

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia de Produção
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

**USO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA SIMULAÇÃO DE
REMOÇÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM FLORESTA DE
EUCALIPTO**

Raiane Ribeiro Machado Gomes

Belo Horizonte
2014

Raiane Ribeiro Machado Gomes

**USO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA SIMULAÇÃO DE
REMOÇÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM FLORESTA DE
EUCALIPTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional e
Engenharia de Manufatura

Linha de Pesquisa: Otimização de Sistemas Logísticos
e de Grande Porte

Orientador: Samuel Vieira Conceição

Belo Horizonte
Departamento de Engenharia de Produção
2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Uso de Dinâmica de Sistemas para Simulação de Remoções de Gases do Efeito Estufa em Floresta de Eucalipto

RAIANE RIBEIRO MACHADO GOMES

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Doutor em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E ENGENHARIA DE MANUFATURA, linha de pesquisa Otimização de

Aprovada em 25 de junho de 2014, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Samuel Vieira Conceicao - Orientador
UFMG

Prof(a). Agostinho Lopes de Souza
UFV

Prof(a). Luiz Ricardo Pinto
UFMG

Prof(a). Wilfrid Keller Schwabe
UFMG

Prof(a). Hélio Garcia Leite
UFV

Belo Horizonte, 25 de junho de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos amores de minha vida...

Meu marido Marcelo

Minha filha Lara

Meus pais Carlos e Sônia

e a toda torcida positiva dos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos eu devo e muitos por estes quatro anos. Com muitos cruzei os caminhos que deixaram aqui suas marcas nestas páginas....

Primeiro agradeço a Deus por ter me guiado pela BR262 e me permitir escrever estas páginas.

Agradeço ao meu marido Marcelo e minha filha Lara por ter me apoiado e tolerado minha ausência, mesmo quando presente fisicamente.

Aos meus pais, Carlos e Sônia, e minha sogra Marilda por todo apoio, dedicação, torcida e orações.

Aos meus irmãos, cunhados e sobrinhas que mandam energias positivas a quilômetros de distância.

Ao meu orientador, Samuel Vieira Conceição, pela oportunidade, orientação, compreensão, aprendizado e amizade ao longo desses quatro anos.

Aos professores Helio Garcia Leite, Agostinho Lopes de Souza e Wilfrid Keller Schwabe pelo conhecimento compartilhado e todas as contribuições feitas.

Ao professor William Yonenaga, pela sua doação de tempo e conhecimento fundamentais ao trabalho.

Às “meninas” da república, Carol, Jamile, Stella e Cristiane pelos momentos vividos.

Aos colegas da UFMG pelos papos, estudos em grupo, discussões sobre matérias de provas Ivan, Anna e Charliston (turma da Geotecnia), e Thiago, Aloísio, Maurinice, Débora, Magno, José Paulo, Juliano, Wanderson, Pedro, Bruno e Guilherme (turma da Engenharia de Produção).

Aos Professores Leonardo Santiago e Luiz Ricardo Pinto, pelas aulas e, principalmente, pelo trato humano com os alunos.

Ao Antonilmar e Mauro, da empresa colaboradora, por toda contribuição.

À Universidade Federal de Viçosa pela concessão de bolsa e licença para treinamento.

Aos meus amigos que torceram, apoiaram e estiveram presentes quando a “bateria” precisava de uma carga de ânimo e distração.

.....obrigada!!

*Se puder considerar minha tese um livro,
Agora só me falta plantar uma árvore.....*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1. QUESTÃO DE ESTUDO	25
1.2. OBJETIVOS.....	26
1.2.1. GERAL.....	26
1.2.2. ESPECÍFICOS.....	26
1.3. JUSTIFICATIVA.....	26
1.4. ESTRUTURA DO ESTUDO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1. QUESTÕES CLIMÁTICAS	29
2.1.1. HISTÓRICO DAS INICIATIVAS INTERNACIONAIS SOBRE A MUDANÇA CLIMÁTICA.....	29
2.1.2. EFEITO ESTUFA E CONSEQÜÊNCIAS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	30
2.1.3. O CICLO DE CARBONO.....	32
2.1.4. IMPORTÂNCIA DAS FLORESTAS COMO SUMIDOURO	33
2.1.5. PROTOCOLO DE QUIOTO.....	34
2.1.6. MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO - MDL	35
2.1.6.1. LULUCF – <i>LAND USE, LAND USE CHANGE AND FORESTRY</i>	38
2.1.6.2. MDL FLORESTAL E AS REDUÇÕES CERTIFICADAS DE EMISSÕES	40
2.1.7. EMISSÕES DE CARBONO NAS ATIVIDADES FLORESTAIS	42
2.2. SISTEMA PRODUTIVO E OPERACIONAL FLORESTAL.....	46
2.2.1. ATIVIDADES DE EXAUSTÃO.....	48
2.2.1.1. PREPARO DO SOLO E DO PLANTIO.....	48
2.2.1.2. PLANTIO	51
2.2.1.3. IRRIGAÇÃO.....	51
2.2.1.4. ADUBAÇÃO.....	52
2.2.1.5. TRATOS CULTURAIS.....	52
2.2.2. ATIVIDADES DE COLHEITA FLORESTAL.....	53
2.2.2.1. CORTE	54
2.2.2.2. EXTRAÇÃO.....	55
2.2.2.3. CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO.....	56
2.2.3. ATIVIDADES DE TRANSPORTE FLORESTAL	57
2.2.4. ESTRADAS FLORESTAIS.....	58
2.3. CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE CARBONO	60
2.4. DINÂMICA DE SISTEMAS – DS.....	63

2.4.1. HISTÓRIA E APLICAÇÕES	63
2.4.2. CONCEITOS BÁSICOS	65
2.4.2.1. SISTEMAS	65
2.4.2.2. MODELO	66
2.4.3. DIAGRAMAS BÁSICOS	67
2.4.3.1. DIAGRAMA CAUSAL	67
2.4.3.2. DIAGRAMAS DE FLUXO E ESTOQUES	69
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	73
3.1. COLETA DE DADOS E VALIDAÇÃO	73
3.2. MATRIZ DE PAGAMENTO DE CRÉDITOS DE CARBONO	75
3.2.1. REMOÇÕES LÍQUIDAS REAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR SUMIDOUROS	77
3.2.1.1. ALTERAÇÕES NOS ESTOQUES DE CARBONO DA BIOMASSA VIVA DE ÁRVORES	77
3.2.1.2. AUMENTO NAS EMISSÕES DE GEE POR FONTES SITUADAS DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO	82
3.2.2. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DE LINHA DE BASE POR SUMIDOURO 87	
3.2.3. EMISSÕES DE GEE FORA DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO – FUGAS	88
3.2.4. REDUÇÕES CERTIFICADAS DE EMISSÕES (RCES)	97
3.2.5. MODELO DE GESTÃO AMBIENTAL	99
3.2.5.1. SIMULAÇÃO – DINÂMICA DE SISTEMAS	99
CAPÍTULO 4 - MODELO DE GESTÃO AMBIENTAL	100
4.1. ESTOQUE DE FLORESTA, MADEIRA E CARBONO DE BIOMASSA	100
4.1.1. FONTE DE DADOS	100
4.1.2. DINÂMICA DE SISTEMAS	104
4.1.2.1. DIAGRAMA DE LOOP CAUSAL	104
4.1.2.2. DIAGRAMA DE FLUXO E ESTOQUES	105
4.2. EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO	111
4.2.1. FONTE DE DADOS	111
4.2.2. DINÂMICA DE SISTEMAS	116
4.2.2.1. DIAGRAMA DE LOOP CAUSAL	116
4.2.2.2. DIAGRAMA DE FLUXO E ESTOQUES	117
4.3. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DA LINHA DE BASE	128
4.3.1. FONTES DE DADOS	128
4.3.2. DINÂMICA DE SISTEMAS	129

4.3.2.1. DIAGRAMA DE LOOP CAUSAL	129
4.3.2.2. DIAGRAMA DE FLUXO E ESTOQUES	130
4.4. EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS FORA DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO - FUGAS	134
4.4.1. FONTE DE DADOS	134
4.4.2. DINÂMICA DE SISTEMAS.....	135
4.4.2.1. DIAGRAMA DE LOOP CAUSAL	135
4.4.2.2. DIAGRAMA DE FLUXO E ESTOQUES	136
4.5. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DE UM PROJETO F/R.....	144
CAPÍTULO 5 - DISCUSSÕES E RESULTADOS	145
5.1. ESTOQUE DE FLORESTA, MADEIRA E CARBONO DE BIOMASSA	145
5.2. EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO	151
5.3. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DA LINHA DE BASE	154
5.4. EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS FORA DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO – FUGAS	155
5.5. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DE UM PROJETO DE F/R	157
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	160
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Partes Signatárias pertencentes ao Anexo I da UNFCCC.....	16
Tabela 2 - Participação relativa das atividades florestais nas emissões de CO ₂ na Finlândia.....	43
Tabela 3 – Diferenças entre as Modelagens <i>Soft</i> e <i>Hard</i>	63
Tabela 4 – Incremento corrente anual e volume de produção no ano de corte por local.....	97
Tabela 5- Programação anual do tamanho das áreas plantadas (hectares).....	98
Tabela 6 – Estimativa dos parâmetros obtidos para a equação de Gompertz.....	100
Tabela 7 – Valores regionais ajustados de ICA e volume de madeira para idade de 1 a 10 anos.....	100
Tabela 8 – Consumo médio de combustível e frequência de ocorrência das atividades.....	110
Tabela 9 - Intervalo de consumo de combustível das máquinas de estradas.....	111
Tabela 10 - Intervalos de valores de tamanho médio de área queimada anual por idade de plantio.....	112
Tabela 11 – Resultados de simulação da Região A com rotação de corte de 7 anos, em tCO ₂	144
Tabela 12 – Estoque regional acumulado de floresta com rotação de corte de 7 anos, em tCO ₂	145
Tabela 13 – Estoque regional acumulado de madeira com rotação de corte de 7 anos, em tCO ₂	146
Tabela 14 – Estoque regional acumulado CO ₂ e comparação entre ciclos de rotação, em tCO ₂	148
Tabela 15 – Comparação dos resultados dos diferentes ciclos de rotação de corte.....	148
Tabela 16 – Simulação dos estoques de emissões de GEE por queima de combustível no projeto, em tCO ₂	149
Tabela 17 – Emissões com a perda de biomassa no preparo do local para F/R, em tCO ₂	150

Tabela 18 – Emissões de carbono pela queima de biomassa em incêndios acidentais (tCO ₂).....	150
Tabela 19 – Emissões de carbono pela aplicação de nitrogênio – fertilização, em tCO ₂	151
Tabela 20 – Emissões de GEE ocorridas dentro dos limites do projeto, em tCO ₂	151
Tabela 21 – Emissões regionais de GEE dentro dos limites de projeto por rotação de corte, em tCO ₂	152
Tabela 22 – Remoções de GEE por linha de base, em tCO ₂	153
Tabela 23 – Fugas por queima de combustível da região A, em tCO ₂	154
Tabela 24 – Fugas totais regionais por rotação de corte, em tCO ₂	154
Tabela 25 – Resultados finais das simulações para projetos com 30 anos de duração.....	155
Tabela 26 – Subtrações dos estoques de CO ₂ pela linha de base e emissões de GEE ocorridas dentro e fora do projeto (%).....	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo do carbono: da biomassa florestal até seu retorno à atmosfera.....	28
Figura 2 – Tipos de Veículos utilizados no Transporte Florestal.....	54
Figura 3 – Diagrama Causal.....	64
Figura 4 – Elementos básicos do diagrama de estoque e fluxo.....	66
Figura 5 – Esboço da matriz de pagamento de créditos de carbono.....	72
Figura 6 – Diagrama de Loop Causal do Balanço da Matriz de Pagamento de Créditos de Carbono.....	102
Figura 7 – Modelo desenvolvido de estoque de floresta, madeira e carbono em projeto de reflorestamento.....	104
Figura 8 – Diagrama de Loop Causal do sequestro de CO ₂ pelo reflorestamento e as emissões de GEE oriundas dentro dos limites geográficos do projeto.....	115
Figura 9.1 – Modelo desenvolvido de estoque das emissões de GEE ocorridas dentro do projeto: Queima de combustíveis fósseis.....	116
Figura 9.2 – Modelo desenvolvido de estoque das emissões de GEE ocorridas dentro do projeto: perda de biomassa, incêndios acidentais, fertilização e saldo final.....	117
Figura 10 - Diagrama de Loop Causal das remoções de GEE pela linha de base.....	128
Figura 11 – Modelo desenvolvido de estoque das remoções de GEE de linha de base.....	129
Figura 12 - Diagrama de Loop Causal das emissões de GEE ocorridas fora dos limites geográficos do projeto – Fugas.....	134
Figura 13.1 – Modelo desenvolvido de estoque das emissões de GEE ocorridas fora do projeto: queima de combustíveis fósseis.....	135
Figura 13.2 – Modelo desenvolvido de estoque das emissões de GEE ocorridas fora do projeto: deslocamento de atividades econômicas e saldo final.....	136
Figura 14 – Modelo desenvolvido das remoções líquidas por sumidouro.....	142

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Florestas Plantadas de Eucalipto no Brasil em 2009 (% da área total).....	70
Gráfico 2 – Estoque regional acumulado de madeira com rotação de corte de 7 anos, em tCO ₂	145
Gráfico 3 – Estoque regional acumulado de CO ₂ por rotação de corte, em tCO ₂	147
Gráfico 4 - Emissões regionais de GEE dentro dos limites de projeto por rotação de corte, em tCO ₂	152
Gráfico 5 – Fugas totais regionais por rotação de corte.....	154
Gráfico 6 – Remoções regionais líquidas de CO ₂ entre ciclos.....	156

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um modelo de gestão ambiental para monitoramento e avaliação das remoções líquidas de gases de efeito estufa (GEE) por sumidouros. A determinação dessas remoções é dada pelo detalhamento do cálculo das remoções de carbono pelas florestas, deduzidas as emissões de GEE ocorridas dentro e fora dos limites geográficos do projeto e das remoções de GEE pela linha de base. Foi utilizada e avaliada a Dinâmica de Sistemas como técnica de simulação para quantificação de créditos de carbono de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que se mostrou adequada pelos resultados obtidos e por sua sensibilidade às características regionais, traduzidas nas avaliações realizadas. Pelo uso da Dinâmica de Sistemas foi modelado o crescimento de florestas de oito diferentes regiões do estado de Minas Gerais no Brasil, com diferentes características edafoclimáticas dessemelhantes, constatando sua eficiência como técnica de simulação. O modelo se mostrou sensível às características regionais, onde a diferença nos estoques de floresta ao final do ciclo de 30 anos com rotações de corte de 7 anos foi de 45,1% entre as regiões de melhor e pior resultado. Verificou-se que as rotações de corte nem sempre acarretam no maior estoque acumulado de CO₂ sequestrado, sendo possível obter um ganho de até 21,0%. Foram modeladas ainda as emissões de GEE ocorridas dentro dos limites geográficos do projeto, detalhando as quatro fontes de emissões: queima de combustíveis fósseis, perda de biomassa na preparação do local e conversão para reflorestamento, queima de biomassa devido aos incêndios acidentais, e emissões de N₂O pela aplicação de nitrogênio (fertilização). Verificou-se que as emissões por queima de combustíveis é o principal responsável pelas emissões de GEE ocorridas dentro dos limites geográficos do projeto. A modelagem das emissões de GEE ocorridas fora dos limites geográficos do projeto (Fugas) contempla a queima de combustíveis fósseis e os deslocamentos de atividades econômicas que eram sediadas nas terras antes da implantação do projeto. A queima de combustíveis fósseis ocorre no transporte de mudas, de fertilizantes, de mão de obra, de madeira colhida fora da área do projeto, e nas inspeções e monitoramento das atividades de campo. Pelas simulações, constatou-se que estas emissões são insignificantes. As simulações finais do modelo executam a contabilização das remoções líquidas de GEE de todo o projeto de reflorestamento. Para as condições simuladas é grande o saldo dos créditos de carbono, sendo encontrado, para uma das regiões de estudo, com rotação de corte de 7 anos, um saldo final de

69.061.720 unidades de créditos de carbono. Os resultados mostraram que as rotações de corte adotadas pela empresa não resultam nos maiores saldos de créditos de carbono.

ABSTRACT

This study aimed to develop a model of environmental management for monitoring and evaluation of net removals of greenhouse gases (GHG) by sinks. The determination of these removals is given by detailing the calculation of removals of carbon by forests, deducted GHG emissions occurring within and without the geographic boundaries of the project and the GHG removals by baseline. System Dynamics was used and evaluated as simulation technique for the carbon credits quantification from projects of the Clean Development Mechanism (CDM), which revealed itself adequate for the results obtained and its sensitivity to regional characteristics, reflected in the evaluation performed. By using the System Dynamics growth forests of eight regions in the state of Minas Gerais in Brazil has been modeled, with different soil and climatic characteristics dissimilar, evidencing its efficiency as simulation technique. The model was sensitive to regional characteristics, where the difference in forest inventories at the end of a cycle of 30 years with cutting rotations of 7 years was 45.1% among the regions best and worst result. It has been found that the cutting rotations are not always cause a larger stock of sequestered CO₂ accumulated, it is possible to obtain a gain of 21.0%. Further GHG emissions occurring within the geographic boundaries of the project were modeled, detailing the four sources of emissions: fuel burning, biomass loss in site preparation and conversion to reforestation, biomass burning due to accidental fires, and N₂O emissions by the application of nitrogen (fertilization). It was found that emissions from fuel burning is the largest contributor to GHG emissions occurring within the geographic boundaries of the project. The modeling of GHG emissions occurring outside the geographic boundaries of the project (Leakage) involves the burning of fuels and displacement of economic activities that were based on the land prior to project implementation. The burning of fuel occurs in the transport of seedlings, fertilizer, labor, wood harvested outside the project area, and the inspection and monitoring of field activities. By the simulations, it was found that these emissions are insignificant. The final simulations execute the accounting of net GHG removals around the reforestation project. For the simulated conditions is large balance of carbon credits being found for one of the study areas, with rotating cutting seven years, a final balance of 69,061,720 units of carbon credits. The results showed that the cutting rotations adopted by the company do not result in higher sales of carbon credits.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Existe uma crescente conscientização na sociedade sobre os potenciais problemas ambientais derivados do aquecimento global. Este aquecimento está atrelado ao aumento dos Gases de Efeito Estufa (GEE), cuja emissão iniciou-se com o processo de industrialização no século XIX. As consequências desse aumento de temperatura podem ir desde o desaparecimento de certas atividades produtivas até a de extinção de algumas espécies. Para Guitart e Rodriguez (2010), mesmo nos cenários mais otimistas, as mudanças climáticas podem provocar prejuízos em diversas cadeias de produção do setor agrícola, com fortes impactos negativos nas economias em desenvolvimento, que dependem em grande medida do setor primário.

