 62 - Distância média ponderada e volume total dos principais estados de destino da madeira serrada legalmente transportada em 2007 com origem em Mato Grosso (a), Pará (b) e Rondônia (c)

Os dados do Ibama (2007) não informam o tipo de transporte utilizado no deslocamento entre municípios. Os pares de município com origem nos estados amazônicos totalizaram 28.442 informações³⁶. Todos os deslocamentos para estados da região Centro Oeste, Nordeste, Sudeste e Sul foram considerados rodoviários. Os filtros para seleção dos deslocamentos a serem analisados foram: (1) volumes entre municípios maiores que 3.000 m³; (2) distâncias maiores que 1.000 km para volumes entre 2.000 m³ e 3.000 m³; (3) valores superiores a 5 milhões de tonelada-quilômetro (t.km). Os deslocamentos que seguiam as regras eram simulados pela ferramenta Google. Admitindo que parte dos deslocamentos foram realizados por vias fluviais, analisaram-se algumas possibilidades de percurso, em que as cidades são conectadas por rios, com o objetivo de retirar esses registros da quantificação a fim de evitar distorções. Adicionalmente, municípios não cortados por estradas oficiais não tiveram a distância calculada pelo programa. Nestes casos foram identificados os volumes superiores a 2.000 m³ e a distância foi estimada a partir da estrada mais próxima ao município identificada no mapa.

A distribuição da quantidade de registros, por faixas de distância, está expressa na Figura 63. Grande parte do volume de madeira serrada, com origem na Amazônia, percorreu entre 1.500 e 3.000 km para atingir o mercado consumidor, ressaltando-se que um número maior de deslocamentos pode existir ao longo do processo produtivo, pois parte da madeira é destinada a centros de distribuição e serrarias de beneficiamento.

Figura 63 - Histograma do número de registros da madeira serrada de origem Amazônica, a partir das distâncias de transporte

Fonte: Ibama (2007) e Google Maps (2011).

³⁶ Total nacional: 40.447 pares de municípios origem-destino de madeira serrada.

A distância média de transporte da madeira serrada, ponderada pelo volume, entre os registros assumidos como rodoviários, foi de 1.956 km³⁷. O maior deslocamento identificado, entre Acrelândia (AC) e Chuí (RS), apresenta a distância de 4.362 km. Em estudo realizado na Noruega, a distância de transporte de produtos de madeira apresenta de 220 km a 250 km, não sendo relatado o tipo de transporte na referência primária, que foi assumido pelo autor como caminhão (Fossdal, 1995 apud Gustavsson; Sathre, 2006); e de 250 km a 350 km, em estudo na Suécia (Björklund; Tillman, 1997 apud Gustavsson; Sathre, 2006). Os valores denotam a diferença entre países quanto à distância percorrida com produtos de madeira.

Na base de dados do Ibama (2008), identificou-se que grandes volumes de madeira serrada são destinados a cidades portuárias, o que pode significar que parte da madeira terá agregado mais um deslocamento, provavelmente de destino internacional, através de navios de carga.

6.3.2 Veículos rodoviários de transporte da madeira nativa e capacidade de carga

Para a caracterização dos veículos e cargas transportadas foram utilizados como fontes de informação: nove empresas de comercialização de produtos de madeira (em fase de elaboração)³⁸ e banco de imagens e notícias de mídia em sites de busca. As informações obtidas junto às empresas refletem uma amostra do padrão de veículos empregados, cargas médias e consumo energético do setor. As empresas foram entrevistadas no período do terceiro trimestre de 2010 e forneceram dados do consumo energético no transporte. De forma complementar, foi realizada busca de imagens e vídeos por meio da ferramenta Google Images e Google Videos, visando ilustrar o estudo também com relação às condições de veículos, volumes transportados e pavimentação de rodovias da parcela não expressa nos levantamentos diretos com empresas formalizadas.

Adotou-se como premissa que o veículo realiza o transporte com sua capacidade máxima de carga, seguindo valor estabelecido em legislação de peso bruto total combinado (PBTC), que inclui o peso do caminhão, dos equipamentos de apoio mecânico (combinação) e da carga transportada. As categorias de veículo estabelecidas pela legislação nacional, sua nomenclatura e PBTC admitido, constam no Anexo A. As categorias de veículos empregadas nos cenários e as cargas máximas estão descritas na Tabela 25.

³⁷ Os volumes transportados dentro de um mesmo município não foram considerados.

³⁸ Energia incorporada e CO₂ no processo produtivo de casas de madeira, tese de autoria de Katia Punhagui, a ser defendida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

Tabela 25 - Peso bruto total combinado (PBTC) por categoria de caminhão.

Tipologia do veículo	PBTC (t) *	Modelo da Composição
Caminhão	16	A
Caminhão trucado	23	B
Caminhão trator e semirreboque	41,5	C
Bitrem articulado	57	D

* tolerância de + 5% sobre o PBT permitida em legislação não considerada (Res. CONTRAN 258)

Fonte: Resoluções CONTRAN 12 (1998); 184 (2005); 210 (2006) e 326 (2009) apud (DNIT, 1998)

Para estimativa de carga transportada, foram selecionadas quatro categorias usuais, conforme verificado nos levantamentos de imagens. Os modelos de composição do estudo são: (A) caminhão sem composição com dois eixos; (B) caminhão trucado; (C) caminhão trator e semirreboque; (D) Bitrem articulado. Informações dos modelos foram obtidas em fichas de especificações técnicas dos veículos rodoviários, disponíveis em site de fabricante de caminhões e implementos rodoviário. Os quatro modelos de veículos: Figura 64, Figura 65, Figura 66 e Figura 67 (sem escala) representam diferentes possibilidades de transporte de cargas brasileiras e foram utilizados para simular pesos máximos de madeira transportada por categoria de veículo.

Figura 64 - Modelo A (4x2) - Caminhão sem composição com dois eixos.

Fonte: VOLVO (2011)

Figura 65 - Modelo B (6x4) - Caminhão trucado sem composição com três eixos.

Fonte: VOLVO (2011)

Figura 66 - Modelo C (6x4) - Caminhão trator e semirreboque.

Fonte: VOLVO (2011); GUERRA (2011)

Figura 67 - Modelo D (6x4) - Bitrem articulado

Fonte: VOLVO (2011); GUERRA (2011)

A quantidade máxima de carga por modelo está descrita na Tabela 26, que especifica os dados técnicos dos veículos. Para essa quantificação foram feitas estimativas diferentes para os modelos A e B, sem composição, e C e D, com semirreboque e bitrem, respectivamente.

Foi admitido que, para transporte rodoviário da madeira serrada da Amazônia, a capacidade limite depende do peso da carga e não do volume. Nos modelos A e B o peso máximo de carga foi estimado a partir do dado de peso bruto total³⁹ permitido para o veículo, excluindo-se o peso do veículo e o peso do combustível em um tanque cheio. Nos modelos C e D foi

³⁹ PBT é o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, constituído da soma do peso do caminhão com o peso da carga.

considerada a carga máxima de tração⁴⁰ para cada veículo, excluindo-se o peso do veículo, da composição e o peso máximo do combustível. Desta forma, os modelos representam veículos de diferentes portes de tração e carga, com capacidades entre 9 e 55 toneladas de carga. Os modelos A, B, C e D compõem os cenários de transporte de toras e madeira serrada.

Tabela 26 - Especificações técnicas dos quatro modelos de veículos de transporte de carga e quantificação da carga máxima total permitida.

	Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
Motor	Volvo VM 4x2R	Volvo VM 6x4R	Volvo VM 6x4R	Volvo FH 6x4T
Combinação			Semirreboque	Bitrem
cavalos	206	310	310	400
kW	152	228	228	294
rpm	2.200	2.200	2.200	1400 a 1800
Cilindrada (L)	4,8	7,2	7,2	12,8
Comprimento (m)	6	8	20	28
Tanque máximo (L)	560	560	560	700
Peso Chassi (t)	5,0	7,2	7,2	8,8
Peso Composição (t)*	1,5	1,5	7,1	13,7
Peso Combustível (t)**	0,48	0,48	0,48	0,60
Peso Bruto Total - legal (t)	16,0	23,0	—	—
Carga Máxima de Tração (t)	—	—	54,0	78,0
Peso Máximo da Carga (t)	9,1	13,8	39,2	54,8

* estimado para modelo A e B; ** densidade do diesel = 0,85 kg/L

Fonte: VOLVO (2011); GUERRA (2011)

6.3.3 Consumo de combustível de veículos rodoviários

Para definição do consumo de combustível dos veículos de transporte de carga, foram levantados dados em revistas especializadas no segmento de veículos de transporte de cargas e pessoas (Transporte Mundial, 2010), entrevistas com empresas de comercialização de produtos de madeira do mercado brasileiro e comunicação governamental.

Dados fornecidos por medida de eficiência do modelo do veículo, em km/L, foram convertidos para a unidade L/t.km, considerando-se capacidade máxima de peso de carga. Os dados primários estão presentes no Apêndice B e os valores de consumo estão especificados na Tabela 27.

⁴⁰ Carga máxima de tração é peso máximo que pode ser transmitido ao pavimento pela combinação de um caminhão-trator, mais semi-reboque ou reboque, e o peso da carga das combinações.

Tabela 27 - Consumo de diesel por tonelada-quilômetro, segundo referências nacionais*

Referência	Consumo (L/t.km)	Categoria ou modelo do veículo
Dados macro		
MME/FIPE (2009)	0,082	Média brasileira
ANTAQ (2008)	0,041	Transporte rodoviário
Revista especializada (teste)		
	0,015	Volvo FH 520 6x4
	0,014	Volvo FH 440 6x2
	0,013	Mercedes Benz Axor 2640 6x4
	0,012	Agrale 13000 4x2
	0,008	Mercedes Benz Axor 2640 6x4
	0,008	Volvo FH 520 6x4
	0,006	Volvo FH 440 6x2
	0,006	Mercedes Benz Axor 2640 6x4
	0,006	Volvo FH 520 6x4
	0,004	Volvo FH 440 6x2
Madeireiras (autodeclarado)		
Empresa A	0,022	Caminhão
Empresa B	0,018	Caminhão
Empresa C	0,018	Caminhão (com composição)
Empresa D	0,017	Caminhão (novo)
Empresa D	0,016	Bitrem
Empresa E	0,015	Caminhão
Empresa F	0,014	Carreta
Empresa C	0,013	Caminhão (com composição)
Empresa E	0,011	Caminhão
Empresa A	0,011	Bitrem
Empresa G	0,009	Caminhão
Empresa H	0,008	Caminhão
Empresa B	0,007	Romeu e Julieta (caminhão trucado + reboque)
Empresa G	0,007	Carreta
Empresa I	0,006	Caminhão

*Os dados primários constam no Apêndice B.

As empresas A, B, C e F comercializam também madeira plantada.

Fonte: baseado em (EPE/MME, 2010, 2010); (Oliva, 2008); levantamentos de Kátia Regina Garcia Punhagui (em fase de elaboração).

O consumo de 0,082 L/t.km consiste na estimativa de média de transporte de cargas no Brasil, calculada a partir do consumo total de diesel no sistema rodoviário, $34,6 \times 10^9$ litros de diesel (EPE/MME, 2010), dividido pela tonelagem-quilômetro total transportada, $420,6 \times 10^9$ t.km (EPE/MME, 2010), ambos para o ano de 2009. Este é um valor que envolve muitas aproximações, pois consiste em dados nacionais macro e embute erros como, por exemplo, o consumo de parte do diesel em tratores, colheitadeiras e motores estacionários e os desvios nas estimativas de carga brasileira transportada e de distância percorrida. Sua inclusão tem a intenção de fornecer uma referência teórica de consumo unitário máximo brasileiro, mesmo que pouco típico.

O valor de 0,41 L/t.km foi retirado de comunicação da ANTAQ, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Oliva, 2008), no formato de apresentação de slides, que cita como fonte o Departamento Norte Americano de Transportes. Apesar de superior aos demais valores subsequentes, esse dado foi adotado como máximo consumo no transporte de toras, devido à ausência de referências específicas.

Os dados das empresas madeireiras, contempladas no levantamento, foram obtidos por autodeclaração, não tendo sido levantados ou verificados em bases científicas (em fase de elaboração)⁴¹. O modelo de veículo utilizado segue descrição fornecida pelos entrevistados. Localizadas em estados do Sudeste e Sul do Brasil as madeireiras trabalham tanto com produtos de floresta nativa como de floresta plantada. Adquirem madeira nativa principalmente dos estados de Pará, Mato Grosso e Rondônia, sendo transportadas por meio de caminhões sem composição, carretas e bitrens; no caso da plantada, tem origem nos estados de Minas Gerais e Paraná, sendo geralmente transportadas por caminhões com composição de cargas (bitrem, Romeu e Julieta).

Das quinze referências de consumo listadas, oito dizem respeito ao transporte de madeira nativa e sete de madeira plantada. Não foram identificadas diferenças significativas no consumo de diesel entre madeira nativa e madeira plantada na análise por massa transportada. Certamente há diferenças no que tange ao volume transportado e composição de veículo, mas afirmações conclusivas não podem ser feitas a partir dos dados disponíveis. O consumo informado pelas empresas madeireiras refere-se ao transporte de madeira serrada, com a maior parte do percurso em rodovias asfaltadas ou em estradas com condições de fluxo mais adequadas em comparação ao transporte de toras na região Amazônica.