O tema de mudança climática faz parte da realidade política e econômica internacional, com repercussão nas diversas áreas do conhecimento, demandando desenvolvimentos científicos e tecnológicos, bem como a adoção de inovações. Além das oportunidades econômicas, as mudanças globais e os riscos associados ao crescimento da vulnerabilidade climática induzem aumento do compromisso e da responsabilidade corporativa, com medidas de mitigação e adaptação dos processos produtivos e dos padrões de consumo (CGEE, 2008).

O relatório de mudanças climáticas emitido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*), em 2007, afirma ser muito provável que a ação humana seja responsável pelas mudanças observadas no clima global. Segundo Grimm (2010), esta afirmação é baseada em simulações e projeções com modelos climáticos, usando a variação natural da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e o que se supõe ser a variação natural acrescida da contribuição antrópica. O CGEE - *Centro de Gestão e Estudos Estratégicos* (2008) indicou que o aumento da temperatura média global do planeta será ainda maior no futuro e demonstra que esse aquecimento é causado pelas emissões antrópicas acumuladas de GEE, principalmente, o dióxido de carbono (CO₂), oriundo da queima de combustíveis fósseis, o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), sobretudo proveniente das atividades agropecuárias.

A principal iniciativa internacional de combate ao efeito estufa identifica-se com o Protocolo de Quioto, no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC*). Esse protocolo, estabelecido em 1997 e em vigor em fevereiro de 2005, prevê redução média de 5,2% das emissões de gases do efeito estufa, do grupo dos países desenvolvidos, até o ano de 2012, tomando como base as emissões do ano de 1990 e, simultaneamente, isentando os países em desenvolvimento de compromissos quantitativos de redução (Gutierrez, 2007). Para não comprometer as economias dos países compromissados com a redução, o protocolo estabelece que parte da redução de GEE possa ser feita através de negociação com países em desenvolvimento por meio dos mecanismos de flexibilização que são instrumentos de facilitação para cumprimento destas reduções. Desta forma, o protocolo cria as bases formais para o surgimento de um formal mercado mundial de carbono.

O Ministério de Ciência e Tecnologia do Brasil - MCT (2009) afirma que, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) foi criado para auxiliar o processo de redução de emissões de gases do efeito estufa ou de captura de carbono (ou sequestro de carbono) por parte dos países industrializados, sendo a negociação de Créditos de Carbono sua forma transacional.

Segundo Oliveira e Andrade (2009), países em desenvolvimento podem programar projetos que contribuam para o desenvolvimento sustentável e que apresentem uma redução de emissões de GEE, obtendo as Reduções Certificadas de Emissões (RCE). As RCE, emitidas pelo Conselho Executivo do MDL, podem ser negociadas no mercado global. Como os países industrializados possuem cotas de redução de emissões de GEE, estes podem adquirir as RCE de desenvolvedores de projetos em países em desenvolvimento para auxiliar no cumprimento de suas metas.

Krug (2004) apontou que, no contexto das negociações do Protocolo de Quioto, da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, as únicas atividades de projeto elegíveis envolvendo o setor florestal, voltadas para a contabilidade de carbono através da remoção de CO₂ da atmosfera, são florestamento e reflorestamento (F/R). Esta definição é aplicável para o primeiro período de compromisso (2008 a 2012) e deverá ser revista quando das negociações para futuros períodos de compromisso. Em função das incertezas associadas à estimativa e monitoramento do carbono nos diferentes reservatórios florestais (biomassa viva – acima e abaixo do solo; matéria orgânica morta – madeira morta e serrapilheira; e

carbono no solo orgânico), o Protocolo de Quioto limitou a utilização de créditos oriundos de atividades de projetos MDL florestais pelas Partes Anexo I da UNFCCC (denominação dada aos países desenvolvidos listados na Tabela 1), a 1% de suas respectivas emissões de CO₂ em 1990, vezes cinco, no primeiro período de compromisso (2008 – 2012).

Tabela 1 – Partes Signatárias pertencentes ao Anexo I da UNFCCC

Alemanha	Eslovênia	Itália	Portugal
Austrália	Estados Unidos da América	Japão	Reino Unido da Grã Bretanha e Irlanda do Norte
Austria	Espanha	Letônia	República Checa
Bielo-Rússia	Estônia	Liechtenstein	República Eslovaca
Bélgica	Federação Russa	Lituânia	Romênia
Bulgária	Finlândia	Luxemburgo	Suécia
Canadá	França	Mônaco	Suíça
Com. Econômica Europeia	Grécia	Noruega	Turquia
Croácia	Hungria	Nova Zelândia	Ucrânia
Dinamarca	Irlanda	Países Baixos	Polônia
Eslováquia	Islândia		

Fonte: MCT, 2009

Considerando que o total de emissões de CO₂ pelas Partes Anexo I, em 1990, totalizou 13.728.306 Gg CO₂ (ou 10³tCO₂), o limite de 1% corresponde a 137.283 Gg CO₂. Este total, entretanto, refere-se ao limite superior da quantidade permitida para utilização, que somente será atingido caso todas as Partes Anexo I ratifiquem o Protocolo de Quioto e façam uso total do limite permitido. Com a decisão de não ratificação do referido Protocolo pelos Estados Unidos, responsáveis por 36,1% das emissões de 1990, o teto máximo passa a ser 87.712 Gg CO₂ por ano (Krug, 2004).

Do ponto de vista do sequestro de carbono, as florestas têm papel fundamental, pois estocam nas suas árvores e no solo, mais carbono do que o existente atualmente na atmosfera (IPCC, 2000a). Tendo em vista esse foco, o Brasil poderá assumir posição privilegiada em relação aos países que buscam reverter o processo de mudança climática global, tanto do ponto de vista de reduções de emissões evitando queimadas, quanto do sequestro de carbono pelos florestamento e reflorestamento, uma vez que poucos países possuem condições climáticas e tecnológicas apropriadas à produção florestal como o Brasil (Rocha, 2002 *apud* Paixão, 2004).

De acordo com Oliveira e Andrade (2009), as oportunidades que o Brasil tem de inserção no mercado de carbono é devido a variáveis como extensão territorial que favorece o sequestro de carbono; potencial de produção de álcool-combustível através de fontes naturais renováveis e a necessidade e desenvolvimento de novos projetos, aliados a eficiência energética. Há de se destacar ainda que as atividades florestais asseguram o sequestro de carbono mesmo que em caráter temporário, uma vez que há incerteza quanto à permanência do carbono estocado nas florestas.

Estudos sobre custos de sequestro de carbono florestal têm sido realizados para uma grande diversidade de tipos de florestas, espécies e locais, incluindo as plantações florestais e o manejo das florestas existentes (Richards e Stokes, 2004). Outros pesquisadores também se preocupavam com a valorização das questões de tonelada de carbono sequestrado (Huang e Kronrad, 2001). No entanto, poucos estudos lidaram com potencial de medição de sumidouros de carbono e os custos de sequestro de carbono de espécies de crescimento rápido como o eucalipto, cortado em curtas rotações (6-12 anos) para produtos de vida curta, tais como madeira para celulose e combustíveis, sendo este um sistema silvicultural generalizado na maior parte do hemisfério sul (Guitart e Rodriguez, 2010).

O CGEE (2008) aponta que não se pode garantir que o carbono contido em uma floresta não retorne para a atmosfera. Isso pode ocorrer principalmente durante as queimadas, o que inclusive é um dos fenômenos cuja frequência aumentará em decorrência das mudanças climáticas segundo os relatórios do IPCC. Essa incerteza associada aos estoques de carbono contidos nas florestas ficou conhecida como não permanência, sendo exclusiva do MDL florestal.

A questão florestal nas mudanças climáticas tem sua importância reconhecida, porém ainda são poucas as Metodologias de Florestamento/ Reflorestamento aprovadas pelo Painel Executivo. No mundo, até o mês de junho de 2011 são 3.733 projetos totais registrados, sendo 24 projetos na área de florestamento/ reflorestamento (UNFCCC, 2011a).

Segundo Silva (2007), o sequestro de carbono pode ser quantificado por meio da estimativa da biomassa da planta acima e abaixo da superfície do solo. Para se proceder à avaliação dos teores de carbono dos diferentes componentes da vegetação e, portanto, contribuir para estudos de balanço energético e do ciclo de carbono na atmosfera, é necessário quantificar a biomassa vegetal de cada componente da vegetação.

A eficiência do uso de florestas nativas ou plantadas para sequestrar e armazenar carbono, segundo Reis *et al.* (2001), deve levar em conta o estado atual de degradação da área, o manejo adotado, o tempo de permanência da floresta antes de ser explorada e a vida média dos produtos advindos da floresta explorada.

De acordo com SBS (2008), a produtividade de eucalipto no Brasil tem atingido índice cerca de dez vezes maior que a produtividade dos países líderes deste mercado, cujo crescimento das florestas pode ser comparado como, por exemplo, com a Finlândia cuja média de rendimento é de $4\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$; Suécia $5,5\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$; Espanha $10\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$; Portugal $12\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$; Chile $30\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$; África do Sul $20\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$; e Brasil 35 a $55\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Estes dados nos mostram a eficiência dos plantios de eucalipto no Brasil e a vantagem frente aos demais países. Aliar o cultivo de eucalipto, mesmo que para diferentes fins como celulose, papel, madeira, entre outros, com a geração de créditos de carbono pode tornar o negócio financeiramente mais atrativo.

A avaliação do crescimento florestal e estoque de carbono em projetos florestais pode ser vista como uma situação de dilema social em que a busca de lucros mais elevadas podem levar ao uso sub-ótimo, exploração e preservação dos bens públicos, neste caso, a floresta. O jogo de bens públicos (PGG) é frequentemente empregado para estudar os problemas que surgem devido à dissonância entre os interesses individuais e sociais (Chen et al., 2012a). As empresas podem aumentar seu lucro por negligenciar métricas ambientais da sustentabilidade, enquanto que os bens públicos podem ser depreciados ou perdidos devido a padrões individuais ou interesses econômicos. Embora semelhante ao PGG, o dilema social risco coletivo pode captar melhor algumas características importantes do dilema social que se colocam com frequência em situações realistas. Um exemplo é o dilema da mudança climática, em que uma região ou nação pode optar por não reduzir a emissão de carbono, a fim de colher os benefícios econômicos de curto prazo (Chen et al., 2012a, b). Várias pesquisas e modelos teóricos de estudam e explicam tais resultados desfavoráveis. Por exemplo, o PGG é um dos modelos utilizados para o estudo de dilemas sociais e cooperação em grupos de tamanho considerável (Chen et al., 2012b, 2012c; Szolnoki et al., 2012.). Neste sentido, a pesquisa inicial de Chen et al. (2012a) mostraram que p mais forte feedback entre o desempenho do grupo e nível social de risco coletivo é, em geral, mais favorável para a evolução bem sucedida de cooperação pública, mas apenas se as metas coletivas a serem alcançados são configuradas em um nível moderado. Além disso, a

incapacidade de atingir as metas coletivas tem consequências desastrosas para todos os membros do grupo, independente de suas estratégias (Chen et al., 2012b).

Conceitos e comentários ainda mais detalhados e abrangentes em relação PGG, dilema social risco coletivo, jogos de co-evolucionários e dinâmica evolutiva dos grupos de interações nas populações estruturadas podem ser encontrados em Santos et al. (2008), Perc e Szolnoki (2010) e Perc et al. (2013).

Simbiose industrial é outro modelo que pode ser usado para estudar os sistemas industriais e a situação dilema social. Este modelo lida com os fluxos físicos de materiais e energia em sistemas industriais locais e regionais através de uma abordagem do sistema. As ideias-chave que suportam a simbiose industrial são a colaboração e a sinergia e ambas cujas possibilidades oferecidas pela proximidade geográfica têm uma semelhança com os ecossistemas naturais (Chertow, 2000; Veiga e Magrini, 2009; Sokka et al., 2011; Boons et al., 2011). A literatura apresenta vários métodos que podem ser usados para estudar sistemas industriais, ou seja, aqueles baseados em técnicas matemáticas de programação e otimização (Diaz-Balteiro e Romero, 2003; Diaz-Balteiro e Rodriguez, 2006; Karlsson e Wolf, 2008), modelos de processos ambientais (Gupta et al., 2002; Miehle et al., 2006; Pérez-Cruzado et al., 2011), modelos de negócios e econômicos (Tsvetkova e Gustafsson, 2012; Mendes et al., 2012; Nghiem, 2013), princípios físicos e simulações (Baldwin et al., 2004; Huo e Chai, 2008), a aplicação de análise de decisão multi-critérios (Khalili e Duecker, 2013; Giménez et al., 2013), o mapeamento de riscos ambientais (Gupta et al., 2002) e modelos de cadeia de suprimentos (Hall, 2000; Seuring e Muller, 2008; Seuring, 2013).

Tem se observado na literatura (Routa et al., 2011; Guitart e Rodriguez, 2010; Gonzalez-Benecke et al., 2010), o consumo de energia primária e emissões de CO₂ relacionadas com as operações florestais, incluindo a aplicação de fertilizantes. Afirmam ainda esses autores que, estas emissões são pequenas em relação ao potencial aumento de biomassa das florestas, contrapondo as emissões das atividades operacionais pelo sequestro de CO₂ pelas árvores e solo. Operações com motores manuais e mecanizações realizadas sob atividades de manejo florestal requerem o uso de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, liberam dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Este gás é responsável atualmente por mais de 60% do efeito estufa antropogênico, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2006).

Para realizar uma avaliação abrangente e precisa do balanço líquido de carbono no ecossistema florestal, é de fundamental importância quantificar as emissões de CO₂

resultantes das operações florestais (Liski et al., 2001). A quantificação dessas emissões é também essencial para analisar os efeitos sobre as emissões de CO₂ usando biomassa ao invés de combustíveis fósseis para a produção de energia (Schwaiger e Schlamadinger, 1998) ou produtos de madeira na construção civil em vez de materiais intensivos em energia, como concreto, aço ou alumínio (Petersen e Solberg, 2002). Estas emissões também são de particular interesse para outras áreas, tais como estudos de avaliação do ciclo de vida (LCA) realizados em produtos florestais (Dias et al., 2007a). Trabalhando com as emissões de CO₂ de algumas operações florestais em plantios de eucalipto e pinus, e considerando apenas poucas opções de equipamento, Dias et al. (2007b) concluiu que é possível reduzir até 20% das emissões de CO₂, considerando alterações possíveis dentro da disponibilidade de sistema de manejo e equipamentos utilizados em Portugal. Já no Brasil, por apresentar plantios de eucalipto com intenso uso de técnicas cada vez mais eficientes e grande diversidade edafoclimáticas, há grande diversidade de sistemas de manejo e equipamentos que podem ser combinados, além da inclusão do transporte da madeira, manutenção de estradas e outras atividades operacionais florestais para esta análise.

Garren et al. (2011) e Malaczynski e Duane (2009) afirmaram que as emissões de GEE por veículos rodoviários dependem de uma série de fatores. Primeiro, a economia de combustível do veículo representa o número total de quilômetros percorridos por um veículo em uma unidade de combustível (por exemplo, as milhas por galão; quilômetro por litro) e, segundo, o tipo de combustível do veículo resulta em diferentes emissões de CO₂ com base no teor de carbono do tipo de combustível (por exemplo, gasolina, diesel e etanol). Um terceiro fator é a milhagem veicular total percorrida (VMTs) para cada veículo com uma correlação direta de emissões mais elevadas associadas com maior milhagem (ou quilometragem). Portanto, a redução das emissões de GEE do transporte poderia ser alcançada através do aumento da economia de combustível dos veículos, substituindo os combustíveis por aqueles com baixo teor de carbono por unidade de energia e, ou, reduzindo o número de quilômetros percorridos.

Os sistemas de mecanização florestal disponíveis atualmente possuem grande capacidade operacional e funcionam à base de diesel, exceto a motosserra. No entanto, há uma diversidade de equipamentos e possibilidade de combinações para realização das atividades de extração, colheita, transporte e estradas florestais. Acredita-se que estas combinações apresentam desempenho operacional e gasto energético diferentes,

permitindo economias financeiras e menores taxas de emissão de GEE. Para isto, deve-se considerar não só a quilometragem percorrida, tempo de funcionamento da máquina e o tipo de combustível utilizado como propôs Garren et al. (2011) e Malaczynski e Duane (2009), mas também a topografia e a eficiência de operação das máquinas para determinação dos níveis de emissões.

Diferentes esforços têm sido feitos para minimizar os efeitos climáticos oriundos das emissões de GEE, como por exemplo, o aumento do florestamento e reflorestamento. Aqui se propõe mostrar que, mesmo com a enorme contribuição das áreas de reflorestamento no sequestro do CO₂, estas atividades também são responsáveis por emissões, mas que estas podem ser minimizadas.

No Brasil, são utilizados diferentes equipamentos nas atividades operacionais florestais por diversos fatores, como por exemplo, topografia, porte das máquinas, custos, entre outros. Como exposto, a vantagem produtiva desta cultura no Brasil, sua potencialidade na geração de créditos de carbono e suas existentes emissões de CO₂, fazem-se necessários, portanto, desenvolvimento de um modelo de simulação detalhado que permita avaliação de cenários com diferentes equipamentos utilizados nas operações florestais e seus respectivos desempenhos energéticos e impactos nas emissões de GEE.

As atividades silviculturais e industriais da produção de celulose e papel possuem responsabilidade quanto às mudanças climáticas antropogênicas, por demandar grande quantidade de atividades que apresentam alto gasto energético. A energia consumida na produção de madeira representada pelos combustíveis (gasolina e diesel) e fertilizantes é responsável por emissões de GEE. O consumo dos combustíveis e suas emissões advêm dos diferentes métodos e equipamentos utilizados no Brasil e que sofrem variações em função do objetivo da produção da madeira e as condições edafoclimáticas (solo e clima) da região. Os fertilizantes, sintéticos ou orgânicos, apresentam dessemelhantes níveis de emissões dos GEE. No entanto, os reflorestamentos representam grandes sumidouros de carbono, tanto acima quanto abaixo do solo, que estocam o dióxido de carbono da atmosfera. Acredita-se que a diminuição, bem como a reversão do cenário previsto das mudanças climáticas só pode ocorrer com o equilíbrio ou neutralização das emissões de GEE pelas atividades emissoras.