Os testes de consumo realizados pela revista especializada são balizadores do melhor cenário: veículos novos e tecnologicamente eficientes, com grande capacidade de carga, sendo deslocados por rodovias de manutenção adequada. Todos os testes foram realizados

⁴¹ Energia incorporada e CO₂ no processo produtivo de casas de madeira, tese de autoria de Katia Punhagui, a ser defendida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

em deslocamento de ida e retorno entre a região metropolitana de São Paulo (SP) e cidades do litoral paulista. A trajetória incluiu subida e descida da serra, com fornecimento de consumo de energia para as duas condições e ao nível do mar. Certamente, o consumo energético para esses modelos de veículos não exprimem a realidade típica do transporte de madeira Amazônica, mas foram incluídos como parâmetro mínimo de consumo, visto que longos trechos percorridos em rodovias em condições adequadas de manutenção podem equilibrar o elevado consumo energético em estradas em más condições.

Em razão das diferentes condições de transporte entre toras e madeira serrada, serão assumidos diferentes fatores de consumo para cada etapa de transporte. Logicamente, parte do percurso do produto madeira serrada é caracterizado por estradas e caminhos de terra, os mesmos pelos quais o caminhão com toras percorreu para chegar à serraria. Esses caminhos podem ser considerados como uma parcela pequena do trajeto total frente à distância média entre serrarias e mercado consumidor.

Para a faixa de consumo de diesel do transporte da madeira serrada, assumiu-se o conjunto de dados das empresas madeireiras, em seus valores máximo e mínimo. No caso do transporte de toras, o valor de consumo mínimo foi arbitrado como sendo a média do valor de consumo estabelecido para madeira serrada; o consumo máximo foi definido como o valor divulgado por Oliva (2008). A Figura 68 ilustra a faixa de consumo citada pelas referências listadas na Tabela 27 e a faixa de consumo definida para toras e madeira serrada.

Figura 68- Faixa do fator de consumo de combustível para transporte de toras de madeira serrada (L/t.km), com base nas referências

A faixa de consumo adotada para o transporte das toras foi estimada entre 0,013 L/t.km e 0,041 L/t.km, com mediana de 0,017 L/t.km; e para o transporte da madeira serrada entre 0,006 L/t.km e 0,022 L/t.km, com mediana de 0,013 L/t.km. A adoção dessa ampla faixa tem o objetivo de incorporar as diversas características de trajeto e veículos existentes no transporte da madeira no país, assim como os demais fatores de variação levantados.

Outras fontes de dados foram encontradas, mas não incorporadas à faixa estipulada no estudo pela ausência de parâmetros objetivos de peso de carga que permitisse o cálculo do consumo. Na metodologia da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, o consumo de diesel de caminhões, com base na estimativa para veículos europeus de carga pesada seria de 3,3 km/L e 29,9 L/100km (Álvares Jr; Linke, 2005). O IPCC traz também a estimativa para transporte de cargas leves: 9,8 km/L; 10,9 L/100 km (IPCC, 1996).

6.3.4 Emissão de CO₂ pelo consumo energético no transporte da madeira Amazônica

Com base nas faixas de consumo energético do transporte da madeira (L/t.km) e na emissão de CO₂ da combustão do diesel (tCO₂/L), foi estimada a emissão por unidade de massa-distância deslocada (gCO₂/t.km). Com emissão de 2.799 gCO₂/L, o fator de emissão a partir das faixas de consumo definidas seria de 35,0 gCO₂/t.km a 116,0 gCO₂/t.km, com mediana de 47,6 gCO₂/t.km para toras; e de 16,8 gCO₂/t.km a 61,6 gCO₂/t.km, com mediana de 35,0 gCO₂/t.km para madeira serrada.

Emissão de CO₂

por consumo energético no transporte de toras =
35 gCO₂/t.km a 116 gCO₂/t.km

Emissão de CO₂

por consumo energético no transporte de madeira serrada =
16,8 gCO₂/t.km a 61,6 gCO₂/t.km

Como parâmetros da quantificação realizada, foram levantadas referências internacionais de consumo e emissão de CO₂ em literatura (Kamakaté et al., 2009) e com sites de organizações não-governamentais (GHGProtocol, 2011; IFEU/RMCon, 2011; NTM, 2011; VVT, 2011). Segundo essas fontes, a faixa de emissão de CO₂ pode ser assumida entre 34 gCO₂/t.km e 322 gCO₂/t.km (Tabela 28), com larga escala de diferença no resultado devido às características de transporte.

Tabela 28 - Emissão de CO₂ por transporte (gCO₂/t.km), segundo referências internacionais. Dados diretamente fornecidos pelos autores estão em negrito.

Referência	Consumo ^(a) MJ/t.km ^(b)	Emissão ^(a) gCO ₂ /t.km	Categoria veículo ou país
GHG Protocol (2011)			
		203	Carga em longa distância
		185	Carga em curta distância
Kamakaté e Schipper (2009)			
	4,3	322	Transporte de cargas no Japão
	4,0	299	Transporte de cargas no Reino Unido
	3,1	232	Transporte de cargas na França
	2,5	178	Transporte de cargas nos Estados Unidos ^(c)
	1,7	127	Transporte de cargas na Austrália
NTM (2011)			
		252	Caminhão de pequeno porte
		177	Caminhão de médio porte
		124	Caminhão grande porte
		63	Caminhão trator com semirreboque
		58	Caminhão trator com reboque grande
		57	Caminhão com semirreboque
IFEU/RMCON (2011)			
		115	Cargas leves (light goods) ^(d)
		72	Cargas médias (average goods) ^(d)
		60	Cargas pesadas (heavy goods) ^(d)
VVT (2011) - Rodoviário			
		58	Caminhão não articulado em rodovias ^(e)
		44	Caminhão não articulado em rodovias ^(f)
		43	Caminhão com reboque em rodovias ^(g)
		34	Caminhão com reboque em rodovias ^(h)
VVT (2011) - Área urbana			
		95	Caminhão não articulado em área urbana ^(e)
		76	Caminhão com reboque em área urbana ^(f)
		74	Caminhão não articulado em área urbana ^(g)
		61	Caminhão com reboque em área urbana ^(h)

(a) Dados diretamente fornecidos estão em negrito; (b) 1 litro de diesel = 40,95 MJ = 3.063 gCO₂; (c) EUA: CO₂ gasolina = 95% CO₂ diesel (USE, 2010); (d) inclui ciclo de vida do combustível; (e) peso bruto: 32,5 t (70% carga: 17,5 t); (f) peso bruto: 40 t (100% carga: 25 t); (g) peso bruto: 48 t (70% carga: 28 t); (h) peso bruto: 60 t (100% carga: 40 t)

O valor máximo seria a média nacional do transporte de cargas no Japão. Segundo Kamakaté e Schipper (2009) razões para esse alto fator devem-se ao emprego de veículos de pequeno porte, de dimensões até 4,7 m de comprimento, 1,7 m de largura e 2,0 m de altura, que participam em 58% do transporte de cargas e, além disso, os deslocamentos têm características de curta distância em topografia acidentada. Baixos fatores de emissão foram extraídos de VVT (2011) e NTM (2011), ferramentas da Finlândia e Suécia, países com trajetos de características favoráveis ao menor consumo de energia: topografia plana, manutenção constante na pavimentação, ausência de engarrafamentos, veículos com pouco tempo de uso, etc.

O GHG Protocol (2011), referência internacional para o cálculo de emissões de gases de efeito estufa, estabelece a emissão em 185 gCO₂/t.km para o transporte de cargas de longa distância e 203 gCO₂/t.km para curtas distâncias. Comparativamente aos demais valores encontrados, estes podem ser considerados conservadores. Essa postura pode ser justificada pelo objetivo de que seja estabelecida uma ferramenta de utilização internacional, ou seja, que englobe a diversidade de contextos de transporte existentes nos diferentes países. Por sua representatividade no contexto internacional, a referência do GHG Protocol foi empregada como parâmetro comparativo aos dados nacionais nesta leitura.

Kamakaté e Schipper (2009) mostram a existência de diferença nos fatores de emissão ao se comparar países. Os países apresentados são membros da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OECD), tendo sido selecionados, segundo os autores, por representarem a intensidade energética desses países.

Os dados de IFEU/RMCON (2011) foram obtidos em uma ferramenta chamada EcoTransIT, desenvolvida por uma organização não governamental por iniciativa de um grupo de empresas de transporte de cargas ferroviárias, com o objetivo de analisar o impacto do transporte de cargas. Por essa razão, os dados primários referem-se às categorias de peso de carga (leves a pesadas) e locais de origem e destino, demonstrando o impacto nas emissões por densidade de carga. Nessa análise, o resultado de consumo traz grandes variações devido ao consumo de combustível para o deslocamento do próprio caminhão, o que pode ser considerado um consumo mínimo fixo que independe da carga transportada.

VVT (2011) e NTM (2011) são referências que expressam a redução unitária na emissão em função do aumento do peso de carga, tanto para um mesmo caminhão com diferentes limites de carga (70% e 100%), quanto para veículos de capacidade diferente; a tendência é menor emissão de CO₂ por unidade de carga transportada. Constam também como referência dados de transporte em trechos urbanos.

Para estabelecer uma comparação com outros modais de transporte, as emissões de CO₂ por transporte através de ferrovias poderiam ser estimadas entre 44,8 gCO₂/t.km de carga⁴² e 48,1 gCO₂/t.km de carga (Oliva, 2008); e por hidrovias entre 20 gCO₂/t.km de carga (Oliva, 2008) e 33,4 gCO₂/t.km de carga (Fialho, 2010).

A Figura 69 compara os resultados adotados no presente estudo para transporte de toras e de madeira serrada com os dados das referências internacionais levantadas.

Figura 69 - Comparativo entre faixa de fator de emissão de CO₂ (gCO₂/t.km) adotado para transporte de toras e de madeira serrada e referências internacionais

Os fatores de emissão de CO₂ por tonelada-quilômetro transportada trazem uma faixa de variação de 35 gCO₂/t.km a 116 gCO₂/t.km para toras e 17 gCO₂/t.km a 62 gCO₂/t.km para madeira serrada, que contemplam as diversas características que afetam o consumo de combustível no contexto do transporte da madeira no Brasil, como condições de estradas, modelo de veículos, hábitos dos condutores, entre outros. A Figura 70 demonstra a parcela de variação entre os fatores de CO₂ mínimo, mediano e máximo, para transporte de toras e madeira serrada.

⁴² Adaptado de (Transnordestina Logística, 2010)

Figura 70 - Análise de sensibilidade da emissão de CO₂ (gCO₂/t.km), em função do fator de emissão de CO₂ para transporte de tora e de madeira serrada

Como a emissão de CO₂ está diretamente relacionada com o peso da carga, esta é diretamente influenciada pela densidade de espécie da madeira, que no caso da nativa é bastante variável, e pela umidade da madeira. A Figura 71 ilustra a diferença de emissão de CO₂ em função da densidade, com valor médio para densidade aparente de 0,81 g/cm³ correspondendo a 100%. Pode-se perceber que espécies como ipê, maçaranduba, angelim e jatobá, bastante comercializadas exatamente por sua alta densidade, implicam em maior emissão de CO₂ comparadas às espécies de menor densidade, em função do maior peso a ser transportado para um mesmo volume.

Figura 71 - Análise de sensibilidade da emissão de CO₂ (gCO₂/t.km), em função da densidade da madeira, exemplo do produto serrado.

Considerando o peso referente à água livre na madeira, madeiras verdes elevam o impacto na emissão de CO₂, pois há consumo energético devido ao deslocamento da massa de água contida na madeira. O ideal seria o transporte de madeira com umidade em equilíbrio com a umidade do ar. Além da água, a presença de cascas e partes não comerciais de toras também geram emissões de CO₂ para deslocamento de material sem aproveitamento na cadeia produtiva.

6.3.4.1 Equações básicas

Para o desenvolvimento dos cálculos de emissão de CO₂ pelo consumo energético no transporte da madeira em toras e serrada, equações básicas podem ser aplicadas em função dos dados disponíveis. Caso o consumo total de combustível seja conhecido, o resultado é obtido multiplicando-se esse valor pelo fator de emissão do combustível por litro (Equação A). A emissão total também pode ser estimada sabendo-se o fator de consumo do veículo por unidade de carga transportada, com uso de dados de densidade, volume, distância, e fator de emissão do combustível (Equação B). Para se utilizar fatores de emissão por tonelada-quilômetro, são necessários dados de peso da carga de madeira e distância (Equação C) ou dados de densidade, volume e distância (Equação D). A partir das variáveis, foram criados cenários de quantificação das emissões de CO₂.

$$E_{CO_2} = C f_e \quad \text{(Equação C)}$$

Em que:

- E_{CO_2} é a massa emitida de dióxido de carbono em t
- C é o volume de combustível em L
- f_e é o fator de emissão do combustível em tCO₂/L

$$E_{CO_2} = d V L f_c f_e \quad \text{(Equação D)}$$

Em que:

- E_{CO_2} é a massa emitida de dióxido de carbono em t
- d é a densidade verde para toras ou aparente para madeira serrada em t/m³
- V é o volume da carga em m³
- L é a distância percorrida em km
- f_c é o fator de consumo em L/t.km
- f_e é o fator de emissão do combustível em tCO₂/L

$$E_{CO_2} = m L f_{e(tk)} \quad \text{(Equação E)}$$

Em que:

- E_{CO_2} é a massa emitida de dióxido de carbono em t;
- m é a massa da madeira transportada em t;
- L é a distância percorrida em km;
- $f_{e(tk)}$ é o fator de emissão de dióxido de carbono por tonelada-quilômetro de carga transportada, (tCO₂/t.km)

$$E_{CO_2} = dVLf_{e(tk m)}$$

(Equação F)

Em que:

- E_{CO_2} é a massa emitida de dióxido de carbono em t
- d é a densidade verde para toras ou aparente para madeira serrada em t/m^3
- V é o volume da carga em m^3
- L é a distância percorrida em km
- $f_{e(tk m)}$ é o fator de emissão de dióxido de carbono por tonelada-quilômetro de carga transportada, ($tCO_2/t.km$)

6.3.4.2 Fatores de sensibilidade da emissão de CO_2 no transporte da madeira

Peso, distância e fator de emissão de CO_2 determinam a intensidade do impacto no transporte, conforme demonstram as equações, porém apresentam incertezas, com impacto significativo no total das emissões. A Figura 72 e Figura 73 ilustra a evolução da emissão de CO_2 no deslocamento da carga, respectivamente para toras e madeira serrada, em função dos três parâmetros conjuntamente.

Figura 72 - Variação na geração total de CO_2 no transporte de madeira em tora, para diferentes fatores de emissão de CO_2

Como exemplo, se admitido o transporte de madeira com um caminhão modelo C, carregado com 35 toneladas de madeira serrada (PBTC ~50 t), verifica-se que a cada 100 km percorridos, que totalizam 5.000 t.km, poderiam ser gerados entre 85 $kgCO_2$ e 310 $kgCO_2$, com mediana de 175 $kgCO_2$.

Figura 73 - Variação na geração total de CO_2 no transporte de madeira serrada, para diferentes fatores de emissão de CO_2

Para cada modelo de veículo de carga selecionado para a pesquisa, foram calculadas as emissões totais de CO_2 , admitindo o transporte da máxima capacidade de carga e o fator mediano de emissão de $35 \text{ gCO}_2/\text{t.km}$ da madeira serrada. A cada 1.000 km percorridos, pode ser estimada a emissão em $0,56 \text{ tCO}_2$ para o modelo A; $0,81 \text{ tCO}_2$ para o modelo B; $1,89 \text{ tCO}_2$ para o modelo C e $2,73 \text{ tCO}_2$ para o modelo D (Figura 74a). A faixa de emissão de dióxido de carbono, para cada tonelada de carga transportada em 1.000 km, consta na Figura 74b.

Figura 74 - Emissão total de CO_2 para cada modelo de caminhão, com uso de fator médio de emissão em percurso de 1.000 km (a) e faixa de emissão (kg $\text{CO}_2/\text{t carga.km}$) para cada modelo de caminhão, considerando carga máxima (b)

Outra variável de influência sobre a emissão de CO₂ é a taxa de ocupação do caminhão. O consumo de combustível total é a soma do consumo associado ao transporte do próprio caminhão e ao consumo para o transporte da carga. De forma geral, os caminhões com composição de carga (articulados) apresentam melhores resultados, pois admitem maior percentual de carga no peso total transportado. Admitindo-se os veículos com carga igual à capacidade máxima, o percentual do peso do caminhão sobre o peso total bruto é de 43%, para o veículo modelo A; 40%, para o modelo B; 27% para o modelo C e 30% para o modelo D. As emissões de CO₂ resultantes do transporte de diferentes parcelas da capacidade máxima de carga estão ilustradas na Figura 75.

Figura 75 - Emissão total de CO₂ no transporte de carga em função da parcela da capacidade máxima de carga para cada modelo de veículo, em percurso de 1.000 km: emissão de CO₂ total (a); emissão de CO₂ por massa de carga (b)

É importante ressaltar que os intervalos apresentados nos resultados refletem as diversas variáveis e as incertezas embutidas em cada parâmetro, com a intenção de incorporar as diferentes características de transporte. O uso de amplos intervalos fornece estimativas aproximadas do consumo de combustível e emissão de CO₂. Levantamentos detalhados de transporte da madeira, visando ao aprimoramento dos dados, seriam necessários para reduzir a margem de incertezas.

6.3.4.3 Cenários típicos de emissão de CO₂ no transporte da madeira

Para a inclusão de dados de transporte no fluxo do material da madeira Amazônica serrada, quantificou-se a emissão total com base em cenários típicos. Com a aplicação de valores típicos nas variáveis das equações, podem ser estimadas as emissões de CO₂ envolvidas no transporte da madeira nas duas etapas existentes na produção da madeira serrada. Para essa estimativa foram selecionados os veículos de modelo B, para toras, e modelo C, para madeira serrada, nos quais foi admitido o peso na capacidade máxima de carga. A madeira foi considerada verde no caso das toras (densidade 1,15 g/cm³) e naturalmente seca para madeira serrada (densidade 0,81 g/cm³), sendo transportada respectivamente por 117 km e 1.956 km. A faixa de variação do fator de emissão foi empregada para ambos. Os resultados constam da Tabela 29.

Tabela 29 – Faixa de emissão total de CO₂ (kgCO₂) e unitária (kgCO₂/m³ e kgCO₂/t) para cenários típicos de transporte de toras e madeira serrada.

	Peso carga	Peso total	Densidade transporte	Volume	Distância média	Fator de emissão	Emissão total	Emissão unitária	Emissão unitária
	t	t	t/m ³	m ³	km	gCO ₂ /t.km	kgCO ₂	kgCO ₂ /m ³	kgCO ₂ /t seca
Tora	13	23	1,15	11	117	116	312	28	40
						48	129	11	17
						35	94	8	12
Serrada	39	54	0,81	48	1956	62	6549	136	197
						35	3697	77	111
						17	1796	37	54

O peso admitido no transporte foi correspondente à umidade do material em cada etapa de deslocamento. Convertendo-se a emissão de CO₂ por metro cúbico para emissão por massa de madeira seca, a emissão no deslocamento seria de 12 kgCO₂/t a 40 kgCO₂/t, mediana de 17 kgCO₂/t para toras e de 54 kgCO₂/t a 197 kgCO₂/t, mediana de 111 kgCO₂/t para madeira serrada. Admitindo-se a extração de 8 t/ha a 60 t/ha de madeira em tora, convertidos em 3 t/ha a 27 t/ha de madeira serrada, estima-se a emissão pelo transporte entre 0,9 tCO₂/ha e 2,2 tCO₂/ha, com mediana de 1,5 tCO₂/ha.

6.4 Panorama geral das emissões de CO₂ por consumo energético

As atividades de extração, processamento e transporte consomem predominantemente energia proveniente de diesel, combustível fóssil que alimenta equipamentos e veículos de transporte. A emissão de CO₂ por consumo energético em cada etapa do processo está expressa na Tabela 30, que consolida dados quantificados ao longo do presente capítulo.

Extração, processamento e transporte de toras referem-se às unidades de massa e volume de toras, enquanto o transporte de madeira serrada refere-se ao próprio produto.

Tabela 30 - Emissão de CO₂ por consumo energético nas etapas de produção

	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.
	kgCO ₂ /t tora			kgCO ₂ /m ³ tora		
Extração	1,7	4,4	8,6	1,2	3,0	5,9
Processamento das toras	6,5	21,4	67,9	4,5	14,7	46,9
Transporte das tora	12,1	16,6	40,0	8,3	11,4	27,6
	kgCO ₂ /t madeira serrada			kgCO ₂ /m ³ madeira serrada		
Transporte madeira serrada	54,0	111,3	197,1	37,3	76,8	136,0

Densidade da madeira seca: 0,69 g/cm³

Para que as emissões das etapas de extração, processamento e transporte de toras sejam atribuídas ao produto serrado, é necessária a quantificação do aproveitamento das toras em produtos serrados. Por isso, as emissões de CO₂ relativas à energia por unidade de madeira serrada são quantificadas no item 7.2, que aborda todo o processo produtivo, inclusive consumo energético.

Em uma abordagem que considera apenas o processo produtivo em si, chamada “berço ao portão”, excluindo-se o transporte da madeira serrada para o mercado consumidor, a emissão de CO₂ seria de cerca de 50% para processamento da madeira, 40% para transporte de toras e 10% para extração de madeira da floresta. Redução da distância de transporte, uso de equipamentos e veículos eficientes e emprego de fonte de energia com baixo fator de emissão de CO₂ reduziriam o impacto pelo consumo energético.

6.5 Energia incorporada na madeira serrada

A energia solar necessária para a constituição do material e a energia do trabalho humano despendida no processamento dos produtos de madeira deveriam ser contabilizados em uma abordagem de energia incorporada. Para a quantificação de gases de efeito estufa, não há qualquer fator de emissão para a absorção da energia solar e estimar a emissão humana de CO₂ poderia ser preciso, pois, provavelmente, estaria relacionada aos hábitos do indivíduo.

Toda a energia acumulada na madeira advém da energia do sol, podendo ser admitida como 3,3 kcal/kg (EPE/MME, 2010). Para a madeira nativa, de densidade 0,69 g/cm³, a energia equivale a 2.277 kcal/m³ ou 9,53 MJ/m³. Em termos de energia dos trabalhadores

para extração das toras na floresta, Uhl et al (1991) estimou em 268 kcal/m³ de madeira, o que equivaleria a 1,12 MJ/m³.

6.6 Conclusão

O consumo de energia envolve predominantemente o diesel como fonte energética para alimentação de equipamentos e veículos. Na extração, são utilizadas basicamente motosserras e tratores; na serraria são empregadas serras e demais maquinários de corte; no transporte há o uso de caminhões de diversos portes e desempenho. Considerando o consumo de energia nas fases de extração, processamento e transporte de toras, ou seja, até o final do processo produtivo da madeira serrada, estima-se que sejam emitidos entre 20,3 kgCO₂/t de toras e 116,6 kgCO₂/t, com mediana de 42,3 kgCO₂/t de toras. Desses valores, estima-se que o processamento das toras representaria metade do consumo, extração cerca de 10% e o restante seria usado no transporte das toras.

Para o transporte da madeira serrada aos mercados consumidores, estimou-se o fator de emissão entre 16,8 gCO₂/t.km e 61,6 gCO₂/t.km. Devido às longas distâncias entre a região Amazônica e seus principais mercados consumidores, é relevante a representatividade do transporte da madeira serrada nas emissões totais de CO₂ por energia. Com base em informações do ano de 2007, sobre a madeira acompanhada de Documento de Origem Florestal, a distância média de transporte da madeira com origem na região Amazônica foi de 1.956 km. Para essa distância, com veículos de capacidade média de carga, seriam emitidos de 54,0 kgCO₂/t de a 197,1 kgCO₂/t madeira serrada.

7 Fluxo do material da madeira serrada da Amazônia

Este capítulo consolida as informações do fluxo do material da atividade madeireira. São estimadas as emissões de CO₂ por hectare de floresta explorada e a emissão de CO₂ unitária, em massa e volume, de toras processadas e de madeira serrada. A partir dos valores de carbono contido na madeira serrada e carbono liberado ao longo do processo, é quantificado o balanço líquido de CO₂ da madeira serrada. Algumas oportunidades para mitigação das emissões na atividade são levantadas. O impacto da exploração madeireira convencional é contextualizado para escala nacional de emissões de CO₂, com base no inventário brasileiro de 2010.

7.1 Fluxo do material a partir da floresta Amazônica

7.1.1 Fluxo de biomassa seca por área de floresta explorada

No fluxo do material da madeira serrada da Amazônia, a floresta primeiramente passa pela extração de toras comerciais, que são encaminhadas para a serraria e transformadas em produtos de madeira serrada. Ao final das etapas de extração e processamento são obtidos: produtos de madeira serrada, relevante quantidade de resíduos e floresta remanescente. O resultado desse fluxo reflete o impacto da atividade madeireira para as emissões nacionais de CO₂ no setor de floresta.

Os fluxos do material expressos na Figura 76, Figura 77 e Figura 78 ilustram a faixa de impacto da atividade madeireira, em unidade de tonelada de biomassa seca por hectare, para os cenários bbb, mmm e aaa (item 4.4), associados ao rendimento inferior, médio e superior (item 5.3) obtido em serraria. Os fluxos mínimo e máximo demonstram cenários extremos para a geração de resíduos na exploração.

A parcela de biomassa contida em produtos de madeira serrada com relação à biomassa da floresta Amazônica pode ser estimada em 1,4%, 2,9% e 6,4%, respectivamente, para os três cenários ilustrados: mínimo, mediano e máximo. Devido às perdas do processo, pode-se notar que a quantidade de resíduos em todos os cenários é superior à quantidade de madeira serrada. Os quadros à direita do fluxo resumem a quantidade de biomassa seca em produtos e em resíduos, obtidos ao final do processo produtivo.

Figura 76 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica: cenário bbb associado ao rendimento superior na serraria (45,7%)

Figura 77 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica: cenário mmm associado ao rendimento médio na serraria (41,1%)

Figura 78 - Fluxo do material da madeira serrada Amazônica: cenário aaa associado ao rendimento inferior na serraria (35,4%)

A relação entre resíduos totais e madeira serrada pode ser estimada em 5,0 t/t para o cenário mínimo, 8,0 t/t para o cenário médio e 8,5 t/t para o cenário máximo, somando-se os resíduos gerados na floresta e na serraria. A distribuição entre madeira serrada, resíduos da extração e resíduos do processamento segue a seguinte proporção, no cenário médio: 11% madeira serrada, 73% resíduos da extração e 16% resíduos do processamento primário (Figura 79).