O trabalho aqui proposto teve por objetivo desenvolver um modelo de simulação dos créditos de carbono em função das emissões de carbono detalhadas das

atividades operacionais de exaustão, colheita, transporte e manutenção de estradas florestais e demais atividades emissoras ocorridas dentro e fora dos limites geográficos do projeto com o uso da dinâmica de sistemas. Com isso, analisar o saldo das remoções líquidas de GEE por sumidouros sob a perspectiva detalhada das emissões de carbono pelos equipamentos utilizados no manejo de reflorestamentos de eucalipto no Brasil para abastecimento de indústrias de celulose e papel.

1.1. QUESTÃO DE ESTUDO

Muitos trabalhos acerca do assunto de mudanças climáticas e emissões de carbono têm sido feitos nas mais diferentes áreas. Conforme é constatado no referencial teórico aqui apresentado, a temática é extensa. Este trabalho buscou preencher as lacunas da literatura vinculadas à geração de créditos de carbono em projetos de reflorestamento de eucalipto para produção de celulose e papel, e empregando a técnica de simulação de Dinâmica de Sistemas. O reflexo desta necessidade está na discussão acerca da significância do volume de emissões de um projeto de reflorestamento para uso industrial. Também destaca o baixo número de projetos de MDL Florestal registrados para contabilização e comercialização de créditos de carbono.

A literatura, conforme referencial teórico apresentado a seguir, mostra que as emissões de CO₂ pelas atividades operacionais florestais são baixas se comparadas com a capacidade de sequestro de carbono. No entanto, com o alto índice de mecanização e o avanço tecnológico das máquinas, questiona-se o quão baixas são as emissões de CO₂. Além do que, considerando o cenário atual das mudanças climáticas, é necessário minimizar qualquer emissão de carbono.

As maiores contribuições científicas deste estudo estão na avaliação do uso de dinâmica de sistemas para modelagem do balanço de créditos de carbono em atividades de reflorestamento, por considerar um conjunto maior e detalhado de variáveis correspondentes aos diferentes sistemas silviculturais e máquinas florestais disponíveis. Assim, a questão de estudo é:

Como detalhar a quantificação das emissões e remoções de GEE em projetos de reflorestamento, identificar as principais fontes de emissão e avaliar cenários hipotéticos de diferentes condições, de forma a apoiar a decisão de implantação de um projeto de MDL Florestal para geração de créditos de carbono comercializáveis?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. GERAL

Desenvolver um modelo de simulação de gestão ambiental da matriz de pagamento de créditos de carbono para projetos de reflorestamento de eucalipto. O modelo deve ser capaz de simular as emissões, remoções e fugas de CO₂ das áreas de reflorestamento com grande detalhamento das atividades vinculadas ao projeto. Além de simular cenários hipotéticos que possam contribuir para a decisão de implantação de um projeto de MDL Florestal.

1.2.2. ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- ✓ Avaliar o impacto das emissões de carbono de todas as atividades ocorridas dentro e fora dos limites geográficos do projeto sob a metodologia regulamentada pelo Conselho Executivo da UFNCCC para quantificação de créditos de carbono baseados em biomassa;
- ✓ Permitir que o modelo de gerenciamento ambiental atenda as atividades florestais de pequena e grande escala, uma vez que ambas são passíveis de certificação de redução das emissões;
- ✓ Simular cenários que permitam avaliar condições diferentes de remoções e emissões de CO₂ do projeto, contribuindo para decisão de implantação de novos projetos de MDL Florestal.

1.3. JUSTIFICATIVA

Taylor et al. (2010) afirmam que já é entendido que as árvores absorvem dióxido de carbono através da fotossíntese e que muita atenção tem sido dada ao armazenamento de carbono pelas florestas. Apontam ainda que políticas como esquemas de créditos de carbono por recompensas pelo carbono sequestrado em árvores estão sendo desenvolvidas, no entanto, estas políticas arriscam ser contra-produtivas para o objetivo de reduzir os níveis de carbono atmosférico. Asseguram ainda que, uma colheita sustentável de árvores para combustível e produtos é uma maneira mais

eficiente de reduzir o consumo de combustíveis fósseis do que maximizar o armazenamento de carbono nas árvores, que deve ser incentivado.

A ciência florestal foi desenvolvida na premissa de que a colheita de madeira pode ser sustentada a longo prazo em áreas florestais. Isto tem sido demonstrado por séculos em muitos países ao redor do mundo. Produção de madeira não é o único valor que florestas podem proporcionar; no entanto, independente do objetivo da gestão, não é correto assumir que desencorajar o corte de árvores equivale à sustentabilidade florestal ou que encorajar a colheita de árvores resulte em desmatamento (Taylor et al., 2010). De fato, a recompensa financeira fornecida pela colheita de produtos florestais pode proporcionar um poderoso incentivo para manter florestas saudáveis e para evitar o desmatamento através das conversões do uso da terra.

Para Scarpinella (2002), quantificar o carbono de uma floresta é um dos problemas mais complexos de ser resolvidos, pois envolve fatores externos como a variação do clima, o perfil do solo, a temperatura local e o tipo de vegetação. Para floresta de eucalipto, esta operação é um pouco mais simples, por tratar-se de uma monocultura onde se espera produtividade homogênea, de acordo com a variedade cultivada e com os dados para o cultivo que se dispõe da região. Mas continua as variáveis do solo, clima, temperatura, enfim da interação com o meio.

Manejo florestal de recursos pode afetar positivamente a mudança climática. No entanto, a implementação de qualquer tipo de tratamento de gestão exige operações florestais, como o processamento da colheita, ou a conversão e transporte de biomassa. Essas operações afetam o perfil de GEE das atividades florestais através das emissões diretas do equipamento e da eficiência relativa de manuseio do volume de biomassa (Brinker et al., 2002). Operadores empregam uma ampla gama de equipamentos e métodos operacionais, madeireiros, com motosserras, até sistemas altamente mecanizados na exploração de madeira, para reduzir os impactos ambientais e criar eficiências econômicas. Um sistema de baixas emissões pode ser relativamente ineficiente no processamento do volume de carbono e, portanto, uma má escolha sob cenários de mudanças climáticas (Brinker et al., 2002). No entanto, as necessidades de energia para a colheita e transporte são substancialmente mais baixos do que para a fabricação do produto, onde a energia necessária para a secagem é um fator importante, mas pode ser amplamente fornecido por biocombustíveis com insignificantes emissões de gases líquidas (Puettmann e Wilson, 2005; Malmshemer et al., 2008). Portanto, por mais que as florestas tenham grande capacidade de absorção de carbono, nas atividades

de reflorestamento – com eucalipto para produção de madeira para celulose – é emitido carbono na atmosfera oriundos da queima de combustíveis pelas máquinas e equipamentos.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. QUESTÕES CLIMÁTICAS

2.1.1. HISTÓRICO DAS INICIATIVAS INTERNACIONAIS SOBRE A MUDANÇA CLIMÁTICA

O CGEE (2008; 2010) e Pinto et al. (2008) sintetizaram todo o histórico das iniciativas internacionais acerca das mudanças climáticas como se segue:

✓ Em 1971, a Academia de Ciências da Suécia organizou um Estudo do Impacto do Homem sobre o Clima (*Study of Man's Impact on Climate – SMIC*) com o objetivo de subsidiar a conferência da ONU no ano seguinte.

✓ Em 1972, aconteceu a Conferência de Estocolmo de 1972 (*United Nations Conference on Man and the Environment*) que teve grande importância ao resultar na criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

✓ Em 1988, foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*), pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e PNUMA, da ONU.

✓ Em 1990, foi determinada a Resolução da Assembleia Geral da ONU sobre a proteção do clima para as futuras gerações e mandato de negociação de uma Convenção sobre Mudança do Clima.

✓ Em 1992, foi determinada a Resolução da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC*) e sua abertura às assinaturas por ocasião da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Rio-92.

✓ Em 1994, entrou em vigor a Convenção (UNFCCC), ao ser ratificada pelo número suficiente de Partes.

✓ Em 1995, realizou a Primeira Conferência das Partes (*COP1*).

✓ Em 1997, foi adotado o Protocolo de Quioto e aberto para assinaturas.

✓ Em 2005, o Protocolo de Quioto entrou em vigor ao ser ratificado pelo número suficiente de Partes.

✓ Até novembro de 2007, 175 países assinaram e ratificaram o acordo de reduções, representando 62% do total das emissões dos países desenvolvidos do Anexo I.

✓ Em 2009, com recorde de participação, tanto por parte de chefes de estados, como do setor privado, sociedade civil e imprensa, a 15ª Conferencia das Partes (COP-15) fez historia, pois inseriu na agenda internacional discussões sobre as mudanças climáticas.

2.1.2. EFEITO ESTUFA E CONSEQUÊNCIAS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A atmosfera é uma camada de gases formada, principalmente, por nitrogênio (78,09%), oxigênio (20,95%), argônio (0,93%) e dióxido de carbono (0,03%), além de traços de outros elementos como hélio, metano, óxido de nitrogênio, água, entre outros. O metano, o óxido nitroso e o dióxido de carbono são alguns dos gases considerados de efeito estufa, cujas propriedades radiativas tem sido objeto de intenso estudo atualmente (Khandekar et al., 2005). Esses gases, juntamente com as nuvens, possibilitam a ocorrência do efeito estufa, responsável por manter a superfície terrestre cerca de 30°C mais aquecida do que na ausência deste fenômeno (UNFCCC, 2011b). Dos raios do sol que chegam à Terra, 30% são refletidos de volta para o espaço, sem que atinjam a superfície. Os 70% restantes são responsáveis pelo clima e pelas condições físicas da Terra. (Goldemberg, 1989).

O efeito estufa é necessário para a manutenção da vida na Terra, entretanto, a sua intensificação tem preocupado a sociedade, em virtude do aumento significativo das temperaturas e da ocorrência de certos fenômenos climáticos de maior frequência, os quais são resultantes de maior concentração de GEE na atmosfera, oriundos das atividades antrópicas (Ribeiro, 2007).

Dentre os GEE, o dióxido de carbono (CO₂) é o que apresenta maior parcela de contribuição no aquecimento global, pois é responsável por 55% do total de emissões de GEE na atmosfera (Scarpinella, 2002). Sua concentração, entre os anos de 1750 e 2005, aumentou de 280 partes por milhão (ppm) para 379 ppm, sendo as emissões advindas,

principalmente, do uso de combustíveis fósseis e da mudança do uso da terra, numa proporção menor. O metano (CH₄), na mesma escala citada, teve um aumento de sua concentração de 715 partes por bilhão (ppb) para 1774 ppb, tendo como principais fontes a agricultura e o uso de combustíveis fósseis, e apresenta potencial de aquecimento 21 vezes maior do que o CO₂. O óxido nitroso (N₂O), por sua vez, apresentou um aumento de concentração de 270 ppb para 319 ppb, no mesmo período. Mais de um terço de todas as suas emissões advém de fontes antropogênicas, principalmente a agricultura, e seu potencial de aquecimento global é 310 vezes superior ao do CO₂ (IPCC, 2011a).

O Quarto Relatório do IPCC (2011b) intitulado “Impactos, adaptações e vulnerabilidade à mudança do clima” apresenta os dados mais recentes relacionados aos efeitos das mudanças climáticas no meio ambiente natural e humano. Segundo esse relatório, muitos sistemas naturais estão sendo afetados pelas mudanças climáticas regionais, principalmente pelos aumentos de temperatura, o que pode até causar impactos positivos a curto prazo, mas quase sempre negativos a longo prazo. Um exemplo disso é a produtividade na agricultura e de madeira comercial que tende a aumentar levemente com a mudança do clima em curto e médio prazo, com uma grande variabilidade regional em torno da tendência global a longo prazo.

O derretimento das geleiras, devido ao aumento da temperatura, é outro ponto que pode alavancar diversas consequências tais como o risco de inundações seguido de uma posterior redução do fluxo dos rios à medida que as geleiras diminuem. Isso pode prejudicar o abastecimento de água em comunidades que dependem de rios alimentados por geleiras. As secas e inundações, por sua vez, tendem a ter um aumento da frequência de ocorrência o que traz prejuízos para diversos setores, sendo os sistemas costeiros e zonas de baixa latitude os mais afetados pelas inundações e a agricultura e silvicultura pela seca. Alguns dos principais efeitos adversos do aquecimento global sinalizados e já percebidos nos dias atuais são: aumento do nível do mar; alteração no suprimento de água doce; maior número de ciclones; tempestades de chuva e neve forte mais frequentes; e forte e rápido ressecamento do solo (Ribeiro, 2007).

Os prejuízos sociais da alteração dos sistemas naturais pelas mudanças climáticas irão variar amplamente em função do local e escala, sendo que os países em desenvolvimento tendem a ser os mais afetados devido à restrita capacidade de adaptação e à maior dependência de recursos sensíveis ao clima, tais como oferta local de água e alimento (IPCC, 2011b).

2.1.3. O CICLO DE CARBONO

Os quatro principais compartimentos de carbono na Terra são os oceanos, a atmosfera, as formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral e os ecossistemas terrestres compostos pela biota e pelo solo (Boina, 2008).

O carbono atmosférico é retido na floresta através do processo de fotossíntese pelo qual o CO₂ se armazena na biomassa florestal. Parte do carbono capturado é utilizado na respiração e o resto se transfere à biomassa arbórea, constituída pelos troncos, galhos, raízes e folhas (Guitart, 2003), como mostra a Figura 1.

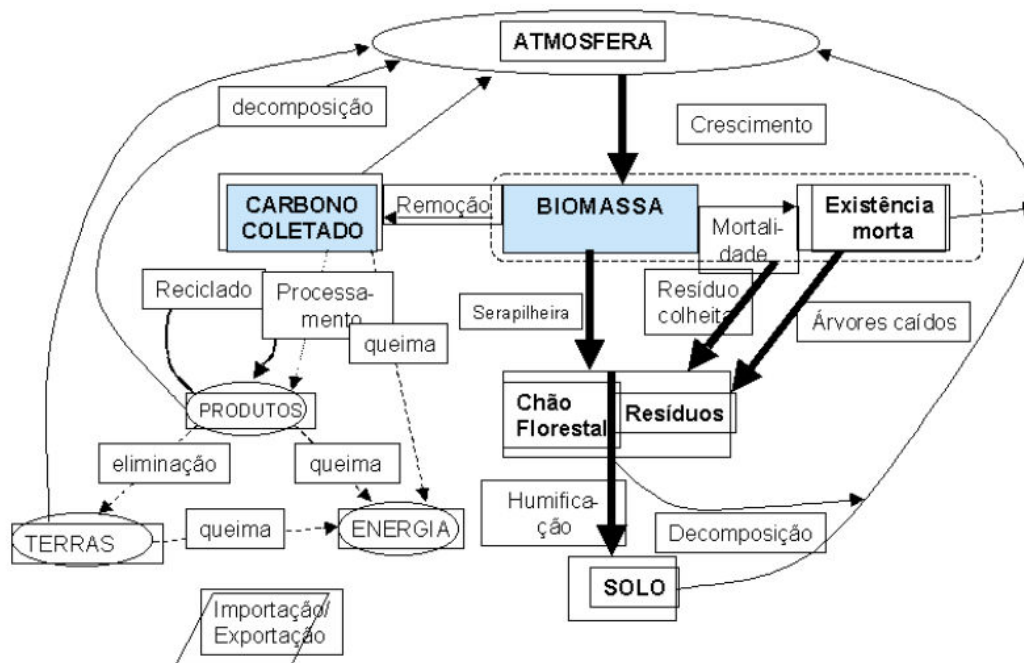


Figura 1 – Ciclo do carbono: da biomassa florestal até seu retorno à atmosfera
Fonte: Adaptado da USDA Forest Service por Guitart (2003)

O dióxido de carbono (CO₂), o principal gás causador do efeito estufa, circula entre quatro principais compartimentos de estoques de carbono: a atmosfera, os oceanos, os depósitos de combustível fóssil e a biomassa terrestre e solo. No balanço global de carbono na atmosfera de nosso planeta, dos 6,3 Gt C/ano emitidos, 3,3 Gt C/ano permanecem na atmosfera, provocando o aumento do efeito estufa, e o restante são reabsorvidos pelos oceanos e pela biota terrestre, aproximadamente em partes iguais. Segundo o Relatório Especial sobre Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Floresta (IPCC, 2000a), no período de 1989 a 1998, a emissão de CO₂ resultante da queima de combustível fóssil e a produção de cimento foi de 6,3 Gt C/ano (nos anos

1980 foi de 5,4 Gt C/ano); desta emissão, os oceanos absorveram 2,3 Gt C/ano e o ecossistema terrestre absorveu 0,7 Gt C/ano, líquidos. Portanto, o balanço anual de CO₂, na última década, foi um incremento de 3,3 Gt C/ano na atmosfera na última década (Yu, 2004).

2.1.4. IMPORTÂNCIA DAS FLORESTAS COMO SUMIDOURO

Goudriaan (1992) afirma que, o dióxido de carbono (CO₂) ou gás carbônico do ar, presente na concentração de 0,03%, é a única fonte de carbono para as plantas, capturado e incorporado por elas em seus tecidos. A transferência para as plantas é dada por difusão do meio em que está mais concentrado (ar) para o menos concentrado (líquido intracelular) onde se dissolve e fica à disposição do material celular. A matéria seca vegetal contém bastante carbono fixado na constituição do esqueleto de todas as substâncias orgânicas das células.

Segundo Hoen & Solberg (1994), a produção florestal influencia o fluxo de carbono, em forma de CO₂, provindo da atmosfera por dois processos: fixação (assimilação) e emissão. A fixação representa o incremento da biomassa em árvores vivas mediante a fotossíntese. A emissão representa a decomposição da biomassa decorrente da morte natural dos indivíduos ou da exploração relacionada aos usos dados pelo homem.

O vegetal consome parte dos produtos da fotossíntese para o funcionamento de suas células, mediante a respiração celular, processo em que moléculas orgânicas e de O₂ se combinam resultando em CO₂, H₂O e energia (Amabis e Martho, 2004). Por meio da fotossíntese, as plantas capturam CO₂ da atmosfera, fixam o carbono na biomassa e liberam o oxigênio (O₂) para o ambiente (Ortiz, 1997). A síntese da matéria orgânica ocorre por meio da fotossíntese realizada pelas plantas verdes e é denominada pela produção bruta. As plantas consomem uma parte dos fotossintetizados na respiração, e o restante é incorporado à planta e chamado de produção líquida (Satoo e Madgwick, 1982).