Figura 79- Distribuição entre madeira serrada, resíduos da extração e resíduos do processamento na exploração convencional

7.1.2 Fluxo do carbono por área de floresta explorada

Para estimar o impacto em dióxido de carbono da madeira serrada, os valores de biomassa seca dos cenários ilustrados (Figura 76, Figura 77 e Figura 78) foram primeiramente convertidos em massa de carbono. A floresta Amazônica pode acumular na biomassa uma quantidade de carbono que varia entre 98 tC/ha (Saatchi et al., 2007) e 208 tC/ha (Carvalho et al., 1995), com mediana de 147 tC/ha (Soares Neto et al., 2009). Ao passar pelo processo de exploração da madeira, entre 87 tC/ha e 110 tC/ha permanecem na vegetação remanescente da floresta. Na madeira em toras extraída, entre 4,0 tC/ha e 29,2 tC/ha estão armazenados no material. Nos resíduos gerados durante a extração, de 7,0 tC/ha a 68,7 tC/ha estão incorporados na biomassa que foi morta, e serão paulatinamente convertidos em gases de efeito estufa nas décadas seguintes. No processamento de toras, de 1,8 tC/ha a 10,3 tC/ha são mantidos como estoque nos produtos de madeira serrada, enquanto de 2,1 tC/ha a 18,8 tC/ha integram os resíduos. Os resíduos totais do processo somariam de 9,1 tC/ha a 87,5 tC/ha.

Os dados dos cenários bbb, mmm e aaa ilustram a Figura 80, a Figura 81 e a Figura 82. O carbono mantido como estoque em produtos de madeira serrada foi representado pela cor laranja e o carbono liberado para a atmosfera, na cor cinza. As informações destacadas nos quadros das figuras resumem a estimativa de emissões e estoque do carbono da biomassa, convertidas em toneladas de dióxido de carbono (tCO₂).

Figura 80 - Fluxo do carbono na extração seletiva de toras na floresta Amazônica: cenário bbb associado ao rendimento superior na serraria (45,7%)

Figura 81 - Fluxo do carbono na extração seletiva de toras na floresta Amazônica: cenário mmm associado ao rendimento médio na serraria (41,1%)

Figura 82 - Fluxo do carbono na extração seletiva de toras na floresta Amazônica: cenário aaa associado ao rendimento inferior na serraria (35,4%)

Com o objetivo de estimar as emissões de CO₂ pela geração de resíduos em cenários típicos da exploração madeireira, além da quantificação dos cenários bbb, mmm e aaa, todos os 18 cenários de extração convencional (item 4.4) foram cruzados com a faixa de rendimento da transformação de toras em madeira serrada (item 5.3). A Tabela 31 apresenta esses resultados.

Tabela 31 - Emissão de CO₂ das etapas de extração e serragem e valor total (tCO₂/ha), para os cenários prováveis na Amazônia

Floresta						Serraria			Total		
Cenários	Concentração de biomassa	Extração	Destruição	Destruição / Extração	Emissão da extração	Emissão do processamento primário			Emissão por resíduos (extração e serragem)		
						35,4%	41,1%	45,7%			
	t/ha	t/ha	t/ha	t/t	tCO ₂ /ha	tCO ₂ /ha			tCO ₂ /ha		
bbb	200	8	14	1,8	25	9,3	8,5	7,8	34,4	33,6	33,0
bbm	200	8	38	4,8	68	9,3	8,5	7,8	77,6	76,7	76,1
bmm	200	14	38	2,7	68	16,2	14,8	13,7	84,5	83,1	81,9
bam	200	28	38	1,4	68	32,5	29,6	27,3	100,8	97,9	95,6
bma	200	14	66	4,7	119	16,2	14,8	13,7	134,8	133,4	132,2
baa	200	28	66	2,4	119	32,5	29,6	27,3	151,1	148,2	145,9
mbb	300	12	21	1,8	38	13,9	12,7	11,7	51,7	50,4	49,4
mbm	300	12	57	4,8	102	13,9	12,7	11,7	116,3	115,1	114,1
mmm	300	21	57	2,7	102	24,4	22,2	20,5	126,8	124,6	122,9
mam	300	42	57	1,4	102	48,7	44,4	41,0	151,2	146,9	143,4
mma	300	21	99	4,7	178	24,4	22,2	20,5	202,2	200,1	198,4
maa	300	42	99	2,4	178	48,7	44,4	41,0	226,6	222,3	218,8
abb	425	17	30	1,8	53	19,7	18,0	16,6	73,2	71,4	70,0
abm	425	17	81	4,8	145	19,7	18,0	16,6	164,8	163,1	161,7
amm	425	30	81	2,7	145	34,5	31,5	29,0	179,6	176,6	174,1
aam	425	60	81	1,4	145	69,1	63,0	58,0	214,1	208,0	203,1
ama	425	30	140	4,7	252	34,5	31,5	29,0	286,5	283,5	281,0
aaa	425	60	140	2,4	252	69,1	63,0	58,0	321,0	314,9	310,0
									Máx.	Med.	Mín.
									321,0	139,1	33,0

Os resultados mínimo e máximo expressos na Tabela 31 estão representados nos fluxos da Figura 80 e Figura 82, respectivamente. Nota-se que o fluxo da **Figura 81** resulta em emissão média de 124,6 tCO₂/ha, o que difere da emissão mediana de 139 tCO₂/ha, calculada com base em todos os cenários. Com relação à emissão de CO₂ por geração de resíduos associadas às toras, os cenários bma + baixo rendimento e mam + alto rendimento são representativos de fatores intermediários.

7.2 Emissões de CO₂ da madeira serrada

7.2.1 Cenários de emissão de CO₂ por geração de resíduos

No item anterior, foi apresentada a faixa de variação das emissões de CO₂ decorrentes da exploração de um hectare de floresta, desde a extração de toras na floresta até a obtenção dos produtos serrados. No entanto, esses cenários não necessariamente representam a faixa de variação de CO₂ por unidade de produto. Isso ocorre, pois em cada cenário há uma quantidade diferente de toras extraídas e de madeira serrada produzida.

Identificou-se os valores de emissão de CO₂ por toras, em massa seca, nos quais são destacados os valores mínimo, máximo e os que compuseram o valor de mediana (Tabela 32). Nos cenários considerados, a madeira em toras implica na emissão, por geração de resíduos, entre 3,4 tCO₂/t de biomassa seca e 9,7 tCO₂/t, com mediana de 5,6 tCO₂/t.

Tabela 32 - Emissão de CO₂ por geração de resíduos (tCO₂/t tora, em biomassa seca)

Cenários	Destruição/ extração	Emissão por resíduos (extração e serragem)			Toras extraídas	Emissão por toras		
	t/t	tCO ₂ /ha			t/ha	tCO ₂ /t tora		
bbb	1,8	34,4	33,6	33,0	8	4,3	4,2	4,1
bbm	4,8	77,6	76,7	76,1	8	9,7	9,6	9,5
bmm	2,7	84,5	83,1	81,9	14	6,0	5,9	5,9
bam	1,4	100,8	97,9	95,6	28	3,6	3,5	3,4
bma	4,7	134,8	133,4	132,2	14	9,6	9,5	9,4
baa	2,4	151,1	148,2	145,9	28	5,4	5,3	5,2
mbb	1,8	51,7	50,4	49,4	12	4,3	4,2	4,1
mbm	4,8	116,3	115,1	114,1	12	9,7	9,6	9,5
mmm	2,7	126,8	124,6	122,9	21	6,0	5,9	5,9
mam	1,4	151,2	146,9	143,4	42	3,6	3,5	3,4
mma	4,7	202,2	200,1	198,4	21	9,6	9,5	9,4
maa	2,4	226,6	222,3	218,8	42	5,4	5,3	5,2
abb	1,8	73,2	71,4	70,0	17	4,3	4,2	4,1
abm	4,8	164,8	163,1	161,7	17	9,7	9,6	9,5
amm	2,7	179,6	176,6	174,1	30	6,0	5,9	5,9
aam	1,4	214,1	208,0	203,1	60	3,6	3,5	3,4
ama	4,7	286,5	283,5	281,0	30	9,6	9,5	9,4
aaa	2,4	321,0	314,9	310,0	60	5,4	5,3	5,2
		Máx.	Med.	Mín.		Máx.	Med.	Mín.
		321,0	139,1	33,0		9,7	5,6	3,4

A taxa de destruição da floresta por quantidade de toras extraídas exerce uma influência muito superior ao rendimento da serraria no fator de emissão de CO₂ por massa de tora processada, conforme explicitado na Figura 83. Como exemplo, para a taxa de degradação de 2,4 t/t, em massa de resíduos da extração por massa de tora, o fator de emissão seria de 5,2 tCO₂/t tora no caso de processamento em serraria de rendimento superior e 5,4 tCO₂/t tora em serraria de rendimento inferior, o que corresponde a uma redução de 3,4% no fator de emissão. A linha de tendência projetada aponta que, no cenário de baixa geração de resíduos na floresta, caso toda a biomassa das toras fosse transformada em produtos comerciais, a emissão seria reduzida de 3,5 tCO₂/t tora para 2,4 tCO₂/t tora. Esse seria o menor valor de emissão possível de ser atingido, a partir dos dados adotados, conjugando exploração convencional da floresta Amazônica e total aproveitamento de resíduos da serraria.

Figura 83 - Influência do impacto na extração e do rendimento da serraria no fator de emissão de CO₂ (tCO₂/t tora, em biomassa seca)

7.2.1 Emissão de CO₂ por energia de processamento

As emissões de CO₂ por consumo de energia no processo produtivo, desde a extração das toras até o produto serrado na serraria, por massa de tora processada, constam na Tabela 30, do item 6.4. A faixa de variação do consumo energético foi estimada entre 0,02 tCO₂/t tora e 0,12 tCO₂/t tora, com mediana de 0,04 tCO₂/t tora, o que envolve extração de toras da floresta, transporte de toras entre floresta e serraria, e serragem. As emissões pelo transporte entre serraria e mercado consumidor foram incluídas separadamente, pois se referem à madeira serrada.

Somando-se as emissões advindas dos resíduos às emissões por consumo de energia em todo o processo produtivo, os valores totais seriam estimados entre 3,4 tCO₂/t tora (mínimo), 5,7 tCO₂/t tora (mediana) e 9,8 tCO₂/t tora (máximo), em unidade de biomassa seca de toras. Comparado ao impacto da geração de resíduos, a queima de energia fóssil representa cerca de 1%, e pouco altera os resultados definidos em função da degradação dos resíduos do processo. A Figura 84 demonstra essa relação.

Figura 84 - Composição do fator de emissão de CO₂ no processo produtivo da madeira serrada, por geração de resíduos e consumo de energia (tCO₂/t tora, em biomassa seca)

7.2.1 Fator de emissão de CO₂ do processo produtivo da madeira serrada

Para estimar o CO₂ do processo produtivo da madeira serrada, as emissões por unidade de massa de tora foram convertidas com base no rendimento da serraria, que varia entre 35,4% e 45,7%, conforme item 5.3. A faixa de emissão de CO₂ da madeira serrada é estimada entre 7,5 tCO₂/t e 28,4 tCO₂/t, com mediana de 13,8 tCO₂/t. A faixa de CO₂ para unidades de massa de tora e de madeira serrada estão expressos na Figura 85.

Figura 85 - Faixa de variação do fator de emissão de CO₂ em unidade de massa de tora e de madeira serrada, considerando as etapas de extração, transporte de toras para serraria e processamento (tCO₂/t, em biomassa seca)

Os resultados em biomassa seca de tora e madeira serrada foram convertidos para se obter a emissão de CO₂ por unidades comerciais de madeira. Foi utilizada a relação entre as densidades de madeira seca (0,69 g/cm³), aparente (0,81 g/cm³) e verde (1,15 g/cm³). Os fatores de emissão de CO₂, por massa e por volume, para madeira em tora e madeira serrada estão expressos na Tabela 33.

Tabela 33 - Quadro geral da variação do fator de emissão de CO₂ do processo produtivo da madeira serrada, com base em unidades de massa e volume, para tora e madeira serrada

	Mínimo	Mediano	Máximo	
Tora	3,4	5,7	9,8	tCO ₂ /t seca
	1,9	3,2	5,5	tCO ₂ /t aparente ^a
	2,1	3,4	5,9	tCO ₂ /t verde
	2,4	3,9	6,8	tCO ₂ /m ³
Madeira serrada	7,5	13,8	28,4	tCO ₂ /t seca
	6,4	11,7	24,2	tCO ₂ /t aparente ^a
	5,2	9,5	19,6	tCO ₂ /m ³

(a) madeira com umidade em equilíbrio com a umidade do ambiente

7.2.1 Emissão de CO₂ por transporte da madeira serrada

Finalizado o processo produtivo, as emissões de CO₂ por transporte do produto ao mercado consumidor relacionam-se diretamente com a quantidade de madeira serrada. Seu impacto é bastante variável dentro do Brasil, em função da distância da floresta até o local de consumo. As distâncias de 1.956 km e 4.362 km (item 6.3.1.2) foram identificadas como percursos médio e máximo, respectivamente. A partir dos valores estimados de emissão de CO₂ por transporte de madeira serrada, sendo o fator mínimo de 16,8 gCO₂/t.km, mediana de 35,0 gCO₂/t.km e máximo de 61,6 gCO₂/t.km (item 6.3.4), pode ser quantificado o fator de emissão de CO₂ total, para o caso dessas distâncias, como exemplos do impacto.

A Tabela 34 apresenta estimativas de emissão de CO₂ mínima, mediana e máxima, por transporte a partir da serraria, para os dois cenários, além da emissão total por unidade de massa de madeira serrada. O fator de emissão da madeira serrada da Amazônia pode ser estimado entre 7,55 tCO₂/t de madeira serrada e 28,56 tCO₂/t, mediana de 13,86 tCO₂/t. Pouco foi acrescido pelo transporte ao mercado consumidor; verifica-se que mesmo com elevadas distâncias, essa etapa representa menos de 1,5% das emissões totais.