Existem métodos para estimar a quantidade de CO₂ fixado pela vegetação, no entanto, em numerosos estudos, Brown et al.(1986), Hoen e Solberg (1994), Ortiz (1997) e Ramírez et al. (1997) empregaram um único método para avaliar este processo,

no qual os dados existentes de biomassa por hectare são multiplicados por um fator que envolve o conteúdo de carbono (em proporção) da biomassa seca e a relação entre o peso molecular de CO₂ (44) e o peso atômico do C (12).

Em seu estudo sobre valoração das plantas florestais da Costa Rica, Ramírez et al. (1997) assumiram um conteúdo de carbono médio de 50% para as cinco principais espécies plantadas no país, entre as quais se encontram a *Gmelia arbórea*, *Tectona gradis* e *Eucalyptus deglupta*. Em seu estudo sobre as implicações das plantações tropicais como sumidouros de carbono, Brown et al. (1986) assumiram que se 1 grama de biomassa é igual a 0,5 grama de carbono é o mesmo que dizer que a fração de carbono de matéria vegetal seca (CF) é de 50%. Goudriaan (1992) fundamenta que o conteúdo de carbono na matéria vegetal seca varia entre 45 e 50% dependendo da espécie. Desta forma, nos trabalhos em geral que tratam do inventário de biomassa e sequestro de carbono em plantios de eucalipto tem-se utilizado como padrão CF igual a 0,5 para 1 grama de biomassa.

Para Brown (1997), as florestas desempenham papel primordial no ciclo do carbono (C). Armazenam grandes quantidades de carbono na vegetação e no solo, trocando C com a atmosfera por meio da fotossíntese e da respiração. São fontes de C atmosférico quando são perturbadas por causas antrópicas ou naturais e se convertem em sumidouros durante a recuperação de áreas degradadas. Enfim, podem ser manejadas para tomar seu papel no ciclo global do carbono.

Há quatro formas principais que o manejo florestal pode ser usado para reduzir CO₂ na atmosfera: (1) Aumentar a quantidade de florestas por meio de florestamento e reflorestamento (MDL Florestal); (2) Aumentar a densidade média de carbono no tempo ou no estoque de carbono por unidade de área de terra; e (3) Evitar o desmatamento e degradação florestal (U.S. EPA, 2005; Canadell e Raupach, 2008; Gonzalez-Benecke et al., 2010).

2.1.5. PROTOCOLO DE QUIOTO

Em 1997, foi realizada a Terceira Conferência das Partes (*Conferences of the Parties – COP*) da Convenção do Clima, ocorrida no Japão, onde foi aprovado o Protocolo de Quioto, que estabelece compromissos por parte dos países desenvolvidos

(Anexo I) de atingir uma meta global de redução média de 5,2% das emissões dos GEE, em relação ao ano de 1990, durante o período de 2008-2012 (Paixão, 2004).

O mesmo autor acrescenta que, o Protocolo, que foi aberto para assinatura em 1998, previa que a entrada em vigor se daria após 90 dias após sua ratificação por pelo menos 55 Partes da Convenção, ou seja, por países do Anexo I que representam, no mínimo, 55% das emissões totais de dióxido de carbono em 1990. Para isto, o Protocolo de Quioto (UNFCCC, 1997) estabeleceu três mecanismos de flexibilização a serem utilizados para o cumprimento dos compromissos da Convenção: Implementação Conjunta – IC (*Joint Implement – JI*), Comércio de Emissões (*Emissions Trade – ET*) e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – MDL (*Clean Development Mechanism – CDM*).

A Implementação Conjunta permite o estabelecimento de projetos entre países do Anexo I com a geração de Unidades de Redução de Emissão (UREs). O Comércio de Emissões prevê a comercialização de Unidades de Quantidade Atribuída (UQAs) entre os países do Anexo I. E o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo possibilita aos países do Anexo I a implementação de projetos de redução de emissões em países não-Anexo I, havendo a geração de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) e promovendo o desenvolvimento sustentável nos países hospedeiros do projeto (UNFCCC, 2011b). Este é o único mecanismo de flexibilização no qual o Brasil pode participar.

2.1.6. MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO - MDL

Segundo Krug (2004), o MDL foi uma proposta apresentada pelo governo brasileiro e, Pinto *et al.* (2008) complementa que, foi aceito pelos membros da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), de acordo com o que estabelece o Protocolo de Quioto, na busca pela reversão do processo de mudanças climáticas observado ao longo dos anos.

Para Pinto *et al.* (2008) o MDL é uma alternativa para o incentivo aos países que não integram o Anexo I para a viabilização do desenvolvimento sustentável através da implementação de projetos que contribuam para os objetivos estabelecidos no Protocolo de Quioto. Ao mesmo tempo, o MDL permite que parte dos compromissos de redução de emissão de gases do efeito estufa seja atingida pelos países do Anexo I.

Paixão (2004) afirma que o MDL permite que os países desenvolvidos invistam nos países em desenvolvimento em projetos de redução de emissões de baixo custo e que recebam créditos pela redução das emissões. Os países desenvolvidos podem então aplicar esses créditos nas metas fixadas para 2008-2012, reduzindo assim os cortes que teriam de ser feitos nas próprias economias. Como muitas das oportunidades de redução das emissões são mais baratas em países em desenvolvimento, isso aumenta a eficiência econômica para alcançar as metas iniciais de redução de emissões de GEE. Como a contribuição das emissões de GEE para as mudanças climáticas é a mesma, independentemente de onde elas ocorram, o impacto no meio ambiente global é o mesmo. Entretanto, Pinto *et al.* (2008) destaca que o Protocolo de Quioto ressalva para o impedimento do uso ilimitado dos projetos de MDL por países do Anexo I.

As reduções de emissões resultantes de cada MDL devem ser certificadas por entidades operacionais designadas pela Conferência das Partes (COP). Os critérios adotados para a aprovação são: em primeiro lugar, a participação voluntária dos países envolvidos. Em segundo, que existam benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo relacionados com a mitigação da mudança do clima. E por fim, que as reduções de emissões sejam adicionais as que ocorreriam na ausência da atividade certificada de projeto. As reduções certificadas de emissões obtidas durante o ano de 2000 até o início do primeiro período de compromisso, 2008, também podem ser utilizadas para auxiliar no cumprimento das metas do primeiro período de compromisso (UNFCCC, 1997).

Segundo Santin (2007), a implementação de um projeto de MDL, capaz de gerar crédito de carbono, é composta por sete etapas: a concepção do projeto, seguida pela validação, aprovação, registro, monitoramento, certificação e por fim, a emissão dos certificados de créditos de carbono. Além dos projetos de grande porte, na etapa de certificação das reduções de emissões, o aceite de projetos de pequena escala aumentou as possibilidades de incremento do mercado de carbono. No que se referem ao Brasil, estes projetos são especialmente atrativos, pois privilegiam os de energias renováveis e os de florestamento e reflorestamento, segmentos em que o País possui vantagens tecnológicas e recursos naturais apropriados.

Atualmente existem cinco tipos de atividades de projeto no âmbito do MDL, visando à obtenção de reduções de emissões de GEE, segundo o CGEE (2010):

- MDL Unilateral: projetos de MDL que envolvem apenas participantes de Partes Não-Anexo I. São desenvolvidos sem qualquer apoio tecnológico e financeiro de

Partes Anexo I. Surgiram por várias razões, mas pode-se destacar a demora em entrada em vigor do Protocolo de Quioto e o anseio dos empresários de países Não-Anexo I.

- MDL de grande escala: esse tipo de atividade de projeto caracteriza-se pelo fato de não haver limites para sua extensão. Outro aspecto importante é que as metodologias utilizadas nesse tipo de projeto devem ser submetidas pelo proponente, tornando-se públicas após sua aprovação. Caso não haja, entre as metodologias aprovadas, uma que se aplique a atividade de projeto proposta, o proponente pode optar por elaborar e submeter uma nova metodologia.

Um projeto de grande escala também pode ter seu limite fragmentado entre inúmeras atividades, unidas em um único projeto de MDL. Não ha limites para o número ou tamanho das atividades produtivas que se pretende unir em uma única atividade de projeto de MDL.

As metodologias para atividades de MDL de grande escala são mais conservadoras e bastante restritivas. Assim, aspectos como fugas, transporte de matéria-prima, emissões durante a fase de construção, emissões decorrentes da disposição de resíduos, calibração de equipamentos e registro de informações são tratados em maior detalhe.

- MDL de pequena escala: os projetos de MDL de pequena escala surgiram a partir da percepção de que os custos de procedimento envolvidos no desenvolvimento de uma atividade de MDL de grande escala inviabilizariam sua aplicação por parte de uma série de empresas de menor porte.

Conceitualmente, um projeto de MDL de pequena escala assemelha-se a um de grande escala, porém com limitação de tamanho estabelecida em sua metodologia e restrição quanto à subdivisão de uma atividade em varias de pequena escala. Além de uma maior facilidade na aplicação, essas metodologias são mais simples e flexíveis do que as metodologias de grande escala quanto aos aspectos anteriormente citados.

- MDL florestal: esse tipo de projeto diferencia-se do MDL tradicional por envolver exclusivamente atividades de uso da terra, mudança no uso da terra e florestas (sumidouros de GEE). Assim, o MDL florestal restringe-se as atividades de florestamento e reflorestamento. O trabalho aqui proposto será realizado com o intuito de avaliar o impacto do manejo florestal nas emissões e sequestro de carbono.

- MDL Programático ou Programa de Atividades (PoA): permite que uma política local/ regional/ nacional, visando à redução de emissões de GEE, seja incorporada a projetos de MDL, o que não era possível anteriormente. Assim, o PoA

constitui-se por uma ação voluntária, coordenada por entidades públicas ou privadas, que implementem políticas ou medidas que promovam a redução de emissões GEE ou aumentem redes de remoção dos gases que sejam adicionais a um cenário sem as atividades dos projetos, podendo ser implementado em diferentes locais, com um conjunto de tecnologias, e uma metodologia comum para todas as atividades. A vantagem do PoA é que ele possibilita o desenvolvimento de uma série de pequenas atividades de projeto no âmbito do MDL, já que simplifica os procedimentos e reduz os custos, por incluir varias atividades em um único programa.

De acordo com CEBDS (2002), duas linhas de projetos são consideradas elegíveis como medidas de redução do efeito estufa no MDL:

- Redução de emissões através do aumento da eficiência energética, do uso de fontes de combustíveis renováveis, adotando melhores tecnologias e sistemas para o setor de transportes e para o processo produtivo de modo geral;

- Resgate de emissões através de sumidouros e da estocagem dos gases do efeito estufa retirados da atmosfera, como: a injeção de CO₂ em reservatórios geológicos ou atividades relacionadas ao uso da terra sejam pelas atividades agropecuárias e florestais; estas últimas são conhecidas no processo de negociação do Protocolo de Quioto como atividades de LULUCF (*Land-Use, Land-Use Change and Forestry* – Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas).

2.1.6.1. LULUCF – *LAND USE, LAND USE CHANGE AND FORESTRY*

Segundo Rocha (2003), as atividades de Uso da Terra, Mudança de Uso da Terra e Florestas (*Land Use, Land Use Change and Forestry* – LULUCF), chamados por muitos de sumidouros (“*sinks*”), sempre foram motivos para controvérsias dentro do processo de negociação da Convenção do Clima. O fracasso da COP 6 pode ser explicado, em parte, pela divergência existente entre vários países quanto à utilização de tais atividades para atingir as metas de redução de emissões de GEE.

A fim de solucionar os impasses criados dentro deste tema, Renner (2004) afirma que na COP 7 as Partes acordaram que os projetos de sequestro de carbono relacionados à LULUCF devem ser elaborados de acordo com os seguintes princípios. Em síntese são: as atividades de LULUCF devem ser baseadas em sólido conhecimento

científico; metodologias consistentes devem ser utilizadas ao longo do tempo para determinação das estimativas (de sequestro de carbono) e do monitoramento das atividades de LULUCF; a simples presença de estoques de carbono deve ser excluída da contabilidade e a implementação de atividades de LULUCF deve contribuir para a conservação da biodiversidade e para o uso sustentável dos recursos naturais.

Dentre as atividades florestais, destacam-se o florestamento e reflorestamento, conforme definidos no anexo da Decisão 11/CP. 7 (UNFCCC, 2001). Corte (2005) e Guitart e Rodriguez (2010) apontam que a modalidade LULUCF prevê a implantação de florestas com a finalidade de fixar carbono existente na atmosfera na forma de poluentes. Assim os detentores de reflorestamentos podem se beneficiar desse processo mediante a elaboração de projetos que gerem RCE (Reduções Certificadas de Emissões).

Segundo Rocha (2003), o Acordo de Marrakesh, define as regras operacionais para LULUCF para os mecanismos de flexibilização e para os Artigos 5, 7 e 8 que tratam, respectivamente, da definição do sistema nacional para o inventário de emissões, das informações adicionais à Convenção derivadas do Protocolo e do processo de revisão das comunicações nacionais. Neste acordo foram estabelecidas regras que limitam a utilização de créditos oriundos de florestas e agricultura.

Para que os projetos de LULUCF sejam passíveis de aprovação é necessário que os mesmos apresentem os seguintes fundamentos: elegibilidade, adicionalidade e condições suficientes para seu monitoramento. Corte (2005) apresenta que no critério da elegibilidade existe uma restrição às áreas a serem incluídas em projetos de MDL. A restrição é que na data base de 31/12/1989 a área não tivesse cobertura florestal. No Acordo de Marrakesh, de 2001, ficou definido que as áreas de conservação florestal não são elegíveis no Protocolo de Quioto. A conservação florestal, que ficou de fora do MDL no primeiro período de compromisso, diz respeito à manutenção das áreas florestais já existentes com a finalidade de serem conservadas.

Conforme expôs Cenamo (2004), na fase de configuração do projeto, é necessário estabelecer a adicionalidade e a linha de base (*baseline*) do projeto, além da metodologia de monitoramento que será utilizada para verificar o cumprimento das metas de redução de emissões e, ou, de sequestro de carbono. As atividades de um projeto de MDL são consideradas adicionais se as emissões antropogênicas de GEE forem menores que as que ocorreriam na ausência do projeto; e, ou, se o sequestro de carbono for maior do que aquele que ocorreria na ausência do projeto. A linha de base

de um projeto de MDL é o cenário que representa as emissões antropogênicas de GEE que ocorreriam na ausência do projeto. Para auxiliar as Partes na apresentação de tais informações, o Comitê Executivo MDL (EB) desenvolveu um documento de base denominado “*Project Design Document- PDD*”.

Cenamo (2004) ainda complementa que, uma vez registrado o projeto passa para a fase de monitoramento, a ser feito de acordo com a metodologia previamente aprovada. Esse monitoramento irá acontecer seguindo um plano estabelecido pela metodologia e terá como resultados relatórios que serão submetidos para a Entidade Operacional Designada (EOD) a fim de ocorrer à verificação do projeto. A verificação é a revisão periódica e independente realizada pela entidade operacional e monitoramento posterior às reduções de GEE e, ou, sequestro de carbono ocorrido durante o período de verificação. A certificação, por sua vez, é a garantia por escrito, dada pela entidade operacional, de que durante um determinado período o projeto alcançou as reduções de GEE e, ou, sequestro de carbono propostos. Com a certificação, é possível solicitar do Comitê Executivo a emissão dos RCE relativos à quantidade reduzida e, ou, sequestrada.

Existem boas perspectivas para o Brasil desenvolver projetos florestais baseados no Protocolo de Quioto. Porém, também se sabe que o Protocolo de Quioto é bastante rígido e outros mercados mais flexíveis estão surgindo, especialmente, nos EUA. Embora eles não tenham ratificado o Protocolo de Quioto reconhecem a problemática do Efeito Estufa e buscam outros mecanismos que considera mais efetivos no combate às mudanças climáticas (Corte, 2005).

2.1.6.2. MDL FLORESTAL E AS REDUÇÕES CERTIFICADAS DE EMISSÕES

É amplamente aceito que as florestas e o manejo florestal têm o potencial de desempenhar um papel importante na mitigação ativa de CO₂ atmosférico (Schlamadinger e Marland, 1996; Sedjo et al., 1997; Marland et al., 1997; Canadell e Raupach, 2008; Malmshemer et al., 2008; Gonzalez-Benecke et al., 2010). Adicionalidade é um atributo chave que deve ser, obrigatoriamente, considerado na concepção de qualquer projeto de compensação de carbono (Nabuurs et al., 2007). Adicionalidade é o princípio em que, para os projetos de compensação ter um efeito real

sobre o CO₂ atmosférico, o projeto deve sequestrar mais CO₂ do que teria sido sequestrado na ausência do projeto (Malmsheimer et al., 2008). Para projetos florestais em que as árvores são plantadas em áreas anteriormente não florestadas (florestamento) ou em áreas não florestadas por algum período de tempo (reflorestamento), a adicionalidade normalmente é facilmente estabelecida, uma vez que o uso da floresta na maioria dos casos sequestra muito mais CO₂ do que a anterior ocupação do solo não florestado (Gonzalez-Benecke et al., 2010).

Projetos de florestamento e reflorestamento (F/R) podem gerar créditos de redução de gases de efeito estufa (GEE) através da remoção de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera por meio de processos biofísicos e armazená-lo em estoques de carbono terrestre, como a biomassa, litter e os solos. Uma característica dessas atividades de F/R é a possibilidade de não permanência, pelo qual o carbono armazenado é posteriormente perdido seja por distúrbios naturais, como fogo e vento ou perturbações antrópicas, como a colheita. Esses distúrbios causam a liberação do carbono armazenado para a atmosfera como CO₂, proporcionando, assim, um benefício temporário de mitigação das alterações climáticas (Murray et al.; 2012).

As modalidades e procedimentos relacionados ao MDL florestal foram estabelecidos durante a COP-9, realizada em Milão, em dezembro de 2003. A entrada de remoções de emissões através de atividades de LULUCF foi definida atribuindo-se as florestas a função de remover da atmosfera os gases de efeito estufa (GEE) emitidos pelos países Anexo I, funcionando como um mecanismo auxiliar na obtenção de metas de redução. Esse tipo de atividade de MDL começou em novembro de 2005, após a aprovação da primeira metodologia pelo Conselho Executivo. Porém, não contempla nem o manejo florestal nem a regeneração ou conservação de florestas como atividades no âmbito do MDL (CGEE, 2010). O manejo florestal, que é o foco deste estudo, contribui com emissões de carbono pela queima de combustíveis devido à intensa mecanização das atividades.

Ribeiro (2007) esclarece que o florestamento é a conversão, induzida diretamente pelo homem, de terra que não foi florestada por um período de pelo menos 50 anos em terra florestada por meio de plantio, semeadura e, ou, promoção induzida pelo homem de fontes naturais de sementes. Já o reflorestamento é a conversão, induzida diretamente pelo homem, de terra não florestada em terra florestada por meio de plantio, semeadura e, ou, promoção induzida pelo homem de fontes naturais de sementes, em área que já foi florestada, mas convertida em terra não florestada. Para o

primeiro período de compromisso, as atividades de reflorestamento estarão limitadas ao reflorestamento que ocorra nas terras que não continham florestas em 31 de dezembro de 1989.

As atividades no âmbito do MDL florestal geram ao final do ciclo do MDL unidades de reduções de emissões específicas as chamadas Reduções Certificadas de Emissões Temporárias (RCET) e Reduções Certificadas de Emissões de Longo Prazo (RCEL). Os proponentes de projetos MDL florestal devem selecionar um dos dois modos de quantificação das reduções de emissões de GEE, o modo RCET ou o modo RCEL. A escolha do modo RCET implica quantificações da biomassa estocada em cada período de compromisso, de maneira independente em relação aos demais períodos, ou seja, a cada novo período de compromisso deve-se realizar uma verificação, quantificando o montante de RCE estocado na biomassa e emitindo RCETs equivalente a essa quantia. Paralelamente, as RCETs emitidas no período de compromisso anterior deverão ser substituídas por outros tipos de unidades ou por RCETs válidas. A escolha pelo modo RCEL implica verificações incrementais ao longo da vida útil do projeto (CGEE, 2010; Guitart e Rodriguez, 2010).

O Conselho Executivo do MDL (CDM Executive Board - CDM EB) supervisiona o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto, sob a autoridade e orientação da Conferência das Partes atuando nas reuniões das Partes do Protocolo de Quioto. O Conselho Executivo do MDL é o ponto final de contato para Participantes do Projeto MDL para registro de projetos e emissão de RCEs (UNFCCC, 2014a).

2.1.7. EMISSÕES DE CARBONO NAS ATIVIDADES FLORESTAIS

Em contraste, a aplicação de abordagens do manejo florestal para aumentar o sequestro de carbono em florestas existentes foram, às vezes, recebida com ceticismo (Sawyer, 1993; IPCC, 2002; Niesten et al., 2002; Schwarze et al., 2002; Kallbekken et al., 2007), em parte porque os efeitos de manejo florestal são considerados pequenos ou complexos demais para quantificar (Chomitz, 2000).

Sequestro de carbono não é, atualmente, o principal condutor para o manejo da maioria dos povoamentos florestais. Para Gonzalez-Benecke (2010), o sequestro de carbono florestal deve ser considerado como um elemento do portfólio de bens e

serviços que são derivados de florestas. Na presença de um mercado carbono, estes serviços, em alguns casos terão valor de mercado, e os valores para compensação carbono provavelmente serão considerados juntamente com os valores dos produtos tradicionais da floresta nas avaliações econômicas de alternativas de manejo. Na ausência de mercados viáveis de compensação de carbono, o seu sequestro continuará a ser um importante serviço fora do mercado, e, como tal, continuará a ser uma consideração importante do manejo do ecossistema num futuro próximo.

Segundo Fisher et al. (2007), Sundquist et al. (2008), Gonzalez-Benecke et al. (2010), uma vantagem importante das abordagens do manejo florestal para a mitigação de CO₂ é que as tecnologias de silvicultura são bem desenvolvidas, adequadas e de baixo custo para utilização, o que permitiria o manejo florestal atuar como "ponte" de curto e médio prazo durante o desenvolvimento de outras tecnologias de sequestro e enquanto a sociedade implementa programas de redução de emissões.

Florestas e manejo florestal têm o potencial de desempenhar um papel crucial na mitigação de CO₂ atmosférico através de aumento de armazenamento de carbono (Gonzalez-Benecke et al., 2010). A fixação do CO₂ atmosférico em tecido vegetal é um dos mecanismos mais eficazes para compensar as emissões de carbono (Sedjo, 1989; Sedjo et al., 1997; Nabuurs et al., 2007). Nas últimas três décadas, os gases de efeito estufa (GEE) aumentaram uma média de 1,6% ao ano, com emissões de dióxido de carbono (CO₂) a partir do uso de combustíveis fósseis crescem a uma taxa média de 1,9% ao ano (Nabuurs et al., 2007). Mitigação do CO₂ atmosférico exige uma abordagem que combina redução de emissões de CO₂ com o aumento do armazenamento de CO₂ (Sundquist et al., 2008).

Abordagens silviculturais têm o potencial de influenciar fortemente estoques florestais de carbono por unidade de área. O exemplo disto, nos pinheiros do sul dos EUA, a preparação do local, controle de vegetação concorrente, fertilização e uso de genótipos superiores podem aumentar a produtividade até quatro vezes em comparação com a produtividade de plantações de meados 1950 (Fox et al., 2007). Gestão do tempo de rotação é conhecida por afetar o carbono armazenado em povoamentos (Cooper, 1983; Cropper e Ewel, 1987) e o uso de rotações estendida tem sido proposta como uma maneira eficaz de gerir a contabilidade do carbono das florestas (Liski et al., 2001). Segundo Marland e Marland (1992) e Johnsen et al. (2001), para contabilização do carbono é importante notar que seus estoques na floresta manejada podem ser dividido em dois reservatórios grandes: carbono *in situ* que representa a biomassa em pé

e matéria orgânica do solo e, carbono *ex situ* sequestrado em produtos criados a partir de madeira colhida. Gonzalez-Benecke et al. (2010) complementa que, tanto o tamanho dos reservatórios *in situ* e *ex situ* podem ser influenciados pelo manejo florestal. Destaca-se ainda que as operações silviculturais emitem CO₂ (Markewitz, 2006; Gonzalez-Benecke, 2010).

Trabalhos estão sendo desenvolvidos no intuito de avaliar, de diferentes formas, as emissões de carbono relacionadas às atividades florestais. Como exemplo disso, Guitart e Rodriguez (2010) determinaram o ponto de equilíbrio financeiro entre a produção de madeira para indústria de celulose e as reduções certificadas de emissões, através de um valor mínimo por tonelada de carbono armazenada a pagar ao proprietário da floresta, a fim de justificar a adoção de um regime silvicultural que aumente o sequestro de carbono.

Quanto às atividades operacionais, o Departamento de Energia dos EUA publicou metodologias nacionais e estaduais de quantificação das emissões de GEE no transporte rodoviário a partir de dados de consumo de combustível (*United States Environmental Protection Agency*, 2010, 2011b; Center of Climate Strategies, 2008; IPCC, 2006). Segundo Garren et al. (2011), para estimar as emissões de CO₂, a metodologia converte o combustível total consumido (geralmente com base nas vendas de combustível total) dentro de um limite geográfico para as emissões de CO₂ pela multiplicação do consumo de energia por fatores de emissão que incorporam o carbono e o teor de calor de cada tipo de combustível. A metodologia assume que todo o combustível comprado é consumido dentro dos limites geográficos do inventário. Para os cálculos de emissão de CH₄ e N₂O, a milhagem veicular total percorrida (VMTs) é convertida em emissões de CO₂ equivalente pela multiplicação de fatores de emissão calculados para cada tipo de tecnologia do veículo e por seus respectivos potenciais de aquecimento global. A metodologia de consumo de combustível fornece agregadas estimativas de emissão de GEE a nível nacional e estadual. No entanto, as limitações desta metodologia existem a nível local, incluindo a disponibilidade de dados (por exemplo, o combustível consumido em um município não está facilmente disponível) e o problema de viagens nas fronteiras entre as cidades (ou seja, o combustível comprado em uma cidade é consumido em uma cidade adjacente). Independentemente dessas limitações, poucas cidades do mundo têm as emissões quantificadas utilizando esta metodologia, incluindo Bangkok, Cidade do Cabo, Genebra (Kennedy et al. 2010).

Kennedy et al. (2010) aponta uma metodologia para quantificar as emissões pela estimativa do consumo de combustível em função do consumo de combustível escalar a partir de um inventário amplo de um pequeno espaço geográfico com base na porcentagem de registros de veículos automóveis dentro do espaço. Esta metodologia assume que o uso de combustível e comportamento são os mesmos para toda a região, como é para a localidade (por exemplo, a VMT média per capita para o estado da Flórida é a mesma todas as cidades do estado). Los Angeles e Toronto são exemplos de cidades que têm usado essa abordagem em seu inventário.

Carty e Ahern (2011) desenvolveram um índice de vulnerabilidade das emissões de carbono no transporte na região metropolitana de Dublin na Irlanda, uma vez que estas emissões representaram 36% das emissões totais do país em 2007. Com foco nas emissões de carbono em função das distâncias percorridas e modais compartilhados. O índice foi calculado dividindo a quantidade total de emissões de carbono do transporte por viagem trabalhando as viagens por divisão eleitoral da população trabalhadora residem na divisão.

De acordo com Kuo (2010), o consumo de combustível é um importante índice no Problema de Roteamento de Veículo (*Vehicle Routing Problem - VRP*). O *U.S. Department of Energy Report* (2008) observou que, além da velocidade de transporte, o peso carregado no veículo e a distância de transporte também influenciam no consumo de combustível. Pesquisas relacionadas a VRP que visam minimizar o consumo de combustível são raras (Apaydin & Gonullu, 2008; Fagerholt, 1999; Maraš, 2008; Nanthavanij, Boonprasurt, Jaruphongsa, & Ammarapala, 2008; Sambracos, Paravantis, Tarantilis, & Kiranoudis, 2004; Taveares et al., 2008). Kuo (2010) propôs um modelo de minimização do consumo de combustível para problema de roteamento de veículo em função (*Time-Dependent Vehicle Routing Problem - TDVRP*) do tempo usando o *Simulated Annealing (SA)*. Este trabalho buscou a quebra do paradigma do problema de roteamento de veículo, tendo como propósito encontrar o roteamento com a menor taxa de consumo de combustível.

Emissões de CO₂ das operações florestais são geralmente estimadas com base na quantidade de combustível consumido por cada operação e o fator de emissão específico para cada tipo de combustível (Athassiadis, 2000; Berg e Karjalainen, 2003). A quantidade de combustível consumida em cada operação pode ser obtida diretamente utilizando dados reais de operação de máquinas (Klvac et al., 2003; Berg e Lindholm, 2005) ou pode ser estimado indiretamente baseado no tempo de trabalho

efetivo necessário para executar a operação e o consumo de combustível correspondente por hora de trabalho da máquina (Karjalainen e Asikainen, 1996; Schwaiger e Zimmer, 2001, Dias et al., 2007b).

O que foi observado na literatura é que as emissões de carbono, principalmente para o transporte, têm sido medidas em função da distância percorrida. No entanto, quando se fala de sistemas operacionais mecanizados, não se tem apenas os veículos de transporte, mas também aqueles responsáveis por preparo de solo, colheita, abertura e manutenção de estradas, dentre outros. Estas máquinas não percorrem grandes distancias, mas permanecem em funcionamento por longos espaços de tempo. Por isso, neste estudo, a quantificação das emissões será determinada em função do deslocamento, tempo de operação e tipo de combustível.

2.2. SISTEMA PRODUTIVO E OPERACIONAL FLORESTAL

O setor florestal é item econômico importante para o Brasil, mantendo mais de 6 milhões de hectares de florestas plantadas e 3 milhões de florestas nativas com plano de manejo, além de participar com 5% do Produto Interno Bruto (PIB) e criar empregos diretos e indiretos. A grande demanda pelos produtos florestais nos mercados internos e externos levou as empresas a adotarem um planejamento mais criterioso nas diversas etapas do processo de produção, visando aumentar a capacidade produtiva. (Machado, 2008). Logo, utilizam máquinas florestais em larga escala e outros recursos que contribuem positivamente com a atividade florestal e mudanças na economia brasileira.

As florestas cobrem quase um terço da área terrestre do planeta, contendo até 80% do carbono terrestre total acima do solo e 40% do carbono abaixo do solo, tendo papel fundamental no ciclo de carbono global. Árvores da floresta seqüestram dióxido de carbono da atmosfera através do processo de fotossíntese, no qual as folhas verdes produzem carboidratos (Song e Woodcock, 2003). Alguns estudos concluíram que o cultivo de árvores para armazenar carbono poderia fornecer consideráveis reduções de emissões líquidas de baixo custo para muitos países (Solberg, 1997; Van Kooten et al., 1997; Cannell, 1999; Newell e Stavins, 2000; Petersen e Solberg, 2004; Baskent e Keles, 2009). Neste sentido, a contribuição mais importante para o equilíbrio global das emissões dos gases de efeito estufa pode ser avaliada ou quantificada com atividades de

manejo florestal que, geralmente, mantém o crescimento de biomassa de floresta e reflorestamento (Hoen e Solberg, 1994; Platinga e Birdsey, 1994; Van Kooten et al., 1995; Krcmar et al., 2001, 2005; Diaz-Balteiro e Romero, 2003; Backeus et al., 2005, 2006; Raymer et al., 2005; Keles e Baskent, 2007; McCarney et al., 2008; Baskent et al., 2008; Baskent e Keles, 2009; Yousefpour e Hanewinkel, 2009; Keles, 2010). Assim, quantificar e controlar a estrutura e a dinâmica da floresta é criticamente importante para a produção e a proteção dos valores do ecossistema florestal.

Segundo Baseto et al. (2006) o desenvolvimento industrial e outras atividades econômicas de produção intensificaram as emissões de alguns GEE, principalmente do CO₂ provocando a concentração e o acúmulo dos mesmos na atmosfera. Uma vez que as reduções não ocorrem na mesma proporção que as emissões, a consequência é a intensificação do GEE, provocando um crescimento na temperatura média da terra. Esse fenômeno é o responsável pela mudança climática global.

Determinados processos de produção no setor florestal são considerados mecanizados quando realizados com máquinas, com mecanismos que contem movimentos relativos ao acionamento direto e, ou, quando se utilizam equipamentos e ferramentas adaptados a uma máquina. A mecanização na atividade florestal pode ser dividida em preparo inicial do solo; preparo do solo; colheita e transporte (Machado, 2008).

Karjalainen & Asikainen (1996) estudaram as emissões causadas pela utilização de máquinas nas atividades florestais da Finlândia cujos resultados são apresentados na Tabela 2. Afirmam ainda que, os efeitos das emissões equivalem, em termos de CO₂, a 1,31Mt e 0,67Mt em 20 e 100 anos respectivamente. No entanto, essas emissões são pequenas se comparadas aos 30.300Mt de CO₂ fixados na madeira colhida.

Tabela 2 - Participação relativa das atividades florestais nas emissões de CO₂ na Finlândia

Atividade florestal	Participação relativa
Transporte rodoviário	57%
Transporte primário (extração)	18%
Colheita	13%
Implantação e manejo	8%
Transporte de máquinas (frete)	4%

Fonte: Karjalainen e Asikainen (1996).

As empresas florestais também contribuem para este processo de alteração climática, seja negativamente por suas emissões de carbono nas atividades de produção da matéria-prima (madeira) e processos industriais, mas também positivamente pelo sequestro do carbono pelas árvores. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no intuito de aperfeiçoar o manejo florestal de forma a otimizar o papel das florestas na absorção de carbono (Keles, 2010).

Os projetos de MDL Florestal servem para contabilização e geração das Reduções Certificadas de Emissão, os conhecidos “créditos de carbono”, e devem ser consideradas as emissões das atividades operacionais de produção florestal (exaustão, colheita, transporte). Assim, neste trabalho propõe-se a inclusão das atividades de manutenção das estradas florestais que são implantadas para uso exclusivo do projeto de reflorestamento.

As áreas de reflorestamento são implantadas em função do objetivo do plantio, espécie(s) plantada(s) e do manejo a ser adotado. Desta forma, a descrição a seguir das atividades operacionais florestais mostrará quais são estas atividades, sua função e como podem ser realizadas apontando a possibilidade de emissões de carbono durante sua realização.

2.2.1. ATIVIDADES DE EXAUSTÃO

As atividades de exaustão compreendem aquelas relativas à silvicultura, responsável pela implantação da floresta e ao manejo, responsável por seleção para corte. Segundo Paiva et al. (2001), a implantação de florestas envolve operações que vão desde o preparo do solo até o completo estabelecimento delas, que ocorre no segundo ou terceiro ano após o plantio. As operações intermediárias são o combate às formigas, a fertilização mineral, o plantio propriamente dito e as manutenções ou limpezas do povoamento. Após esse período, a floresta, já estabelecida, está apta a ser manejada. As atividades de exaustão correspondem à implantação e manutenção das florestas.

2.2.1.1. PREPARO DO SOLO E DO PLANTIO

Primeiramente é importante definir a espécie que será plantada e a área onde será implantada a floresta. A definição da espécie a ser plantada é a primeira etapa de

um projeto de reflorestamento, levando-se em consideração o objetivo da produção (uso da madeira) e as condições edafoclimáticas (solo e clima) da região. Cada espécie se desenvolve em um ambiente adequado e por isso é indicado, sempre que possível, realizar testes para averiguar a adaptação do material ao ambiente, tanto para sementes quanto para clones. Entretanto, se não for possível a realização de testes, e tampouco houver dados experimentais da região, sugere-se que a escolha do material genético seja feita a partir de procedências cujas condições de origem sejam semelhantes ao local do plantio, sobretudo latitude, altitude, temperatura média anual, precipitação média anual, déficit hídrico e tipos de solos (Angeli, 2005).

O preparo do solo para a implantação florestal envolve o levantamento topográfico do terreno, a verificação das condições do solo e da vegetação existente, o desmatamento, a limpeza da área, o revolvimento do solo e, por fim, o combate às formigas antes, durante e após o plantio.

A) LIMPEZA

As operações de limpeza da área variam em função do tipo de vegetação e de topografia, podendo ser manuais, mecanizadas ou químicas. Normalmente, as limpezas manuais são utilizadas em regiões de declive acentuado, em pequenas áreas e, ou, em locais que não permitem a mecanização. Consistem na eliminação da vegetação rente ao solo, usando machado, foice ou motosserra (Paiva et al., 2001).