Tabela 34 – Faixa de variação estimada da emissão de CO₂ no transporte da madeira serrada ao mercado consumidor em distâncias mediana (1.956 km) e máxima (4.362 km), e emissão total para os dois cenários de transporte

Distância (km)	1.956			4.362		
	Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo
Fator de emissão (gCO ₂ /t.km)	16,8	35,0	61,6	16,8	35,0	61,6
tCO₂/t madeira serrada						
Transporte ao mercado consumidor	0,03	0,07	0,12	0,07	0,15	0,27
Processo produtivo	7,51	13,79	28,44	7,51	13,79	28,44
Emissão total de CO₂	7,55	13,85	28,56	7,59	13,94	28,71

Comparativamente, na simulação desenvolvida por Huang e Asner (2010), considerando a degradação de resíduos e o crescimento de biomassa em um período de 30 anos após extração convencional, a emissão líquida foi estimada pelos autores em 6,0 tCO₂/m³ de tora, valor que aproxima-se do fator máximo na faixa de variação quantificada no presente estudo, que considerou apenas o impacto momentâneo da extração da madeira.

7.3 Balanço líquido de CO₂ da madeira serrada

A abordagem de balanço líquido, uma possível quantificação das emissões de CO₂ relacionadas ao material, oferece uma ponderação entre o carbono que ficou de fato estocado em produtos de madeira serrada e as emissões geradas ao longo do processo produtivo. Geralmente, as emissões de qualquer outro material, como cimento e aço, por exemplo, estão relacionadas unicamente ao CO₂ gerado em sua produção, independente do carbono de constituição do material.

Como vem se discutindo o carbono presente em produtos de madeira como estoque em usos duráveis na construção, optou-se por apresentar essa quantificação. Entretanto, pode implicar em distorção no caso da madeira Amazônica, pois o crescimento de sua madeira comercial ocorreu a centenas de anos, não havendo absorção recente de carbono atmosférico. Essa abordagem pode ser coerente se aplicada a produtos de madeira de reflorestamento, em que as árvores demandaram a captura recente de carbono atmosférico em seu crescimento e, desta forma, houve uma contribuição para a redução da concentração de gases estufa na atmosfera.

Para a abordagem do balanço líquido, o carbono dos produtos é contabilizado. Cada tonelada de madeira seca contém 1,8 tCO₂/t. Admitindo-se a faixa de emissão estimada para o processo produtivo até o produto serrado, o que exclui a etapa de transporte ao mercado consumidor, o balanço líquido pode variar de 5,7 tCO₂/t a 26,6 tCO₂/t, conforme

demonstrado na Tabela 35. A mesma contabilização foi realizada para volume de madeira serrada, também apresentada na Figura 86.

Tabela 35 – Faixa de variação do balanço líquido de CO₂ da madeira serrada por massa e volume de produto

	tCO ₂ /t seca			tCO ₂ /m ³		
	Mínimo	Mediano	Máximo	Mínimo	Mediano	Máximo
Estoque na madeira	-1,8	-1,8	-1,8	-1,2	-1,2	-1,2
Emissão na produção^a	7,5	13,8	28,4	5,2	9,5	19,6
Balanço líquido	5,7	12,0	26,6	3,9	8,3	18,4

(a) Exceto transporte de madeira serrada ao mercado consumidor

Figura 86 - Faixa de variação do estoque de CO₂ na madeira serrada, emissão total de CO₂ na produção e balanço líquido (tCO₂/m³)

As emissões por consumo de energia não equivaleram, em nenhum dos cenários, ao estoque na madeira serrada. Entretanto, considerando-se que a serragem das toras produz maior quantidade de resíduos do que de produtos serrados (de 2,2 t/t a 2,8 t/t), apenas a decomposição desses resíduos neutralizaria o estoque de carbono dos produtos e resultaria em emissão líquida. Supondo-se um cenário em que todos os resíduos da serraria fossem utilizados para fabricação de produtos de madeira, a geração de resíduos da floresta precisaria ser reduzida em 36% no cenário mínimo e 375% no cenário de máximo impacto, o que implicaria na geração de resíduos em quantidade similar à extraída como toras. Considerando a manutenção do rendimento médio atual das serrarias, para que a madeira serrada seja neutra em emissões, a destruição das florestas precisaria ser diminuída em

130% e 706%, respectivamente, para os cenários mínimo e máximo, o que implica em quantidade de extração bem superior à quantidade de destruição.

A adoção dos resultados de balanço de carbono como faixa de fator de emissão de CO₂ da madeira serrada prescinde da definição de responsabilidades sobre qual setor ou qual atividade absorve o impacto dentro do sistema (país, sistema produtivo, etc.). Importante ressaltar que a emissão de CO₂ irá inevitavelmente ocorrer, em diferentes condições de tempo para biomassa classificada como resíduos da floresta, resíduos da serraria ou madeira serrada; em consequência o estoque de carbono é temporário. Em última análise, pode-se chegar à conclusão de que apenas a biomassa viva de florestas poderia ser admitida como estoque de carbono.

Em uma abordagem de ciclo de vida completo, que considera, além da produção do material, as fases de uso e destinação final do produto, o carbono contido na madeira será liberado ao fim da vida útil e, nessa análise, o estoque de carbono pode ser admitido apenas como temporário. Esse horizonte de tempo dependeria do uso e destinação dada ao material. As informações sobre a destinação da madeira Amazônica no mercado consumidor brasileiro são extremamente escassas. Apenas uma referência apresenta dados sobre as aplicações no estado de São Paulo, principal mercado deste produto, com consumo de 17% do total (Pereira et al., 2010). Além dos usos de construção, o setor de móveis e decoração integra a demanda de madeira serrada em 16%. De acordo com essa fonte, do total de madeira serrada da Amazônia destinada à construção, um terço é utilizado de forma não durável, como andaimes e formas de execução de obras. Em usos de média estimativa de duração, como forros e esquadrias, são destinados 13%, sendo a maior parte aplicada em usos de longo prazo, como estruturas de telhado (50%) e casas pré fabricadas (3%) (Sobral et al., 2002). Geralmente relacionados ao período de execução de uma obra, os usos de curta duração geram a rápida transformação dos produtos madeireiros em resíduos de construção civil.

Outras perspectivas de emissão de CO₂ relacionada à madeira nativa da Amazônia podem ser apresentadas. Um exemplo seria admitir um cenário em que, após a exploração madeireira, a floresta fosse desmatada para introdução de outros usos e que, por isso, os impactos relativos aos resíduos da floresta não deveriam ser quantificados como emissão. Há grande incerteza quanto à manutenção da biomassa da floresta após a exploração madeireira, enquanto a área de floresta Amazônica manejada é pequena para ser admitida como um cenário padrão. Um segundo exemplo seria assumir que os resíduos da floresta e serraria seriam aproveitados e, portanto, a emissão de CO₂ seria alocada em outros processos, nos quais é absorvida.

Ambas as situações não podem ser asseguradas. O desmatamento pode não ocorrer imediatamente ou em curto período após a extração, entretanto não há dados que permitam

afirmar qual o período suficiente para a recuperação da biomassa da floresta. Já dados que permitam assumir um cenário de aproveitamento dos resíduos, da serraria ou da floresta explorada no modelo convencional, como típicos da realidade Amazônica não foram identificados em literatura. Por essas razões, os cálculos incorporam todos os impactos gerados pela atividade.

7.4 Impactos nacionais da produção de madeira serrada da Amazônia

Segundo Pereira et al (2010) teriam sido extraídos 14,14 milhões de metros cúbicos de madeira em toras da floresta Amazônica no ano de 2009. Com base no volume médio de 30m³/ha extraídos, a exploração florestal pode ter sido realizada em cerca de 500 mil hectares naquele ano. Segundo dados de satélite do INPE, a degradação da floresta naquele ano foi estimada em 1,3 milhões de hectares, que corresponderia à taxa de 10,6 m³/ha, uma diferença de 280%. Não há outras referências de volume consumido ou área degradada no ano de 2009 que nos permitam comparar o resultado. O maior volume de madeira consumida apresentado em literatura é de 49,8x10⁶ m³ de toras em 2000 (Asner et al., 2005), que indicaria a exploração média de mais de 1,6 milhões de hectares.

A partir dos dados produzidos nesse estudo, foram comparados a estimativa de geração de CO₂ pela atividade madeireira com as emissões nacionais de 2005, quantificadas em 1.638 MtCO₂ (MCT, 2010a). A partir da média simples de dados de volume de toras extraído em diferentes anos (item 3.2), teriam sido extraídos anualmente 26,6x10⁶ m³ de toras. Com aproveitamento de 41,1% na serraria, foram produzidos em média 10,9x10⁶ m³ de madeira serrada. Aplicando-se os fatores de emissão de CO₂ mínimo (5,2 tCO₂/m³) e máximo (19,6 tCO₂/m³), quantificados nesse estudo, a faixa de emissão anual atribuída à exploração comercial da madeira Amazônica estaria entre 56,7 MtCO₂ e 214,5 MtCO₂. No mesmo período, a emissão por processos industriais respondeu por 65 MtCO₂ (MCT, 2010a). A parcela estimada para atividade madeireira sobre a emissão total de CO₂ do país estaria entre 3,5% e 13,1%. Como a Amazônia corresponde a praticamente 50% das emissões nacionais de CO₂, a exploração madeireira seria equivalente à faixa de 6,9% a 26,2% da emissão total do bioma.

O dado mais recente de consumo de madeira serrada indica um volume bem inferior à média, de 5,8x10⁶ m³ (Pereira et al., 2010), o que somente pode ser explicado pela redução de demanda da madeira Amazônica por razões de menor aceitação no mercado devido à ilegalidade associada ao material e crise financeira mundial. Em função desse volume, se aplicados os fatores de emissão mínimo e máximo, a emissão de CO₂ da atividade em 2009 pode ser estimada entre 30,1 MtCO₂ e 113,8 MtCO₂.

7.5 Oportunidades para redução das emissões de CO₂ e benefícios em sustentabilidade

A minimização da geração de resíduos no processo produtivo é a principal oportunidade para mitigação das emissões de CO₂, principalmente na etapa de extração de madeira da floresta Amazônica. Nessa etapa, um modelo de exploração com baixa taxa de destruição da biomassa da floresta poderia contribuir tanto para uma menor escala de emissão de CO₂, como para tornar possível a recuperação da biomassa em casos de abandono da área ou de manejo florestal.

A destruição da biomassa pode ser reduzida pela exploração manejada, que envolve planejamento da exploração e uso de equipamentos visando o menor impacto durante a extração. As serrarias móveis podem representar uma modalidade de menor impacto. Ambas precisariam ser contabilizadas para verificar a redução da taxa de destruição. Outras formas de inovação no modelo de exploração, que permitisse a retirada das toras sem a abertura de caminhos e trilhas, como por exemplo retirada aérea das toras, precisariam ser analisadas em termos de viabilidade econômica.

Na etapa da processamento primário, a melhoria no rendimento das serrarias seria a primeira oportunidade, o que reduziria a geração de resíduos. Adicionalmente, o uso dos resíduos como matéria prima para outros produtos ofereceria uma funcionalidade ao material e evitaria a geração imediata de CO₂. Os efeitos sobre o fator de emissão do produto dependeriam do critério de alocação do impacto, mas para além do CO₂, muitos outros benefícios ambientais poderiam ser obtidos. Uma alternativa seria a destinação dos resíduos para outras regiões do país, que poderiam demandar a biomassa para geração de energia ou fabricação de outros produtos. Entretanto há obstáculos a serem analisados, como custos de logística, impactos em energia e CO₂ do transporte do material, e adequações de maquinário, que seriam necessárias em plantas industriais para processamento da madeira de alta densidade.

Com relação às emissões de CO₂ provenientes do consumo de energia, o uso racional do insumo e equipamentos eficientes em todas as atividades são sempre benéficos, e adicionalmente contribuem para conservar as reservas mundiais de combustíveis fósseis. A substituição do diesel por outra fonte energética, como produção de eletricidade a partir dos resíduos da serraria, apresentaria outra oportunidade. A produção regional de eletricidade, usando os resíduos sem aproveitamento de um conjunto de serrarias, precisaria ser analisada em sua viabilidade, mas poderia configurar como uma solução até mesmo para a carência de distribuição de eletricidade na região Norte.

No consumo energético por transporte, a distância é um fator crítico. O uso de modais com baixo fator de emissão, como hidrovias e ferrovias, com infraestrutura atualmente inexistente no trajeto entre região Norte e grande parte do país, precisaria ser incentivado. Há diversas oportunidades de mitigação no transporte da madeira serrada, que estariam centradas em: selecionar opções de estradas e rodovias com as melhores condições de manutenção e fluxo, quando houver alternativas; minimizar a distância de transporte; priorizar o uso de veículos eficientes e modelos de caminhões que apresentem elevada relação entre peso de carga e peso próprio; evitar o deslocamento do material com excesso de umidade livre, devendo a madeira estar em estado seco, e com proteção às intempéries, além de transportar preferencialmente madeira beneficiada, como produto final acabado, pois traria melhores resultados na etapa de transporte ao mercado consumidor, pois parte da carga transportada é posteriormente transformada em resíduos.

Todas as formas de redução das emissões de CO₂ exigem mudanças no modelo atual da cadeia de produção da madeira serrada da Amazônia e em sua infraestrutura, que pode ser caracterizado como uma atividade de baixos investimentos e controle de produção praticamente inexistente. São grandes as dificuldades para direcionar políticas públicas em setores com muita informalidade. Transformar a atividade em um setor produtivo estruturado e monitorado seria necessário para incentivar melhorias em todo o processo do ponto de vista de CO₂, mas também da preservação deste importante bioma. A alteração do modelo de exploração madeireira na Amazônia poderia gerar benefícios ambientais, pela conservação da floresta e do carbono estocado na biomassa; benefícios econômicos ao país, pela legalização da atividade, e às empresas legalmente constituídas, que convivem com a dificuldade de competir com produtores sem qualquer ônus tributário; e benefícios sociais à população que sobrevive das atividades relacionadas à floresta e seus produtos e, também, aos trabalhadores envolvidos diretamente com a atividade.

7.6 Conclusão

As principais fontes de CO₂ do processo produtivo da madeira serrada da Amazônia estão relacionadas com a perda de biomassa, seja pela destruição da floresta, principal influência no impacto, seja pelo baixo rendimento obtido nas serrarias. Esse retrato considera o modelo típico de exploração em prática na Amazônia.

Os resíduos do processo podem gerar emissão na faixa de variação de 33 tCO₂/ha a 321 tCO₂/ha, com mediana de 139 tCO₂/ha, sendo que a etapa de extração de toras participa entre 70% e 90% desse total, o que varia para cada cenário. A distribuição de biomassa do processo produtivo pode ser estimada, em cenário médio, em 11% madeira

serrada, 73% resíduos da extração e 16% resíduos do processamento, com variação da taxa de geração de resíduos por tora serrada entre 5,0 t/t e 8,5 t/t.

Estima-se o impacto, por unidade de massa seca de madeira serrada, entre 7,5 tCO₂/t e 28,1 tCO₂/t unicamente advindos dos resíduos da floresta e serraria. O consumo energético no processo produtivo implica na faixa de 0,04 tCO₂/t a 0,34 tCO₂/t de madeira serrada. O transporte ao mercado consumidor, em distâncias médias, gera adicionais 0,03 tCO₂/t a 0,12 tCO₂/t. As emissões totais são estimadas de 7,5 tCO₂/t a 28,6 tCO₂/t, com mediana de 13,9 tCO₂/t. Em volume de madeira serrada, seriam emitidos entre 5,2 tCO₂/m³ e 19,7 tCO₂/m³, com mediana de 9,6 tCO₂/m³.

Em função do carbono existente na biomassa dos produtos de madeira serrada, equivalente a 1,8 tCO₂/t de biomassa seca, ou 1,2 tCO₂/m³, estima-se a emissão líquida de 3,9 tCO₂/m³ a 18,4 tCO₂/m³. Devido aos resíduos gerados, a liberação de carbono sobrepõe a quantidade contida no material.

Com base no consumo médio estimado de madeira serrada, para a última década, no inventário nacional de gases de efeito estufa, referente a dados de 2005, a participação da atividade madeireira pode ser estimada entre 3,5% e 13,1%, o que justifica proposição de ações de mitigação.

Várias são as oportunidades de mitigação, como extração com técnicas de baixo impacto; aproveitamento dos resíduos como fonte de energia ou como matéria prima para outros produtos de madeira; substituição de fonte energética, como uso de eletricidade, da rede nacional ou gerada pela queima dos resíduos; transporte da madeira em curtas distâncias; emprego de tipos de transporte com menor fator de emissão, como hidrovias; utilização de equipamentos e veículos eficientes em todas as atividades, entre outros fatores.

Quantificar o fator de emissão de CO₂ da madeira serrada da Amazônia e identificar a etapa de extração de toras da floresta como crítica no processo pode fundamentar políticas públicas para mitigação do CO₂ da atividade madeireira, bem como pautar iniciativas de redução das emissões de CO₂ por parte do setor público, construção civil e consumidores.

8 Conclusão

Em função da verificação das mudanças climáticas, e as possíveis evidências dos fatores humanos atrelados ao aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, tornou-se relevante a quantificação do fator de emissão desses gases nas diversas escalas: global, nacional, por setor produtivo e por atividade. Atribuir o impacto de CO₂ para cada atividade humana é um passo fundamental para gerenciar e mitigar as emissões. No setor de construção, a informação sobre a geração de CO₂ dos diversos materiais possibilita inventariar projetos e edificações e, em um segundo momento, minimizar o impacto, pela substituição de materiais e proposição de soluções, arquitetônicas e construtivas, direcionadas para esse objetivo.

Nesse contexto, a quantificação das emissões da madeira Amazônica tem duplo sentido: acessar o impacto desse material no setor de construção, predominante no uso do material, e auxiliar na identificação das forças de destruição da floresta. No caso da Amazônia, reduzir o impacto sobre o bioma implica também em uma consequência indireta, mas de igual importância: a conservação da biodiversidade e de um ecossistema único no planeta.

A elevada concentração de biomassa na floresta Amazônica, entre 200 t/ha e 425 t/ha de biomassa seca acima do solo, dependendo das características de vegetação da região, estocam em carbono de 98 tC/ha a 208 tC/ha, sendo a maior parte em troncos de árvores de grande porte. A quantificação está baseada na unidade de biomassa seca, por ser predominante em estudos que abordam emissão de gases estufa relacionada a biomassa de florestas.

Levantou-se em literatura que a exploração madeireira implica em uma quantidade de biomassa extraída em toras na faixa de 4% a 14%; para isso, entre 7% e 33% da biomassa é destruída e abandonada na floresta, onde passa pelo processo de degradação biológica. Em ambos, essa parcela é determinada tanto por fatores naturais, que são próprios das características das florestas; como por fatores humanos, dentre os quais, os procedimentos adotados na extração das toras representam o principal aspecto.

No presente estudo, buscando correlacionar a concentração de biomassa na floresta, a quantidade de biomassa retirada como toras e a quantidade de biomassa destruída na extração, identificou-se 18 cenários como prováveis do impacto da atividade madeireira na floresta Amazônica. A relação entre extração e destruição da floresta Amazônica nos diversos cenários variou entre 1,4 t/t e 4,8 t/t de tora.

A destruição da floresta foi identificada como a principal influência no fator de emissão de CO₂ do produto, seguida da etapa de serragem de toras, na qual cerca de 60% da biomassa é convertida em resíduos. Ao final do processo produtivo, englobando extração na floresta e processamento primário, teriam sido gerados entre 5,0 t/t e 8,5 t/t na relação entre resíduos

e madeira serrada. Geralmente não há aproveitamento dos resíduos da floresta ou da serraria e, desta forma, o carbono dos resíduos foi computado como emissão de CO₂. As emissões por geração de resíduos foram estimadas na faixa de 3,4 tCO₂/t a 9,7 tCO₂/t de tora, com mediana de 5,6 tCO₂/t de tora.

O consumo de combustível nas diversas etapas do processo produtivo figurou como uma contribuição de menor impacto se comparada às emissões por geração de resíduos. Considerando as etapas de extração, transporte de toras entre floresta e serraria e processamento primário, seriam acrescidos de 0,02 tCO₂/t a 0,12 tCO₂/t de tora (mediana de 0,04 tCO₂/t). O fator de emissão do processo produtivo da madeira serrada seria de 3,4 tCO₂/t a 9,8 tCO₂/t de tora (mediana de 5,7 tCO₂/t), equivalentes a 2,4 tCO₂/m³ a 6,8 tCO₂/m³ de tora, com mediana de 3,9 tCO₂/m³ de tora.

O transporte da madeira serrada foi quantificado separadamente por apresentar ampla variação em função da distância percorrida pela carga. Se admitido o deslocamento por 1.956 km, quantificado como a distância média percorrida por cargas de madeira serrada acompanhadas de Documento de Origem Florestal e com origem na região Amazônica, seriam emitidos entre 0,03 tCO₂/t e 0,12 tCO₂/t de madeira serrada (mediana de 0,07 tCO₂/t). Nesse caso, o fator de emissão de CO₂ da madeira serrada da Amazônia seria de 7,5 tCO₂/t a 28,6 tCO₂/t de madeira serrada (mediana de 13,9 tCO₂/t), correspondente a 5,2 tCO₂/m³ a 19,7 tCO₂/m³ de madeira serrada, com mediana de 9,6 tCO₂/m³.

O presente estudo baseou-se em dados existentes em literatura. Percebeu-se a grande escassez de informações com relação à atividade madeireira praticada na Amazônia no modelo convencional de exploração. Foi possível oferecer ao setor de construção e demais setores que utilizam madeira serrada da floresta Amazônica um panorama da emissão de CO₂ do material, com grande incerteza, evidenciadas pelas amplas faixas de variação dos fatores de emissão quantificados. Por ser uma primeira aproximação, e por reunir estudos de diversas áreas de conhecimento para compor o fluxo do material e contabilização das emissões de CO₂, todos os critérios foram apresentados na forma de faixa de resultados, objetivando contemplar os padrões típicos da atividade madeireira no modelo convencional de exploração.

Verificou-se que o impacto da madeira serrada Amazônica nas mudanças climáticas não pode ser negligenciado. A representatividade da atividade madeireira para as emissões nacionais pode ser estimada entre 3,5% e 13,1%. Políticas públicas, incentivos de mercado e iniciativas de mitigação precisam ser criadas com urgência, tanto para minimizar a geração de CO₂, como para promover a conservação da floresta Amazônica. Entretanto, para que as ações sejam eficazes, elas necessitam estar embasadas no conhecimento sobre a floresta e a atividade madeireira. Para que isso ocorra efetivamente, demais estudos precisam ser desenvolvidos, visando medir e detalhar a contribuição de cada etapa do

processo produtivo com maior exatidão, além de caracterizar a madeira de áreas com diferentes composições de vegetação por sua origem. É também fundamental o desenvolvimento de estudos que comparem os modelos de exploração, como por exemplo, a exploração convencional e a exploração manejada.

8.1 Contribuições do trabalho

O presente estudo fornece um panorama geral do fluxo do material e, a partir dele, são evidenciadas as fontes de emissão de dióxido de carbono associadas ao processo produtivo da madeira serrada. Os dados de CO₂ referentes à área de floresta Amazônica explorada fornecem informações que podem contribuir com a identificação do impacto da atividade em mudanças climáticas em escala nacional. No processo produtivo, a análise permite a identificação de pontos-chave sob o ponto de vista de emissões de CO₂, o que pode contribuir para aprimoramentos, como maior eficiência e ações de mitigação do CO₂.

Uma relevante contribuição do trabalho está na identificação da etapa de extração como a principal fonte de CO₂, o que revela a importância do uso de técnicas de manejo florestal na extração seletiva de madeira na floresta Amazônica. Esse dado pode ser incorporado na proposição de políticas de conservação da floresta.

Adicionalmente, os resultados demonstram a importância de transformar os resíduos da extração e processamento em subprodutos do processo, por meio da fabricação de painéis ou demais produtos madeireiros, evitando-se a queima ou degradação do material, bem como a perda desse recurso natural. O aproveitamento dos resíduos em produtos madeireiros com valor agregado contribuiria também para a geração de renda na região.

O fator de emissão de CO₂ de atividades e produtos permite ao poder público, setores produtivos e consumidores, tomarem decisões conscientes quanto ao impacto das escolhas realizadas. O fator de CO₂ da madeira serrada Amazônica pode integrar bases de dados nacionais e internacionais sobre impacto dos produtos de construção civil, bem como permite a elaboração de inventários de carbono de empreendimentos e do setor.

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

O conhecimento e a disponibilidade de informações sobre a atividade madeireira convencional em prática na floresta Amazônica são escassos. É necessário conduzir diversos estudos sobre as etapas do processo produtivo da madeira serrada, para levantar dados detalhados que possibilitem o desenvolvimento de uma análise aprofundada da atividade. Sugestões a serem destacadas:

- Quantificar o fluxo do carbono em florestas manejadas e florestas plantadas, o que possibilitaria a comparação dos modelos de exploração florestal, em termos de emissão e absorção de CO₂;
- Avaliar o impacto da indústria madeireira na floresta Amazônica com relação a outros parâmetros, como efeitos em recursos naturais e fauna;
- Conduzir uma abordagem de sustentabilidade da indústria madeireira, avaliando benefícios e prejuízos sociais e econômicos da atividade na região;
- Levantamento direto de quantidade de biomassa extraída e biomassa destruída na exploração da madeira, em diferentes pontos do território da floresta Amazônica;
- Conduzir estudo sobre alternativas de retirada das toras da floresta com minimização da biomassa destruída;
- Quantificar o fluxo do material de todo o ambiente florestal, inclusive a biomassa abaixo do solo, o que demandaria estudos sobre a dinâmica natural da floresta e da biomassa morta abaixo e acima do solo;
- Aprimorar estudos de rendimentos na serragem de toras com diferentes dimensões;
- Levantamento sobre as aplicações nos setor de construção dadas à madeira Amazônica, quantificando a parcela destinada a cada uso;
- Estudos sobre o efeito posterior da retirada de madeira na dinâmica da floresta, avaliando recuperação da biomassa, morte da vegetação pela suscetibilidade da floresta e degradação de resíduos;
- Quantificação constante da madeira Amazônica extraída anualmente.