Os mesmos autores complementam ainda que, as limpezas mecanizadas podem ser realizadas com correntão ou lâmina frontal, acoplados em tratores de esteiras. O uso do correntão é justificável para grandes áreas e as lâminas frontais onde a vegetação se apresenta com maior porte e com maior número de árvores por hectare. Em áreas onde há tocos, torna-se necessário o seu arranquio, podendo ser usadas lâminas frontais ou ancinhos enleiradores. Em áreas onde ocorrem gramíneas ou vegetação rasteira, pode-se fazer o uso de produtos químicos (herbicidas) para a limpeza da área. Esta aplicação pode ser feita por trator agrícola, com equipamentos de aplicação em barras, por pulverizadores costais manuais ou pressurizados, e ainda, em áreas maiores por avião agrícola.

O rebaixamento de tocos é uma operação realizada em áreas onde o plantio de eucalipto será reformado, visando dar condição de tráfego às máquinas agrícolas. Podem-se utilizar lâminas KG, destocadores rotativos e motosserras. Os tratores agrícolas de esteiras com lâmina KG rebaixam o toco sem sua remoção. Os

destocadores rotativos são implementos acoplados em tratores que possuem um rotor com navalhas/martelos que são abaixados sobre os tocos, desbastando e reduzindo a cavacos. E a motosserra, que é um trabalho semi-mecanizado que apenas rebaixa os tocos (Burla, 2001).

B) APLICAÇÃO DE HERBICIDA E CALCÁRIO

Segundo Burla (2001), a aplicação de herbicidas tem a finalidade de manter a cultura do eucalipto livre de matocompetição e o calcário é usado para correção da acidez do solo. A topografia e tamanho da área é que determinam o método de aplicação, sendo, nas grandes áreas, mecanizado. No caso dos herbicidas, pode ser feito manual com pulverizador costal ou mecanizado com tanque de pulverização acoplado em trator. E, para o calcário, utilizam-se tratores agrícolas com distribuídos de discos rotativos.

C) DISTRIBUIÇÃO DE FORMIGIDAS

Segundo Kronka et al. (2005), o ataque de formigas pode limitar drasticamente a produção florestal, principalmente se ocorrer durante a implantação ou nos primeiros anos da floresta. Para o autor, o combate às formigas é uma operação obrigatória mesmo em locais onde esta praga parece não ser muito intensa.

Paiva et al. (2001) aponta que existem diferentes tipos de produtos para combate às formigas cortadeiras, sejam na forma de pós secos, iscas granuladas e líquidas termonebulizáveis. Os diferentes produtos exigem diferentes formas de aplicação, sejam por aplicadores manuais ou mecanizados.

D) SUBSOLAGEM

Burla (2001) explica que subsolagem consiste na abertura de sulcos para plantio, usando-se tratores agrícolas ou de esteiras tracionando subsoladores. É o método mais adequado a ser empregado quando se necessita romper camadas compactadas do solo situadas a mais de 30 cm de profundidade. Quando se atua entre 15 a 30 cm, o processo é denominado de escarificação.

E) SULCAMENTO E, OU, COVEAMENTO

Em áreas onde é possível a mecanização, pode-se fazer o sulcamento. Os sulcos são feitos por sulcadores, tracionados por trator de pneu, e possuem uma profundidade de, aproximadamente, 20 cm.

Na marcação de covas pode-se utilizar o “pé-de-burro” tracionado em trator de pneu, ou o gabarito que é de uso manual, mas que depende da marcação prévia das linhas. É possível ainda fazer as covas pelos métodos manuais utilizando chuchos,

sachos, enxadas e enxadões (Paiva et al., 2001), e pelos métodos mecânicos utilizando trator com furador de solo duplo tracionado (Burla 2001).

2.2.1.2. PLANTIO

Preparado o solo, adubado, sulcado e, ou, coveado, inicia-se o plantio propriamente dito. Este pode ser manual ou semi-mecanizado, considerando o tipo de embalagem da muda, tubete ou saco plástico. De acordo com (Paiva et al., 2001), assim como o coveamento, o plantio em áreas acidentadas é realizado manualmente. A distribuição das mudas é feita manualmente por um operário que as leva em caixa e as coloca nas covas, enquanto outros operários vêm a seguir, com sachos ou outra ferramenta, executando o plantio.

Os autores ainda explicam que, o plantio semi-mecanizado é utilizado em terrenos de topografia acessível ao trabalho com máquinas. As mudas, produzidas em sacos plásticos, são transportadas em por carreta comum tracionada por um trator de pneu seguindo as linhas de plantio, onde operários acompanham fazendo a distribuição das mudas nas covas e outros fazem o plantio e adubação. Se as mudas estiverem em tubetes, os operários já distribuem e plantam nas linhas, utilizando o transporte das mudas por caminhão somente até aceiros e estradas.

2.2.1.3. IRRIGAÇÃO

Quando o plantio for realizado em pequenas áreas, deve procurar efetuá-lo durante o período chuvoso. No entanto, mesmo concentrando os plantios durante o período chuvoso, muitas vezes há necessidade de se praticar a irrigação no campo, devido à ocorrência de veranicos. Na prática, o plantio irrigado é uma técnica de comprovada eficiência, propiciando altas taxas de sobrevivência das mudas (Paiva et al., 2001).

Burla (2001) explica que a irrigação consiste na colocação de água nas mudas recém-plantadas, utilizando-se mangueiras abastecidas por diferentes equipamentos. A água é captada em represas e córregos, transportada à frente de plantio e distribuída através de sistemas de mangueiras em equipamentos adaptados a cada situação

topográfica. Basicamente são adotados 3 tipos de equipamentos, a saber: trator florestal, caminhão pipa e trator agrícola com carreta.

2.2.1.4. ADUBAÇÃO

A adubação de base ou de plantio consiste na aplicação de fertilizante nas plantas após o plantio. Normalmente é feita manualmente com o uso de enxadinhas ou semi-mecanizada com o uso de plantadeira-adubadeira. A adubação de cobertura em área total que consiste na aplicação de adubos granulados, em área total, em terrenos já plantados, usando trator agrícola e distribuidor pendular. E a adubação de cobertura em linhas que é feita a aplicação de adubos em linhas espaçadas, em terrenos já plantados, com o uso de trator agrícola e adubadeiras (Burla, 2001).

A adubação auxilia no crescimento das árvores, acelerando a produção de biomassa. A exemplo disto, a adição de nitrogênio (N) para o ecossistema da floresta boreal reforça o crescimento das árvores e, assim, aumenta a produção de serapilheira sobre o solo (Aber et al., 1989, 1998; Hyvönen et al., 2007). Isto é especialmente o caso para as florestas boreais no norte da Europa, onde a oferta limitada de N limita fortemente o crescimento da floresta (por exemplo, Tamm, 1991; Vitousek e Howarth, 1991; Magill et al., 1997). No entanto, a resposta de crescimento à adubação nitrogenada é claramente inferior em povoamentos crescente em solos com uma elevada oferta de nitrogênio (N) do que em solos com uma baixa oferta (Ingerslev et al., 2001). Isto implica que o efeito da adubação nitrogenada sobre o sequestro de carbono em árvores depende tanto da dose de N adicionada e da fertilidade do local (Routa et al., 2011).

2.2.1.5. TRATOS CULTURAIS

Para a maioria dos plantios comerciais com espécies florestais, a competição com as plantas indesejáveis (mato) é fator limitante ao crescimento e à sobrevivência, principalmente na fase de estabelecimento. Durante a fase de formação do povoamento florestal, são feitas tantas capinas e roçadas quantas necessárias, sendo que a intensidade destes tratos culturais varia em função da planta indesejável, da sua agressividade e do seu nível de infestação, bem como a espécie de eucalipto implantada cujo desempenho

inicial depende do espaçamento, da fertilização e das técnicas de implantação (Paiva et al., 2001). Pode-se optar por três diferentes métodos para realizar os tratos culturais, podendo aplicá-los isoladamente ou em combinação. São eles: manual, mecanizado e químico.

Em locais de topografia acidentada, onde o acesso de máquinas é difícil, utiliza-se o sistema manual para a realização dos tratos culturais. Normalmente são feitas roçadas nas entrelinhas e capina nas linhas, ou apenas coroando as mudas. A roçada na entrelinha, além de ser uma operação manual de maior rendimento, auxilia na conservação do solo. Onde é possível fazer o trato cultural mecanizado, ainda assim faz-se uma capina manual para limpar a linha de plantio (Paiva et al., 2001).

Ainda os mesmo autores afirmam que o trato cultural mecanizado é realizado em regiões de topografia plana ou suave ondulada, onde a utilização de máquinas não põe em risco a estabilidade do solo. Esse tipo de trato cultural pode ser realizado por três tipos de equipamentos: enxada rotativa, grade leve e a roçadeira tracionada em trator agrícola.

Tem-se ainda o uso de herbicidas na manutenção florestal, que evita o uso excessivo de máquinas e o revolvimento do solo. A aplicação pode ser feita com pulverizador costal, manual ou pressurizado em áreas pequenas ou terrenos acidentados, ou com tratores agrícolas em áreas maiores e planas.

2.2.2. ATIVIDADES DE COLHEITA FLORESTAL

Para Machado (2008), o sistema de colheita florestal pode ser definido como um conjunto de atividades, integradas entre si, que permitem o fluxo constante de madeira, evitando-se os pontos de estrangulamento, levando os equipamentos à sua máxima utilização. Este sistema pode variar de acordo com os vários fatores, dentre eles topografia do terreno, rendimento volumétrico do povoamento, tipo de floresta, uso final da madeira, máquinas, equipamentos e recursos disponíveis. Eles podem ser classificados quanto à forma da madeira na fase de extração, ao local onde é realizado o processamento final e ao grau de mecanização.

A colheita de madeiras, normalmente, é subdividida em três fases principais, sejam corte, extração e transporte de longa distância. Dentro de cada uma dessas fases há uma série de sub-operações, como a conversão das árvores derrubadas em toras, o

movimento da madeira e sua carga e descarga. Duas características da colheita são notáveis: em primeiro lugar, as várias sub-operações são interdependentes no sentido de que uma operação anterior influencia uma subsequente, da mesma forma, uma operação posterior pode exigir que alguns trabalhos anteriores sejam feitos de uma forma particular. Em segundo lugar, diversas opções de técnicas existem para cada elemento de trabalho em relação ao método de trabalho e a entrada de mão de obra e máquinas (Sundberg e Silversides, 1988).

2.2.2.1. CORTE

O corte é a primeira etapa da colheita florestal e tem grande influência na realização das operações subsequentes. Ele compreende as operações de derrubada, desgalhamento, traçamento e empilhamento, e é uma operação de grande importância por ser a etapa inicial do preparo da madeira (Sant'anna, 2008).

Segundo o autor, o corte pode ser feito por três métodos: manual, semi-mecanizado e mecanizado. No método manual, o corte é feito com traçador e, ou, machado, hoje não mais utilizado, pois perdeu o espaço para as motosserras. Estas mecanizaram em parte a atividade de corte, permanecendo o trabalho fisicamente pesado, por isto chamado de semi-mecanizado. Muito usado no Brasil, este corte utiliza motosserra com capacidade de derrubar, desgalhar e traçar, mas também pode ser auxiliado por ferramentas manuais.

Em sistemas mecanizados, o corte de florestas plantadas no Brasil é feito com diversas máquinas nacionais e importadas. Sant'anna (2008) apresenta os três grupos das principais linhas de máquinas: *Harvesters* (tratores florestais colhedores), *Feller-bunchers* (tratores florestais derrubadores-acumuladores), e traçadores mecânicos e *Delimbers* (Sant'anna, 2008).

Ainda o autor afirma que, pode-se tratar a atividades de corte por suas operações parciais: derrubada, desgalhamento, traçamento e empilhamento. Todas elas podem ser realizadas pelos métodos manual, semi-mecanizado e mecanizado. Quando semi-mecanizada, as atividades são executadas pelo uso de motosserra, quando mecanizada existem diferentes equipamentos a detalhar.

Segundo Sant'anna (2008), na derrubada mecanizada tem: *Feller-Buncher* e *Harvester*. O *Feller-Buncher* tem características diferentes, uma vez que a máquina

pode acumular árvores. Assim, mesmo após o corte da base do tronco, a árvore pode permanecer de pé, no cabeçote da máquina, aguardando o corte de outras árvores para posterior colocação no chão. A derrubada com *Harvester* é feita individualmente, precedendo as operações de desgalhamento e traçamento da árvore.

O autor complementa que, o traçamento, ou seja, corte do tronco em toras, mecanizado é feito com o *Harvester* (equipamento de derrubada) ou por máquina traçadora. Já o empilhamento, que é as diferentes formas de arrumação da madeira cortada no campo para facilitar a extração, pode ser manual ou mecanizada. Quando mecanizado, é feito por *Feller-Bunchers* ou *Harvesters*.

O descascamento tem por objetivo separar a casca do tronco, em função das exigências do produto final, como por exemplo, serraria e celulose, que é o foco deste trabalho. Esta atividade pode ser feita no campo ou na indústria. Quando no campo, pode ser manual ou mecanizada. Se mecanizada, pode ser feito com descascador móvel ou com uma adaptação no *Harvester* (Sant'anna, 2008).

2.2.2.2. EXTRAÇÃO

Seixas (2008) conceitua a operação de extração como a movimentação da madeira desde o local de corte até a estrada, o carreador ou o pátio intermediário. Pode também ser denominado por baldeio, arraste, encoste ou transporte primário, variando em função do modo como é realizada ou do tipo de equipamento utilizado.

Assim como as demais atividades florestais, é possível realizar a extração manualmente, quando se trata de toras pequenas, ausência de espaço para entrada de máquinas e pelo corte raso em locais acidentados. Pode ser feita a extração com animais, sejam, equinos, muars e asininos, em razão do baixo custo e acesso a locais acidentados. Tanto a extração manual ou por animais é pouquíssima utilizada (Seixas, 2008).

Ainda o autor aponta que a extração mecanizada por ser feita por *Skidder*, *Forwarder*, Trator Autocarregável, Trator agrícola com guincho arrastador, Cabos aéreos, *Harwarder*, entre outros menos usuais. Os *Skidders* podem ser equipados com esteiras rígidas, flexíveis ou com pneus. Sua capacidade de carga depende de série de fatores, como resistência do rolamento, coeficiente de tração, entre outros. Seu uso, normalmente é combinado com o *Feller-Buncher* para o corte. Existem três diferentes tipos de *Skidders*: com cabo (*Chocker Skidder*) com sistema de guincho na parte traseira

e tração nas quatro rodas; com garra (*Grapple Skidder*) hidráulica de abertura inferior; e com pinças invertidas (*Clambunk Skidder*) com garra hidráulica de abertura superior para acumular e prender as toras colocadas por um braço hidráulico com grua, denominado autocarregável (Machado 1984 *apud* Seixas, 2008).

Os *Forwarders*, também conhecidos como tratores florestais autocarregáveis, possuem uma caixa de carga e um carregador hidráulico (grua). Em virtude do custo elevado de aquisição dos *Forwarders*, foram feitas adaptações de máquinas agrícolas, procurando atender à extração de madeira. O trator agrícola com carreta e grua acopladas, denominado Trator Autocarregável, é um conjunto situado em um nível intermediário na mecanização florestal, por maior restrição a terrenos acidentados, se comparado ao *Forwarder* (Seixas, 2008).

O autor complementa que a apresentação dos equipamentos com o guincho de arraste acoplado ao trator agrícola indicado para pequenas distâncias e dependente de uma equipe de trabalho para preparo da pilha de arraste. O *Harwader* (*harvester-forwarder*) é uma combinação de uma colhedora com um trator autocarregável. Pode competir com o sistema *harvester + forwarder* se o tempo despendido com transporte não for uma fração muito grande do tempo total, uma vez que seria um *Forwarder* mais caro.

2.2.2.3. CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO

As atividades de carregamento e descarregamento de madeira podem ser divididas em: manual, semi-mecanizado e mecanizado. O processo manual é utilizado para toras curtas e diâmetro reduzido. São muito utilizadas em pequenas áreas de florestas plantadas, no fomento florestal e, ou, locais em que o uso da madeira é destinado à energia. Já o processo semi-mecanizado é muito diversificado, usando cabos de aço acionados por animais, pelos trabalhadores em sistemas de catracas, por pequenos tratores ou pelo próprio veículo de transporte (Minette et al., 2008).

Os autores ainda apresentam o processo mecanizado, que é o mais utilizado devido a sua grande eficiência operacional. Normalmente são utilizados os carregadores mecânicos com pneus, carregadores mecânicos com esteiras, caminhões autocarregáveis, carregadores frontais para o carregamento, e carreador fixo, descarregador móvel, pontes rolantes e guindastes para o descarregamento.

2.2.3. ATIVIDADES DE TRANSPORTE FLORESTAL

O transporte rodoviário é o meio predominante no país, devido à extensa malha rodoviária. Atualmente, 65% do transporte de cargas é realizado por este modal, enquanto que em países em desenvolvimento é de 40%, e nos países desenvolvidos é de 30%. O setor florestal depende mais ainda desse meio de transporte, aproveitando-se do sistema de estradas pavimentadas que interligam todas as regiões do país. Estima-se que mais de 90% do transporte florestal no Brasil seja pelo modal rodoviário (Machado et al., 2009).

Todavia, as características de especificidade de carga e exclusividade de frete possibilitam ao veículo operar carregado somente em um único sentido, fazendo com que os custos se tornem maiores por unidade de volume. As principais vantagens que o transporte rodoviário florestal oferece sobre os demais modais são: possibilidade do deslocamento de produtos “pátio a pátio”, menor investimento inicial, flexibilidade e possibilidade de escolha de rotas e diferentes capacidades de carga oferecidas (Machado et al., 2009).

Ainda os autores apontam que os veículos utilizados no transporte variam amplamente de acordo com o tamanho e a capacidade de carga, sendo sua seleção baseada em variáveis como: condições locais, distância de transporte e volume de madeira a ser transportada. Os veículos são classificados quanto ao tipo (Figura 2) e quanto à classe:

- Leve: veículo simples com capacidade de carga de até 10 toneladas;
- Médio: veículo simples com capacidade de carga entre 10 e 20 toneladas;
- Semipesado: veículo simples, articulado ou conjugado, com capacidade de carga entre 20 e 30 toneladas;
- Pesado: veículo articulado ou conjugado, com capacidade de carga entre 30 e 40 toneladas;
- Extrapesado: veículo tipo rodotrem, treminhão, bitrem e tritem com capacidade de carga acima de 40 toneladas.