REFERÊNCIAS

- ÁLVARES JR, O. DE M.; LINKE, R. R. A. **Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases do efeito estufa de frotas de veículos no Brasil**. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2005. Disponível em: http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/PDF/inventario_efeitoestufa.pdf. Acesso em: 12 fev. 2012.
- ALVES, D. et al. Biomass of primary and secondary vegetation in Rondônia, Western Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 3, n. 5, p. 451–461, 1 Oct. 1997.
- AMATA. **Procedimento operacional - arraste de toras**. Disponível em: www.amatabrasil.com.br/shared/operacoes/PO_NAT_09.pdf. Acesso em: 25 jan. 2012.
- AMATA. **Procedimento operacional - resíduos florestais para geração de energia**. Disponível em: www.amatabrasil.com.br/shared/operacoes/PO_NAT_11.pdf. Acesso em: 25 jan. 2012.
- ANDERSON et al. Influence of landscape heterogeneity on spatial patterns of wood productivity, wood specific density and above ground biomass in Amazonia. **Biogeosciences**, v. 6, n. 9, p. 1883–1902, 2009.
- ARAÚJO, T. M. et al. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the state of Pará, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 13, p. 1991–1998, 1 June 1999.
- ASNER, G. P. et al. Selective logging in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 310, p. 480–482, 2005.
- ASNER, G. P. et al. Condition and fate of logged forests in the Brazilian Amazon. **PNAS**, v. 103, p. 12947–12950, Aug. 2006.
- ASNER, GREGORY P et al. Remote sensing of selective logging in Amazonia: Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 3, p. 483–496, June 2002.
- BADEL, E. **Determinations des Proprietes Elastiques et du Retrait D'un Cerne Annuel de Chene dans le Plan Transverse: Description de la Morphologie, Mesures des Proprietes Microscopiques et Calculus D'Homogeneisation**. 1999. p. 179. (tese) - Ecole Nationale Du Genie Rural des Eaux et Forest, Nancy, 1999.
- BARRETO, P. et al. **Pressão humana na floresta amazônica brasileira**. Imazon / Global Forest Watch / WRI, 2005. Disponível em: www.imazon.org.br/publicacoes/livros/pressao-humana-na-floresta-amazonica-brasileira. Acesso em: 5 jan. 2011.
- BARROS, A. C.; UHL, C. Logging along the Amazon River and estuary: Patterns, problems and potential. **Forest Ecology and Management**, v. 77, n. 1-3, p. 87–105, Sept. 1995.
- BAUCH, S. C.; AMACHER, G. S.; MERRY, F. D. Costs of harvesting, transportation and milling in the Brazilian Amazon: Estimation and policy implications. **Forest Policy and Economics**, v. 9, n. 8, p. 903–915, May 2007.

- BIASI, C. P.; ROCHA, M. P. Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. **Revista Floresta**, v. 37, n. 1, p. 95–108, 2007.
- BORELLI, D. L. Aziz Ab'Sáber: problemas da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 7–35, 2005.
- CALIL JR., C.; LAH, F. A. R.; BRAZOLIN, S. Madeiras na construção civil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 1149-1179.
- CARBONO SOCIAL. Galeria de fotos. Disponível em: www.flickr.com/photos/carbonosocial/3788205047. Acesso em: 22 jan. 2012.
- CARVALHO, J. A. et al. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus region. **Atmospheric Environment**, v. 29, n. 17, p. 2301–2309, Sept. 1995.
- CARVALHO, J. F.; SCARPINELLA, C. A. A importância das florestas industriais para a sustentabilidade. In: V ENCONTRO DA ANPPAS (Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade), Pôster GT17, 2010, Florianópolis. **Anais**.
- CARVALHO JR., J. A. et al. Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in northern Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres**, v. 106, n. D16, p. 17877–17887, 2001.
- CEDERBERG, C. et al. Including Carbon Emissions from Deforestation in the Carbon Footprint of Brazilian Beef. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 5, p. 1773–1779, 1 Mar. 2011.
- COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. **Nature**, v. 421, n. 6926, p. 913–919, Feb. 2003.
- COSTA, A. C. L. et al. Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 579–591, 2010.
- DIXON, R. K. et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, v. 14, p. 185–190, 1994.
- DNIT. **Plano nacional de logística e transporte**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, 2007.
- EPE/MME. **Balanco energético nacional 2010: ano base 2009**. Empresa de Pesquisa Energética / Ministério de Minas e Energia, 2010.
- FAO. Extent of forest resources. **Global Forest Resources Assessment**, 2005. Disponível em: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/008/A0400E/A0400E03.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2010
- FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A.; RODRIGUES, F. J. A. Burning of Amazonian rainforests: burning efficiency and charcoal formation in forest cleared for cattle pasture near Manaus, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 146, n. 1-3, p. 115–128, 1 June 2001.
- FEARNSIDE, P.M. Greenhouse Gases from Deforestation in Brazilian Amazonia: Net Committed Emissions. **Climatic Change**, 3. v. 35, p. 321–360, 1997.

FEARNSIDE, P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 90, n. 1, p. 59–87, Jan. 1997.

FEARNSIDE, P. M. et al. Tropical forest burning in Brazilian Amazonia: measurement of biomass loading, burning efficiency and charcoal formation at Altamira, Pará. **Forest Ecology and Management**, v. 123, n. 1, p. 65–79, Oct. 1999.

FEARNSIDE, P. M. et al. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 9, p. 1968–1978, Oct. 2009.

FELDPAUSCH, T. R. et al. Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, n. sp4, p. 164–176, Aug. 2004.

FELDPAUSCH, T. R. et al. Biomass, harvestable area, and forest structure estimated from commercial timber inventories and remotely sensed imagery in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 1, p. 121–132, Sept. 2006.

FFT. **Futuro da Floresta**. Fundação Floresta Tropical, 2005.

FIALHO, F. A. B. Apresentação. Reunião da comissão de desenvolvimento econômico, indústria e comércio, 2007, Brasília. Disponível em: www.antaq.gov.br/portal/pdf/palestras/Dez07PalestraComissaoDesenvFialho.pdf. Acesso em: 2 fev. 2012

FIALHO, F. A. B. Hidrovias: Uma visão do futuro. In: I SEMINÁRIO PORTUÁRIO PÚBLICO PRIVADO LATINO-AMERICANO, 2010, Brasília. Disponível em: www.latinports.org/docs/Antaq.ppt. Acesso em: 27 jan. 2011.

FOLEY, J. A. et al. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, p. 25–32, Feb. 2007.

GERWING, J.J.; FARIAS, D. L. Integrating liana abundance and forest stature into an estimate of total aboveground biomass for an eastern Amazonian forest. **Journal of Tropical Ecology**, v. 16, n. 3, p. 327–335, 2000.

GERWING, J.J.; VIDAL, E. **Degradação de florestas pela exploração madeireira e fogo na Amazônia oriental brasileira**: Série Amazônia 20. Belém, PA: Imazon, 2002.

GERWING, JEFFREY J. Degradation of forests through logging and fire in the eastern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 157, n. 1-3, p. 131–141, Mar. 2002.

GHGPROTOCOL. **Cross Sector Tools**. Disponível em: www.ghgprotocol.org/calculation-tools/all-tools. Acesso em: 24 jan. 2011.

GLOBO. **Ibama apreende balsa com R\$ 1 milhão em madeira no PA**. Disponível em: www.globoamazonia.com/Amazonia/0,,MUL1203370-16052,00.html. Acesso em: 15 jan. 2011.

GLOBO AMAZÔNIA. **Madeireiros usam serraria móvel para explorar terra indígena no Maranhão**. Disponível em: <http://g1.globo.com/Amazonia/0,,MUL1284764-16052,00->

MADEIREIROS+USAM+SERRARIA+MOVEL+PARA+EXPLORAR+TERRA+INDIGENA+NO+MARANHÃO.html. Acesso em: 22 jan. 2012.

GOOGLE EARTH. **Google Earth**.

GOOGLE MAPS. **Google Maps**. Disponível em: <http://maps.google.com.br/maps>. Acesso em: 15 jan. 2011.

GOOGLE IMAGES. **Google Images**. Disponível em: www.google.com.br/imghp. Acesso em: 8 jan. 2011.

GOOGLE VIDEOS. **Google Videos**. Disponível em: <http://video.google.com.br>. Acesso em: 10 jan. 2011.

GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. **Building and Environment**, v. 41, n. 7, p. 940–951, July 2006.

HOORN, C. et al. Amazonia Through time: andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. **Science**, v. 330, n. 6006, p. 927–931, Nov. 2010.

HOUGHTON, R. A. et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, v. 403, n. 6767, p. 301–304, Jan. 2000.

HOUGHTON, R. A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? **Global Change Biology**, v. 9, n. 4, p. 500–509, 2003.

HUANG, M.; ASNER, G.P. Long-term carbon loss and recovery following selective logging in Amazon forests. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 24, n. 3, 2010.

IBAMA. IN 05 - **Instrução normativa 05**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, dez. 2006.

IBAMA. IN12 - **Instrução normativa 112**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, abr. 2012

IBAMA. **Relatórios documento de origem florestal**. Disponível em: www.ibama.gov.br/recursos-florestais/documentos/relatorios-dof/. Acesso em: 14 out. 2010.

IBAMA. **Relatórios DOF**. Disponível em: www.ibama.gov.br/recursos-florestais/documentos/relatorios-dof/. Acesso em: 15 out. 2010.

IBAMA. **Comunicado às empresas do setor madeireiro e demais atividades relacionadas ao consumo de madeira**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2009.

IBAMA. **Banco de dados de madeiras brasileiras**. Disponível em: www.ibama.gov.br/lpf/madeira/introducao.htm. Acesso em: 19 jan. 2011.

IBAMA. **IBAMA - DOF - transações - conversão de produto**. Disponível em: <http://servicos.ibama.gov.br/ctf/manual/html/160600.htm>. Acesso em: 11 jan. 2012.

IBAMA-MT et al. **Manual de procedimentos de estocagem, medição e fiscalização de produtos florestais**. Disponível em: www.siteonline.com.br/imagem_rec/encontrosefaz/fm/meus_documentos/manualprodflor.pdf.

IBGE. **Mapas temáticos da Amazônia**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2007a Disponível em:

www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=799. Acesso em: 26 nov. 2011

IBGE. **Amazônia Legal 2007**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2007b. Disponível em: ftp://geofp.ibge.gov.br/Organizacao/Amazonia_Legal/Amazonia_Legal.pdf. Acesso em: 4 jan. 2011

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009, Rio de Janeiro. Disponível em: www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pevs/2009/pevs2009.pdf. Acesso em: 25 nov. 2011

IFEU/RMCON. **EcoTransIT**. Disponível em: www.ecotransit.org. Acesso em: 16 jan. 2011.

INEE. **Aproveitamento energético dos resíduos de madeira provenientes do manejo florestal sustentável: Noroeste do Estado de Mato Grosso**. Instituto Nacional de Eficiência Energética, 2003. Disponível em: www.inee.org.br/biomassa_downloads.asp?Cat=biomassa. Acesso em: 23 jan. 2012.

INPE. **Monitoramento da cobertura florestal da amazônia por satélites sistemas Prodes, Deter, Degrad e queimadas 2007-2008**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf. Acesso em: 29 nov. 2010.

INPE. **Taxas anuais do desmatamento - 1988 até 2011**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2011.htm. Acesso em: 2 jan. 2011

INPE. **Degrad - Mapeamento da degradação florestal na Amazônia brasileira**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: www.obt.inpe.br/degrad. Acesso em: 8 jan. 2011

INPE. **Fototeca - banco de dados de fotos de campos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: www.obt.inpe.br/fototeca/fototeca.html. Acesso em: 15 dez. 2011.

INPE. **Avaliacao Deter**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: www.obt.inpe.br/deter/avaliacao/. Acesso em: 26 fev. 2012.

IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use - Chapter 4: Forest Land**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

IPCC. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: I Synthesis Report**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007a.

IPCC. **Glossary**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007b.

IWAKIRI, S. Rendimento e condições de desdobro de 20 espécies de madeiras da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 20, p. 271–281, 1990.

JOHNS, J. S.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 89, n. 1-3, p. 59–77, Dec. 1996.

KAMAKATÉ, F.; SCHIPPER, L. Trends in truck freight energy use and carbon emissions in selected OECD countries from 1973 to 2005. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 3743–3751, Oct. 2009.

KELLER, M. et al. Coarse woody debris in undisturbed and logged forests in the eastern Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 784–795, May 2004.

KELLER, M.; PALACE, M.; HURTT, G. Biomass estimation in the Tapajos National Forest, Brazil: examination of sampling and allometric uncertainties. **Forest Ecology and Management**, v. 154, n. 3, p. 371–382, Dec. 2001.

LAURANCE, W. et al. Conservation: Rainforest fragmentation kills big trees. **Nature**, v. 404, n. 6780, p. 836, Apr. 2000.

LAURANCE, W. F. et al. The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. *Biological Conservation*, v. 144, p. 56-67, 2010.

LAWSON, S. **Illegal logging and related trade: indicators of the global response**. London: Chatam House, 2010.

LENTINI, M. **Introdução à indústria de madeira**. Disponível em: <http://empresasefinancas.hsw.uol.com.br/industria-da-madeira.htm>. Acesso em: 10 out. 2010.

MACPHERSON, A. J. et al. A Model for comparing reduced impact logging with conventional logging for an Eastern Amazonian Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 11, p. 2002–2011, 2010.

MALHI, Y. et al. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169–172, 2008.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 5, p. 1117–1129, May 2010.

MCT. **Emissões de gases de efeito estufa por fontes móveis, no setor energético – relatório de referência**. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006. Disponível em: www.mct.gov.br/upd_blob/0008/8848.pdf. Acesso em: 16 jan. 2011.

MCT. **Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010a, Brasília.

MCT. **Emissões de gases de efeito estufa no setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas**: Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010b, Brasília.

MCT. **Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no sistema interligado nacional do Brasil**. Disponível em: www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora. Acesso em: 29 out. 2011.

MILLER, S. D. et al. Reduced impact logging minimally alters tropical rainforest carbon and energy exchange. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108 n. 48 p. 19431-19435, Nov. 2011.

NABUURS, G. J. et al. Forestry - Chapter 9. In: **Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2007.

NEPSTAD, D. et al. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. **Forest Ecology and Management**, v. 154, n. 3, p. 395–407, Dec. 2001.

NEPSTAD, D. C. et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505–508, Apr. 1999.

NIES. **Material and carbon flow of harvested wood in Japan**, 2004.

NOBRE, C. A.; BORMA, L. S. “Tipping points” for the Amazon forest. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 28–36, Oct. 2009.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4, n. 10, 1991.

NOGUEIRA; NELSON, B. et al. Tree height in Brazil’s “arc of deforestation”: shorter trees in south and southwest Amazonia imply lower biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 7, p. 2963–2972, 2008.

NOGUEIRA, E. M. et al. Wood density in forests of Brazil’s arc of deforestation’: implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 248, n. 3, p. 119–135, Sept. 2007.

NOGUEIRA, E. M.; FEARNESIDE, PHILIP MARTIN; et al. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: new allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 11, p. 1853–1867, Nov. 2008.

NOGUEIRA, E. M.; NELSON, B. W.; FEARNESIDE, P. M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 208, n. 1-3, p. 261–286, Apr. 2005.

NOGUEIRA, E. M.; NELSON, B. W.; FEARNESIDE, P. M. Volume and biomass of trees in central Amazonia: influence of irregularly shaped and hollow trunks. **Forest Ecology and Management**, v. 227, n. 1-2, p. 14–21, May 2006.

NTM. **NTM Calculator**. Disponível em: www.ntmcalc.se. Acesso em: 17 jan. 2011.

NUMAZAWA, S.; BARROS, P. L. C. **Resíduos de exploração florestal - avaliação e determinação de índices**. Belém, 2009.

OECD. **Measuring material flows and resource productivity_synthesis report**, 2008.

OESP. 65% do corte de madeira no Pará é ilegal, diz Imazon. O Estado de São Paulo. Disponível em: www.estadao.com.br/noticias/impresso,65-do-corte-de-madeira-no-para-e-ilegal-diz-imazon-,780855,0.htm10. Acesso em: 6 out. 2011.

OLIVA, J. A. B. **Cenário Atual do Transporte Hidroviário Brasileiro**. Disponível em: www.antaq.gov.br/Portal/pdf/palestras/Mar0817PiracicabaAlexOliva.pdf. Acesso em: 20 nov. 2010.

ONS. **Sistema Interligado Nacional**, 2009. Disponível em: http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2009/02-Sistema-de-Transmissao-2009-2012.html. Acesso em: 02 mar. 2012

PALACE, M. et al. Necromass in undisturbed and logged forests in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 238, n. 1-3, p. 309–318, Jan. 2007.

- PEREIRA, D. et al. **Fatos florestais da Amazônia 2010**. Belém: Imazon, 2010.
- PEREIRA JR., R. et al. Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 168, n. 1-3, p. 77–89, Sept. 2002.
- PINEDO-VASQUEZ, M. et al. Post-boom logging in Amazonia. **Human Ecology**, v. 29, n. 2, p. 219–239, June 2001.
- RIGHI, C. A. et al. Biomass burning in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": Burning efficiency and charcoal formation in a fire after mechanized clearing at Feliz Natal, Mato Grosso. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 11, p. 2535-2546, Sep. 2009.
- RUZZENENTI, F.; BASOSI, R. Evaluation of the energy efficiency evolution in the European road freight transport sector. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 4079–4085, Oct. 2009.
- SAATCHI, S. S. et al. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. **Global Change Biology**, v. 13, n. 4, p. 816–837, 2007.
- SALESKA, S. R. et al. Carbon in amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, v. 28, p. 1554–1557, Nov. 2003.
- SCHULZE et al. How rare is too rare to harvest?: management challenges posed by timber species occurring at low densities in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 7, p. 1443–1457, Sept. 2008.
- SCHULZE, M.; ZWEEDE, J. Canopy dynamics in unlogged and logged forest stands in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 236, n. 1, p. 56–64, Nov. 2006.
- SEMA-MT. 8188-06. Decreto nº 8.188 - Regulamenta a Gestão Florestal do Estado de Mato Grosso. out. 2006.
- SILVA, J. N. M. et al. Growth and yield of a tropical rainforest in the Brazilian Amazon 13 years after logging. **Forest Ecology and Management**, v. 71, n. 3, p. 267–274, Feb. 1995.
- SIMPSON. **Specific gravity, moisture content, and density relationship for wood**: general technical report FPL, GTR-76. Disponível em: www.treeseearch.fs.fed.us/pubs/5914. Acesso em: 13 dez. 2011.
- SIST, P.; FERREIRA, F. N. Sustainability of reduced-impact logging in the Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 243, n. 2-3, p. 199–209, May 2007.
- SOARES NETO, T. G. et al. Biomass consumption and CO₂, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 2, p. 438–446, Jan. 2009.
- SOBRAL, L. et al. **Acertando o alvo 2: consumo de madeira amazônica e certificação florestal no Estado de São Paulo**. 2002.
- TRANSNORDESTINA LOGÍSTICA. Apresentação. Disponível em: http://cedes.pe.gov.br/c/document_library/get_file?folderId=2699&name=TRANSNORDESTINA+-++Marcelo+Barreto%2C+diretor+de+Neg%C3%B3cios+da+Transnordestina+Log%C3%ADstica+S.A.ppt. Acesso em: 3 fev. 2011.

TRANSPORTE MUNDIAL. Seção Teste. **Motor Press Brasil**, dez. 2010.

UHL, C. et al. Social, economic, and ecological consequences of selective logging in an Amazon frontier: the case of Tailândia. **Forest Ecology and Management**, v. 46, n. 3-4, p. 243–273, Dec. 1991.

UHL, C. et al. Natural Resource Management in the Brazilian Amazon. **BioScience**, v. 47, n. 3, p. 160–168, Mar. 1997.

USDA. **Wood Handbook - Wood as an Engineering Material**. 2010.

USE. **Feedstock composition glossary**. United States Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, 2011.

VALENTE, C.; SPINELLI, R.; HILLRING, B. G. LCA of environmental and socio-economic impacts related to wood energy production in alpine conditions: Valle di Fiemme (Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 17–18, p. 1931–1938, Dec. 2011.

VERISSIMO, A. et al. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: the case of Paragominas. **Forest Ecology and Management**, v. 55, n. 1-4, p. 169–199, Dec. 1992.

VIEIRA, S. et al. Slow growth rates of Amazonian trees: consequences for carbon cycling. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 102, n. 51, p. 18502-18507, Dec. 2005.

VVT. **LIPASTO - Emission calculation system**. Disponível em: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kapptiee.htm>. Acesso em: 17 jan. 2011.

ZENID, G. J. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2a. ed. São Paulo: IPT, 2009.

APÊNDICE A

Apêndice A - Influencia da intensidade de exploração na extração de madeira e na geração de resíduos por volume, massa e parcela da biomassa florestal, número de árvores extraídas e volume por árvore, relação entre biomassa degradada e biomassa extraída, redução total da biomassa da floresta, parcela da área de solo afetada e taxa de redução do dossel, de acordo com as referências adotadas.

Biomassa seca acima do solo	Extração					Resíduos			Biomassa degradada/ biomassa extraída	Redução total da biomassa	Solo (%)				Copa	Referência	
	t/ha	m³/ha	t/ha	%	Árvores /ha	m³ /árvore	m³/ha	t/ha	%	t/t	%	Total	Estradas e trilhas	Pátios	Queda da árvore		%
	364	28	19	5	5,0	5,6	39	27	7	1,4	13	17				3	Gerwing e Vidal (2002)
	300	18	12	4	2,9	5,2	47	32	11	2,6	15	6,3				19	Veríssimo et al (1992)
	364	30	21	6	5,6	5,4	58	40	11	1,9	17	22,8	10,9	1,5	10,3	10	Johns; Barreto e Uhl (1996)
	364	30	21	6	6,0	5,0	63	43	12	2,1	18	17				3	Gerwing e Vidal (2002)
	300	35	24	8	6,4	5,5	62	43	14	1,8	22	14,0				42	Veríssimo et al (1992)
	364	48	33	9	6,0	8,0	71	49	13	1,5	23	17				3	Gerwing e Vidal (2002)
	309*	21	15	5			99	68	22	4,6	27						Asner et al (2005)
	300	62	43	14	9,3	6,4	77	53	18	1,2	32	20,3				62	Veríssimo et al (1992)
	364	38	26	7	4,0	9,5	155	107	29	4,1	37						Gerwing e Vidal (2002)
	364	46	32	9	5,0	9,2	158	109	30	3,4	39						Gerwing e Vidal (2002)
	309	27	18	6			145	102	33	5,5	39						Asner et al (2005)
	364	72	50	14	9,0	8,0	144	99	27	2,0	41	30,0				37	Gerwing e Vidal (2002)
	309*	23	16	5	6,4	3,6						11,2	2,0	1,9	7,3		Asner et al (2002)
	309*	23	16	5	3,7	6,3						8,9	1,2	0,9	6,8		Asner et al (2002)
	309*	22	15	5													Asner et al (2005)
		19	13														Nepstad et al (1999)
		28	19														Nepstad et al (1999)
		40	28														Nepstad et al (1999)

* com base em Keller et al (2001)

APÊNDICE B

Apêndice B - Consumo de diesel e emissão de dióxido de carbono (CO₂) em transporte rodoviário de cargas, em unidade tonelada-quilômetro, segundo referências nacionais.

Tora	Serrada	Referência	Consumo	Fator de Emissão	Categoria ou modelo do veículo	Peso Carga	Peso Total ^(b)	Distância	Eficiência	Condições de transporte	Trajeto / Origem da madeira
			l/t.km	gCO ₂ /t.km		t	t	km	km/l		
Dados Macro											
		MME/FIPE (2009)	0,082	229,5	Média brasileira de transporte de cargas						
		ANTAQ (2008)	0,041								
Revista Especializada (teste)											
			0,015	40,7	Volvo FH 520 6x4	51,1	60,3		1,1	subida da serra	São Paulo a Peruíbe
			0,014	40,1	Volvo FH 440 6x2	49,0	58,2		1,2	subida da serra	São Paulo ao litoral
			0,013	37,3	Mercedes Benz Axor 2640 6x4	56,2	65,9		1,1	subida da serra	São Bernardo do Campo - Peruíbe
			0,012	33,8	Agrale 13000 - 4x2	12,0	18,0	262,0	4,6	média	Anchieta-Imigrantes
			0,008	21,7	Mercedes Benz Axor 2640 6x4	56,2	65,9		2,0	trecho urbano e descida serra	São Bernardo do Campo - Peruíbe
			0,008	21,3	Volvo FH 520 6x4	51,1	60,3		2,2	descida da serra	São Paulo a Peruíbe
			0,006	17,6	Volvo FH 440 6x2	49,0	58,2		2,7	nível do mar	São Paulo ao litoral
			0,006	16,4	Mercedes Benz Axor 2640 6x4	56,2	65,9		2,6	nível do mar	São Bernardo do Campo - Peruíbe
			0,004	11,5	Volvo FH 440 6x2	49,0	58,2		4,2	descida da serra	São Paulo ao litoral

Continuação do Apêndice B

Tora Serrada	Referência	Consumo	Fator de Emissão	Categoria ou modelo do veículo	Peso Carga	Peso Total ^(a)	Distância	Eficiência	Condições de transporte
		l/t.km	gCO ₂ /t.km		t	t	km	km/l	
	Madeireiras (autodeclaração)								
	Empresa A	0,022	62,2	Caminhão	15,0	22,5		2,0	média
	Empresa B	0,018	49,8	Caminhão	15,0	22,5		2,5	média
	Empresa C	0,018	49,7	Caminhão (com composição)	45,0	67,9		0,8	média
	Empresa D	0,017	48,1	Caminhão (novo)	15,0	23,3		2,5	média
	Empresa D	0,016	44,0	Bitrem	26,0	49,0		1,3	média
	Empresa E	0,015	41,5	Caminhão	15,0	22,5		3,0	média
	Empresa F	0,014	39,3	Carreta	25,0	39,6		1,8	média
	Empresa C	0,013	37,0	Caminhão (com composição)	30,0	52,9		1,4	média
	Empresa E	0,011	31,5	Caminhão	15,0	29,6		3,0	média
	Empresa A	0,011	29,4	Bitrem	30,0	52,9		1,8	média
	Empresa G	0,009	23,9	Caminhão	12,0	19,5		6,0	média
	Empresa H	0,008	23,6	Caminhão	15,0	29,6		4,0	média
	Empresa B	0,007	19,3	Romeu e Julieta	35,0	57,9		2,5	média
	Empresa G	0,007	18,8	Carreta	28,0	42,6		3,5	média
	Empresa I	0,006	17,3	Caminhão	17,4	24,9		6,5	média

(a) O peso total considera o peso do veículo, da carga e de 60% do volume máximo de combustível.

As empresas destacadas em itálico (A, B, C e F) comercializam madeira plantada.

Teor de carbono do diesel: 2.799 gCO₂/L; Densidade do diesel: 0,85 kg/l

Fonte: baseado em (EPE/MME, 2010; FIPE, 2010); (OLIVA, 2008); levantamentos de Káta R.G. Punhagui.

ANEXO A

Anexo A - Tipologias vegetais da Amazônia

Fonte: (IBGE, 2007a)