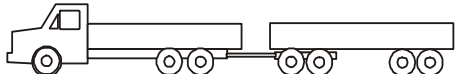
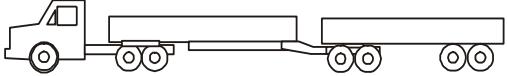
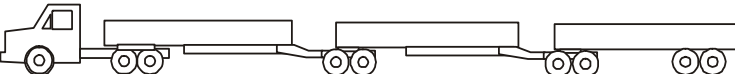
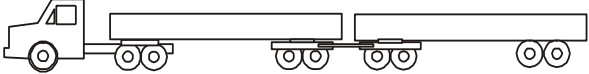
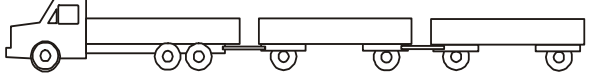
<p>Caminhão: constitui-se de uma única unidade tratora e transportadora, com tração do tipo 4x2, 4x4, 6x2 ou 6x4.</p> 
<p>Articulado (<i>carreta</i>): composto de uma unidade tratora (cavalo-mecânico), com tração 4x2 ou 6x4 e um semirreboque.</p> 
<p>Conjugado (<i>biminhão</i>): constitui-se de um caminhão e um reboque (caminhão+reboque).</p> 
<p>Bitrem: combinação de um cavalo-mecânico e dois semirreboques (cavalo-mecânico + semirreboque + semirreboque).</p> 
<p>Tritrem: combinação de um cavalo-mecânico e três semirreboques (cavalo-mecânico + semirreboque + semirreboque + semirreboque).</p> 
<p>Rodotrem: combinação de um veículo articulado e um reboque (cavalo-mecânico + semirreboque + reboque).</p> 
<p>Treminhão: combinação de um caminhão com dois reboques (caminhão + reboque + reboque).</p> 

Figura 2 – Tipos de Veículos utilizados no Transporte Florestal
 Fonte: Machado et al. (2009)

2.2.4. ESTRADAS FLORESTAIS

As estradas florestais exercem uma importância no meio ao qual se inserem ao proporcionarem significativos benefícios econômicos e sociais para a empresa florestal, bem como para as comunidades que dela fazem parte. Estudos realizados na América

Latina, pelo *The World Bank apud* Machado et al. (2011), mostram que a má gestão da manutenção das estradas rurais ocasiona um aumento desnecessário nos custos de transporte de carga na ordem de 0,5 a 1% do PIB. A aparente economia na redução dos investimentos em manutenção das estradas rurais é primeiramente refletida aos usuários. A cada dólar de economia acarreta cerca de dois a três dólares de aumento nos custos de transporte. Esse aumento os custos se deve, em partes, a um aumento do consumo de combustíveis ocasionando maior emissão de GEE por queima de combustíveis fósseis.

As principais fases do desenvolvimento de uma estrada são: construção, operação, manutenção e abandono. A construção da estrada resulta em mudanças na paisagem que elas atravessam e frequentemente é o maior trauma ambiental para os ecossistemas adjacentes devido ao movimento de terra e outras atividades que podem causar distúrbios em toda microbacia (FAO, 1989; Lugo e Gucinski, 2000).

A estrutura e funcionamento de uma estrada variam de acordo com seu desenho, uso, tipo de superfície e localização, conforme Lugo e Gucinski (2000). Ainda não existe um consenso com relação à classificação dos diferentes tipos de estradas florestais, porém Gonçalves (2002) e Machado et al. (2011) as classifica em três categorias:

- a) Estradas primárias (ou principais): sua função principal é dar acesso às áreas de produção florestal e às estradas externas à propriedade. Geralmente é mais larga, com tráfego mais intenso e pesado;
- b) Estradas secundárias (carreadores ou estradas vicinais): são permanentes e normalmente dividem a área florestal em talhões, separam propriedades e conectam os locais de produção florestal e estrada principal.
- c) Ramais ou Estradas de acesso: são estradas temporárias, com a função de reduzir a distância entre o local da colheita e a estrada secundária.

Machado et al. (2011) ainda afirma que, a localização e a construção das estradas florestais são consideradas os primeiros passos das operações de colheita e transporte florestal. A característica mais marcante das estradas florestais é o baixo volume de tráfego, mas pesado em único sentido. A construção de estradas tem as seguintes finalidades:

- reduzir as distâncias de extração florestal;
- facilitar a orientação e a realização do planejamento e do manejo florestal;
- facilitar os combates a incêndios florestais e os controles profiláticos;

- facilitar o transporte de máquinas, materiais e pessoas;
- permitir o escoamento da produção e produtos florestais.

Os custos devem ser amortizados com a madeira extraída da área florestal servidas por elas, todavia como são quase imensuráveis os outros usos das estradas florestais, torna-se importante verificar a possibilidade de colocar as estradas com investimento na empresa.

Na abertura e conservação de estradas florestais utiliza-se sempre o método mecanizado. As máquinas utilizadas para abertura e conservação de estradas florestais variam em função da topografia. Para as áreas de relevo montanhoso têm-se as escavadeiras hidráulicas; retroescavadeiras; motoniveladoras; rolos compactadores; tratores agrícola com grade; caminhões basculante; e caminhões-pipa. Para áreas de relevo ondulado, suave ondulado e plano têm-se tratores de esteira com lâmina *buldozer*; retroescavadeiras; motoniveladoras; rolos compactadores; tratores agrícola com grade; caminhões basculante; e caminhões-pipa (Machado et al., 2011).

2.3. CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE CARBONO

As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂) tem aumentado significativamente nos últimos séculos, por causa do aumento de emissões de combustíveis fósseis. Estas emissões de CO₂, em conjunto com outros gases-estufa, têm contribuído para o aumento da temperatura global no século 20 e também pode ser associado com mudanças nas condições climáticas extremas (Wu e Liu, 2012). As emissões oriundas da queima dos combustíveis fósseis podem originar-se dos veículos de transporte como carros, caminhões, ônibus, como também de máquinas, como tratores e maquinário agrícola. Emissões dos veículos de transporte são conhecidas por serem as mais rápidas em ascensão e uma importante fonte de emissões antrópicas de CO₂ (Papagiannaki e Diakoulaki, 2009). As emissões de CO₂ por deslocamentos de automóveis aumentam a cada ano (Kwon, 2005; Paravantis e Georgakellos, 2007). Assim, as questões ambientais exigem veículos com alta eficiência de combustíveis e baixas emissões de CO₂. Diversos estudos sobre o consumo de combustíveis relacionados às emissões de carbono têm sido feitos sob diferentes enfoques e perspectivas. Wu e Liu (2012) desenvolveram um sistema de previsão do

consumo de combustível de automóveis por redes neurais; Garren et al. (2011) e Malaczynski e Duane (2009) analisaram as variáveis que influenciam nas emissões de GEE pelos veículos rodoviários; Kayo et al. (2011) analisou as reduções de emissões de dióxido de carbono pela utilização de madeira para energia considerando tanto as reduções pela substituição dos combustíveis fósseis (produção de bioetanol) e a mudança no armazenamento de carbono nas florestas; Hawkins e Dente (2010) avaliaram as emissões de carbono pelo transporte de mercadorias pelas cadeias de abastecimento para atendimento da demanda das famílias francesas, comparando as emissões pelo transporte rodoviário e demais modais como alternativas de redução.

Para Lanças (2002), o preparo do solo é uma das operações de maior consumo de energia na silvicultura. Dentre as formas de se minimizar a energia estão: a utilização de técnicas de sistemas de cultivo mínimo ou reduzido, de operações conjugadas e melhoria na eficiência das operações com menores perdas de tempo em atividades. Além da avaliação do desempenho das máquinas, buscando-se minimizar os custos energéticos, é importante também a análise dos impactos causados pelo tamanho das máquinas.

Segundo Mattsson (1979), o consumo total de energia para se produzir florestas nas condições suecas aumentou em média de 70MJ.m^{-3} em 1956 para 180MJ.m^{-3} em 1972 devido à mecanização das operações. O autor comparou dois sistemas variando-se o grau de mecanização. Como resultado, contabilizou o dispêndio de $123,8\text{ MJ.m}^{-3}$ no mecanizado e $58,3\text{MJ.m}^{-3}$ no semi – mecanizado. O consumo de combustível representou entre 5 a 10% dos custos totais de colheita de madeira.

Serra et al. (1979) estudaram várias culturas no Brasil e, baseando-se em dados médios fornecidos pelas principais empresas do setor de produção de celulose e papel no Estado de São Paulo, verificaram que a energia investida na formação do povoamento de eucalipto com ciclos de 21 anos e colheitas a cada 7 anos, foi de $2,22\text{GJ.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Da energia investida na cultura, a implantação consumiu 60% e as conduções de rebrota 20% cada. A produtividade de madeira (massa seca) considerada foi de $11,8\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, o que representou um dispêndio de energia médio de $0,19\text{GJ.t}^{-1}$ para a produção de madeira.

Athanassiadis et al. (2002) calcularam para as condições suecas, a partir do consumo de combustível, que as entradas energéticas pela colheita de madeira foram de 82 MJ.m^{-3} . Desse total, 11% eram devidos à energia gasta no estágio de extração e

refino do combustível. Os autores consideraram que 40% do investimento energético na atividade de colheita eram devidos ao uso de combustível fóssil.

Berg & Lindholm (2004) inventariaram o uso da energia em operações florestais na Suécia entre 1996 e 1997, incluindo-se a produção de mudas, silvicultura, colheita e transporte principal até a indústria. O uso da energia foi de 150 a 200MJ.m⁻³ de madeira dependendo da região do país. Esse inventário demonstrou que o dispêndio energético do transporte principal foi maior que o verificado pelos autores na bibliografia em trabalhos anteriores. No contraste a isso, o dispêndio na colheita foi menor se comparada à década passada, possivelmente devido à melhor tecnologia e manejo.

Hetz (1992) buscou uma correlação entre tamanho das máquinas e o custo energético das operações mecanizadas na agricultura. Foram calculados as intensidades energéticas e os custos horários. Os resultados mostraram que os maiores custos de energia corresponderam à operação de preparo do solo e da colheita. Os menores custos corresponderam à operação de aplicação de fertilizantes. Os custos horários de energia foram dependentes do tamanho da máquina, mas os custos por área ou da massa processada foram independentes.

Bridges & Smith (1979) também verificaram que o tamanho e a potência da máquina não influenciaram na demanda de energia na operação, não havendo relação entre tamanho de máquina com consumo de energia, a não ser por aquela agregada na fabricação e manutenção, mas de forma não significativa. Os autores compararam os dispêndios energéticos de duas colhedoras de cereais nas mesmas condições, sendo uma com potência de 52,2kW e plataforma de 3,96m de largura e outra de 74,6 kW e 4,38m, ambas operando a 4,38km.h⁻¹ a uma eficiência de campo de 70%. As entradas de energia foram classificadas como: a) da fabricação, transporte e manutenções; b) combustível e c) trabalho humano. Os resultados foram 637,7 MJ.ha⁻¹ utilizando-se a colhedora de 52,2kW de potência e 635,2 MJ.ha⁻¹ utilizando-se a colhedora de 74,6kW.

Para as atividades do setor florestal brasileiro foram verificados trabalhos de menor magnitude, alguns dos quais não tratam das operações de colheita e apenas contabilizam a silvicultura em três ciclos de rotação e operações semi mecanizadas, cuja produção de madeira foi de 11,8t.ha⁻¹ (Serra et al., 1978 e Serra et al., 1979).

Damen (2001) estimou para as condições brasileiras, o dispêndio energético com base no diesel gasto por hectare nas atividades de silvicultura e por tonelada de madeira na atividade de colheita, simulando os dados, com valores de 1996, voltados à

produção de eucalipto para o setor de celulose e papel. As entradas de energia para o módulo de colheita mecanizada, pelas máquinas Feller-Buncher, Skidder e Traçador, foram aproximadamente 123MJ.t^{-1} . O autor considerou o custo de colheita em US\$8.11 por tonelada seca de madeira, calculando-se custo energético de US\$1.08.GJ⁻¹.

Suiter Filho et al. (1982) computaram os dados de consumo de energia na implantação de floresta de eucalipto para produção de carvão vegetal e concluíram que o balanço de energia era positivo e as operações de transplante e condução do plantio tiveram um consumo médio de 4.138MJ.ha^{-1} , cerca de 8% do total da atividade.

Quanto à energia gasta no transporte define o aproveitamento do combustível em veículos de transporte como sendo expresso pelo produto entre a carga útil transportada e a distância percorrida pelo consumo de combustível, cuja unidade mais usual é t.km.l^{-1} (Saab – Scania, 1998).

2.4. DINÂMICA DE SISTEMAS – DS

2.4.1. HISTÓRIA E APLICAÇÕES

DS foi criada na metade da década de 50 pelo professor Jay Forrester com objetivo inicial de determinar como seu conhecimento em ciência e engenharia poderia ser utilizado nos aspectos fundamentais que determinam o sucesso ou falha das corporações (Radzicki e Taylor, 2008). Em 1958, foi criado o primeiro *software* de simulação de DS, que chamou SIMPLE (*Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equation*). Em 1959, desenvolveu a primeira versão do DYNAMO (*DYNAMIC MODELS*), uma evolução do SIMPLE (Radzicki, 1997).

A segunda grande aplicação da DS não associada à área de negócios surgiu logo em seguida, no ano de 1970. Forrester apresentou seu primeiro esboço do modelo da dinâmica dos sistemas sociais e econômicos globais, que chamou de *World1*. Quando retornou aos EUA, refinou o modelo, e esta nova versão, chamada de *World2*, foi publicada em 1971 no livro *World Dynamics* (Forrester, 1971).

O surgimento de outros *softwares* mais portáteis como *Stella*, *Vensim*, e outros difundiu a Dinâmica de Sistemas, possibilitando que modelos concebidos por esta metodologia pudessem ser mais simulados em locais menos providos de recursos computacionais (Zambom, 2000).

Baseados nos trabalhos de Forrester, pesquisadores do MIT, como Sterman, Senge, Morecroft e Van Der Heijden, vem desenvolvendo e aplicando a Dinâmica de Sistemas para estudar sistemas dinâmicos e complexos. A motivação principal da abordagem desses pesquisadores reside na possibilidade de desenvolver simulações, os chamados “micro-mundos” (simuladores, ou simuladores de vãos gerenciais), em laboratório, onde podem ser observadas as sequências das decisões. (Saito, Figueiredo e Batalha 1999).

Yin et al. (2010) sintetiza a criação, objetivo e funcionamento da DS como se segue. Jay Forrester combinou a teoria e métodos necessários para analisar o comportamento de vários sistemas e propôs o campo da Dinâmica de Sistema. A DS usa conceitos extraídos do campo de controle de feedback para organizar as informações disponíveis em modelos de simulação quantitativa. A simulação baseada em modelo revela as implicações comportamentais do sistema. A base do método é o reconhecimento de que a estrutura de um sistema muitas vezes é mais importante na determinação do seu comportamento do que os componentes individuais. Originalmente desenvolvido para melhorar a compreensão dos processos industriais, dinâmica de sistema também tem sido utilizada para a análise de outros tipos de sistemas.

Iniciando com *Urban Dynamics* (Forrester, 1969), e seguido por *World Dynamics* (Forrester, 1971) e *The Limits to Growth* (Meadows et al., 1972), há uma longa tradição de usar dinâmica de sistemas para estudar questões de gestão pública (Ghaffarzadegan et al., 2011). Modelos de dinâmica de sistemas agora cobrem uma ampla gama de áreas nos assuntos públicos, incluindo a saúde pública (Homer et al., 2000, 2004, 2007; Richardson, 1983, 2007; Cavana e Clifford, 2006; Thompson e Duintjer Tebbens, 2007, 2008), energia e meio ambiente (Fiddaman, 1997, 2002; Sterman, 2008; Ford, 1997, 2005), bem-estar social (Zagonel et al., 2004), o desenvolvimento sustentável (Saeed, 1998; Honggang et al., 1998; Mashayekhi, 1998), segurança (Weaver e Richardson, 2006; Ghaffarzadegan, 2008; Martinez-Moyano et al., 2008) e muitas outras áreas afins.

A abordagem de dinâmica de sistemas tem sido aplicada a um número de estudos relacionados ao meio ambiente como, análise de impacto ambiental (Vizayakumar e Mohapatra, 1991, 1993), gestão de resíduos sólidos (Mashayekhi, 1993; Karavezanois et al., 2002), a análise das emissões de gases do efeito estufa e o aquecimento global (Naill et al., 1992; Vrat et al., 1993), as investigações das emissões de metano a partir de cultivo de arroz no contexto indiano (Anand et al., 2005),

planejamento de recursos hídricos (Ford, 1996), planejamento e gestão ambiental (Guo et al., 2001; Guneralp e Barlas, 2003), sustentabilidade ambiental (Saysel et al., 2002), modelagem ecológica (Wu et al., 1993) e muitas mais situações. Embora um modelo de dinâmica de sistemas trata de um sistema no sentido integrado, o sistema é decomposto pela divisão do mesmo em uma série de subsistemas integrado. Os subsistemas individuais podem então ser analisados e integrados mantendo as interações comuns entre os subsistemas.

Ford (2007) apresentou ponderações acerca das preocupações climáticas que ocorreram no mesmo período do início dos estudos da DS, discute o ciclo do carbono pela DS, descreve a contribuição da DS para o debate sobre a melhor combinação de políticas para reduzir as emissões de GEE, entre outras discussões. Anand et al. (2006) aplicou a abordagem de dinâmica de sistemas na avaliação e mitigação das emissões de CO₂ da indústria de cimento na Índia. Seu modelo calculava as emissões de CO₂ em função de projeções da produção de cimento em função do crescimento populacional, o produto interno bruto (PIB), taxa de incremento e tecnologias utilizadas. Sgouridis et al. (2011) empregou a dinâmica de sistema no estudo transporte aéreo e emissões de carbono, onde mostrou que uma abordagem baseada em um conjunto de medidas mitigadoras e políticas abrangendo melhorias tecnológicas e operacionais, o uso de biocombustíveis, mudança de demanda e o preço do carbono é necessária para a transição da indústria de transporte aéreo próxima de um ponto de operação da sustentabilidade e mobilidade ambiental.

2.4.2. CONCEITOS BÁSICOS

2.4.2.1. SISTEMAS

A origem da palavra sistemas é “*systema*”, derivada de “*syn*”, que significa, “juntamente”, “conjuntamente”, “ao mesmo tempo”, e “*hystema*”, que significa “estabelecer”. Assim, “sistema” literalmente significa “estabelecer conjuntos” (Sanino, 2006).

Seguindo a mesma linha, Kim (1998) define sistema como qualquer grupo de partes que possuem interação, inter-relação, ou interdependência e de forma complexa e unificada, possuindo uma proposição específica.

Das classificações mais clássicas e melhor aplicadas, a dinâmica de sistemas pode se dividir um sistema em dois tipos básicos, (Forrester, 1976): os sistemas de ciclo aberto (enlaces abertos ou loop causal) e os sistemas de ciclo de realimentação ou fechado (enlaces fechados ou fluxo e estoques).

Segundo Forrester (1976), um sistema de ciclo aberto é caracterizado por saídas (*output*) que respondem a entradas (*inputs*), porém as saídas estão isoladas das entradas e não exercem influência sobre estas. Um sistema de ciclo aberto não reconhece e nem reage à sua própria performance, dessa forma a ação passada não controla a ação futura. Segundo Fernandes (2003), um sistema aberto se caracteriza por relações de causa e efeito lineares, pois apesar da causa redundar num efeito, este efeito não realimenta a causa geradora, ou seja, não existe realimentação (*feedback*). Nesse tipo de estrutura unidirecional de causa e efeito, o pressuposto é que a informação sobre o estado do sistema orienta uma decisão, acarretando uma ação, que leva a um resultado. Quando a informação do estado do sistema não se altera, permanecendo estática, toda a decisão e a ação presente não influenciam as decisões futuras e não alteram o sistema.

Um sistema de ciclo de realimentação ou fechado é influenciado pelo seu próprio comportamento passado, possuindo uma estrutura em circuito fechado, onde a saída influencia a entrada, ou seja, onde a causa e o efeito se confundem, pois qualquer influência de um componente do sistema é, ao mesmo tempo, causa e efeito. Em outras palavras, uma causalidade não tem um único sentido (Forrester, 1976). Realimentação é uma sequencia fechada de causa e efeito, isto é, um caminho fechado de ação e informação (Richardson e Plugh *apud* Kirkwood, 1998).

2.4.2.2. MODELO

Radzicki (1997) define um modelo como uma representação externa e explícita de parte da realidade percebida pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade. Segundo Mohapatra *et al.* (1994), os objetivos para a construção de um modelo do sistema real são:

- Entender como um sistema real trabalha;
- Ter capacidade de reconhecer os fatores que exercem grande influência no controle do comportamento do sistema;

- Experimentar e determinar as consequências da implantação de várias formas de controle e políticas;
- Alcançar uma função de controle viável;
- Ter capacidade de compartilhar com outros o processo de investigação e seus resultados.

2.4.3. DIAGRAMAS BÁSICOS

As técnicas de Dinâmica de Sistemas são divididas em modelagem *soft* e modelagem *hard*. São aplicadas, respectivamente, pelas linguagens gráficas na forma de diagramas, para extrair e modelar o comportamento de um sistema através: os diagramas causais e os diagramas de estoque e fluxo. Em síntese, diferenciam-se conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Diferenças entre as Modelagens *Soft* e *Hard*

Modelagem	<i>Soft</i>	<i>Hard</i>
Definição do Modelo	Método para gerar debates sobre a realidade	Representação da realidade
Problema Abordado	Múltiplas dimensões/ objetivos	Uma dimensão/ objetivo
Natureza	Qualitativa	Quantitativa
Objetivos	<i>Insights</i> e aprendizagem	Soluções e otimizações
Resultados	Aprendizado em grupo ou auto-desenvolvimento	Produtos ou recomendações
Ferramenta Básica	Diagrama Causal	Diagrama de Fluxo e Estoque

Fonte: Sanino, 2006.

2.4.3.1. DIAGRAMA CAUSAL

Os Diagramas Causais são utilizados para representar de forma qualitativa os conceitos importantes (variáveis ou parâmetros) de um sistema e como esses afetam uns aos outros ao longo do tempo. Foram criados como forma de serem mais acessíveis que os diagramas de estoque e fluxo por não apresentarem as equações que vão descrever em detalhes os sistemas. Eles atingem um público maior, pois dão suporte a uma forma mais livre de pensamento criativo e possuem um conjunto muito limitado de componentes (Sterman, 2000).

Segundo Fahey e Randall (1998), são compostos por palavras que expressam os conceitos do sistema, conectados por setas que representam as influências mútuas entre eles. Os laços de influência representam uma cadeia fechada de causa e efeito. Usados corretamente, esses diagramas podem ser utilizados de forma muito eficiente para explicar padrões de comportamentos dinâmicos e são ótimos para uma fase inicial de estudo de um sistema.

Segundo Madachy (2008), o uso de diagramas causais costuma ser muito debatido. Dependendo do estado e contexto do estudo, eles podem ser considerados muito úteis ou praticamente desnecessários. Sua utilidade depende dos objetivos, restrições e das pessoas envolvidas na fase da modelagem. A principal crítica ao uso de diagramas causais é que eles carecem de uma representação para diferenciar os conceitos que podem ser acumulados e transportados dentro do sistema (fluxos conservativos) dos que são obtidos indiretamente a partir de outros dados (fluxos não conservativos). A existência dessa simplificação pode levar a interpretações diferentes e errôneas do comportamento de um modelo, mesmo por especialistas.

Ao construir os Diagramas Causais, utilizam-se palavras para representar as variáveis do sistema a ser modelado. A exemplo, em um processo produtivo pode-se destacar conceitos como Produtividade, Tarefas concluídas, Qualidade e Retrabalho. Em seguida, as influências são traçadas como setas ligando os conceitos. E finalmente, símbolos de “+” e “-” adicionados ao lado das pontas de setas para indicar uma influência positiva ou negativa, respectivamente. A Figura 3 apresenta o uso desses elementos em um exemplo dos comportamentos de um processo de estocagem (Knop, 2009). As relações do diagrama causal da Figura 3 podem ser: à esquerda tem-se que a Produtividade “aumenta” a quantidade de Tarefas Concluídas e à direita, a Qualidade “diminui” a necessidade de Retrabalho.

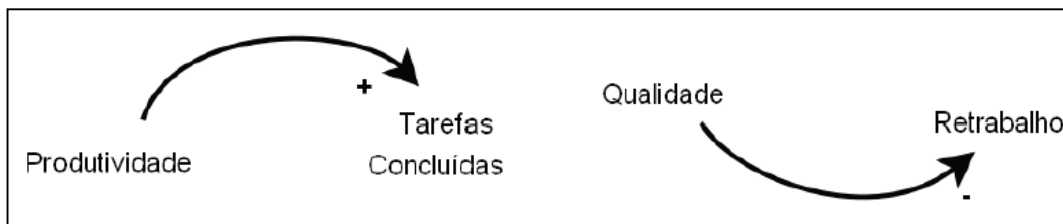


Figura 3 – Diagrama Causal
Fonte: Knop, 2009.

Os diagramas causais podem ainda se tornar mais complexos, quando surgem atrasos e laços abertos e fechados. Porém, segundo Madachy (2008), com o advento das ferramentas visuais para desenvolvimento e simulação de Dinâmica de Sistemas, os diagramas causais têm sido mais usados para explicar conceitos baseando-se em um modelo já desenvolvido em diagramas de estoque e fluxo. Isto é devido à crescente facilidade de uso que os ambientes de modelagem e simulação agregam e acabam por agilizar o processo de entendimento do sistema. Entretanto, os diagramas causais ainda superam, em matéria de agilidade, os diagramas de estoque e fluxo para expressar de forma qualitativa os efeitos dinâmicos encontrados.

2.4.3.2. DIAGRAMAS DE FLUXO E ESTOQUES

Para a Dinâmica de Sistemas todo comportamento dinâmico é um sistema baseado no princípio da acumulação (Radzick, 1997). Segundo esse princípio, o comportamento dinâmico no mundo ocorre quando os fluxos se acumulam em estoques, ou seja, o comportamento dinâmico surge quando algum elemento flui por um meio, se acumulando (ou se esgotando) de alguma forma. Na modelagem com Diagramas de Estoques e Fluxos, variáveis físicas podem fluir pelos fluxos e se acumular nos estoques.

Os diagramas de estoque e fluxo apresentam, detalhadamente, quais são as variáveis, parâmetros e estrutura de um modelo de sistema. Sendo um modelo quantitativo, é necessário registrar as relações numéricas e algébricas por meio de equações através de uma linguagem matemática formal (Pedro, 2006).

Uma simulação de um modelo permite acompanhar os valores de seus elementos quantificáveis durante certo período do tempo. O comportamento do sistema surge devido às características e inter-relações de seus elementos componentes.

A. ELEMENTOS BÁSICOS

Os diagramas de estoque e fluxo são compostos por cinco elementos básicos: estoques finitos, estoques infinitos, taxas, auxiliares e informações. Estes elementos podem ter representações gráficas diferentes ou apresentar variações para alguma especialização dependendo da ferramenta utilizada. Os cinco elementos básicos e comuns em todas as ferramentas estão representados na Figura 4.

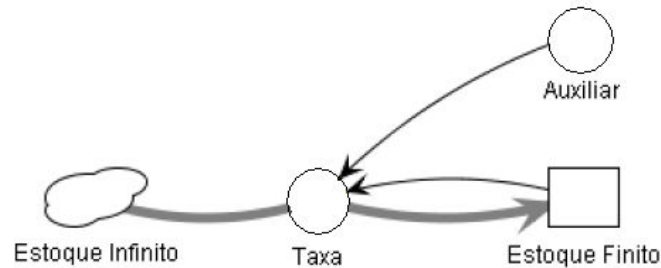


Figura 4 – Elementos básicos do diagrama de estoque e fluxo
 Fonte: Knop (2009)

Estoques finitos ou níveis são entendidos como acumulações de quantidades dentro do sistema, isto é, são os pontos de onde vêm ou para onde vão as quantidades quando o modelo é simulado e fornecem a capacidade de “memória” ao sistema. Os estoques finitos são representados graficamente por um retângulo e um nome descritivo. Eles também são responsáveis por trazer as condições iniciais do sistema antes da simulação, portanto, esta informação deve vir anexada ao diagrama junto à lista de equações.

Os estoques finitos têm interpretação intuitiva, quase imediata, quando representam quantidades como pessoas, número de defeitos, tarefas, dias para a entrega de um projeto, etc. Porém, também podem representar acumulações de medidas não físicas como estresse, conhecimento, experiência, felicidade, etc. Um segundo tipo de estoque são os estoques infinitos, também conhecidos como fontes ou sorvedouros. Representam estoques fora dos limites de interesse do modelo. São considerados, ao mesmo tempo, sempre “cheios”, capazes de prover elementos e sempre “vazios”, capazes de receber fluxos de entidades. Por estarem fora do escopo do modelo, não possuem valor quantificável ou qualquer equação associada. São representados nos diagramas como um desenho de uma nuvem e um nome descrito e como exemplo pode-se citar possíveis usuários de um software, o conjunto de defeitos possíveis que um artefato pode ter, desenvolvedores que saíram do projeto, etc.

As taxas (ou fluxos) são os elementos que movem as quantidades de um estoque para outro. O valor de um estoque só pode ser alterado quando as entidades quantificáveis se movem para “dentro” ou para “fora” dele, através de uma taxa. Portanto, estes elementos representam a taxa de variação de um estoque em relação a um estado de tempo (Barros, 2001). Como são elas que mudam o estado do sistema durante a simulação, são consideradas as responsáveis pelo comportamento dinâmico do

sistema. Podem ser interpretadas, intuitivamente, como válvulas que permitem o fluxo de entidades de um estoque para outro, justificando, inclusive, a sua representação gráfica, lembrando uma válvula, na maioria das ferramentas (como na Figura 4).

Uma taxa possui uma expressão associada que irá calcular o seu valor. Essa expressão pode depender dos valores dos estoques, auxiliares ou mesmo outras taxas. Exemplos diretos de taxas relacionadas aos estoques citados acima são: taxa de contratação de pessoal; taxas de desligamento ou transferência de pessoal entre projetos; taxa de produção de defeitos; taxa com que os requisitos funcionais são alterados ou implementados. Há também analogias para as taxas para elementos não físicos como cansaço, descanso, treinamento, etc. O importante é ter em mente que as taxas têm as unidades compatíveis com os estoques que elas alteram por unidade de tempo.

Auxiliares são variáveis ou constantes utilizadas como parâmetros ou para cálculos indiretos (como avaliadores) a partir dos outros elementos do sistema. Um modelo pode ser descrito apenas pelos valores diretos de estoques e taxas, mas o uso de auxiliares o torna mais legível, destacando o real significado de uma expressão específica. Auxiliares geralmente são representadas graficamente por círculos com um nome descritivo. Precisam de uma expressão matemática em função dos outros elementos do diagrama para cálculo de seu valor, da mesma forma que as taxas. Algumas ferramentas destacam constantes como um tipo especial de variável que têm seu valor especificado diretamente na expressão e servem exclusivamente como parâmetros para a configuração do sistema. Como exemplo de auxiliares, pode-se representar data limite para entrega de um projeto (em dias ou meses), densidade de erros, valor médio de produtividade, metas de qualidade quantificáveis, etc. (Barros, 2001).

Fluxo de dados age de forma não conservativa, não é como um fluxo de quantidades representado por taxas. Através das informações, é possível ter uma ideia das relações de causa e efeito e laços de realimentação existentes no modelo. Uma informação é representada por uma seta (geralmente bem fina) que parte de um elemento (que se chama fonte de informação) do diagrama para outro (consumidor de informação) (Knop, 2009).

O autor explica ainda que, um diagrama de estoque e fluxo é baseado, implicitamente, em um modelo matemático de um sistema de equações diferenciais. Uma simulação de um diagrama de estoque e fluxo é uma resolução numérica de um sistema de equações diferenciais com condições iniciais. Os estoques representam as

variáveis do sistema e as taxas suas equações diferenciais. O valor de um estoque, em um determinado momento no tempo, é determinado pela integração das taxas a partir do conhecimento de seu valor inicial, dado pelas condições de contorno.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1. COLETA DE DADOS E VALIDAÇÃO

As amostras não probabilísticas são selecionadas por critérios subjetivos do pesquisador, de acordo com sua experiência e com os objetivos do estudo (Samara e Barros, 1994). A suposição básica das amostras intencionais é de que, com um bom julgamento e uma estratégia adequada, podem ser escolhidos os casos a serem incluídos e, assim, chegar a amostras que sejam satisfatórias para as necessidades da pesquisa (Mattar, 1996).

Apesar de a amostragem probabilística ser tecnicamente superior a não probabilística, este tipo de pesquisa é inviável para este trabalho. Isto porque, os cálculos da amostragem aleatória simples calculada a seguir apresentam o tamanho da amostra e apontam para utilização de uma pesquisa censitária, o que inviabilizaria esta pesquisa por falta de recursos e informações.

O cálculo de determinação do tamanho da amostra, caso fosse empregada amostragem probabilística, considerou que o Brasil possuía, em 2012, 5.102.030 hectares de florestas plantadas de eucalipto, distribuídos 99%, em 16 estados brasileiros, de acordo com o SFB – Serviço Florestal Brasileiro (2013), como mostra o Gráfico 1 .

Amostra Aleatória Simples para população infinita (número de estados), pela equação 1:

$$n_o = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * p * q}{\epsilon^2} \quad (1)$$

$$n_o = 860,16$$

Onde:

$$(1 - \alpha) = 0,95$$

$$\epsilon = 0,03$$

$$p = 0,72 \text{ (Área Plantada pelos 4 principais estados produtores)}$$

$$q = 1 - p$$

Correção da Amostra para população finita, pela equação 2:

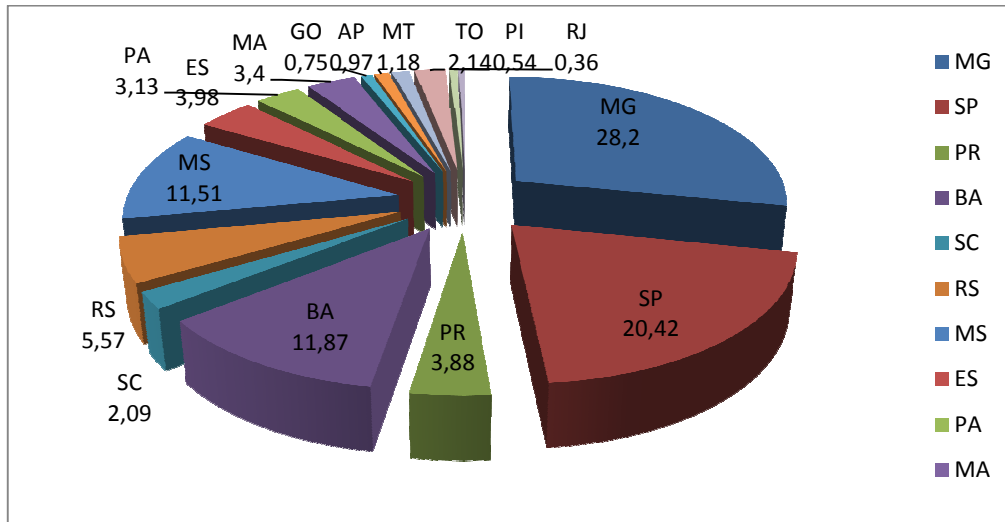
$$n = \frac{N * n_o}{N + n_o} \quad (2)$$

Onde:

$$N = 16 \text{ estados (população)}$$

$n = 15,71$, ou seja, 16 estados.

Gráfico 1 – Florestas Plantadas de Eucalipto no Brasil em 2009 (% da área total)



Fonte: Adaptado de SBF (2013).

Utilizou a amostragem probabilística - aleatória simples para mostrar o tamanho da amostra que seria adequada neste estudo. Os resultados mostram que, seja a população o número de estados que possuem reflorestamentos de eucalipto seria necessário trabalhar com os dados de toda a população.

Assim, como fica inviável a amostragem probabilística devido à extensão do volume de dados necessários para validar estatisticamente, opta-se pela amostragem não probabilística intencional. Determinou-se a amostra por uma grande empresa, não especificada devido aos termos de confidencialidade firmados para realização deste estudo. Esta empresa possui plantios em 4 diferentes regiões que permitem atingir o objetivo principal do trabalho de desenvolver um modelo de simulação de quantificação das remoções líquidas de GEE por sumidouros. Os dados são necessários apenas para mostrar a qualidade e sensibilidade do modelo às condições reais em uma empresa.

Para realização deste estudo foram empregados dados regionais, dendrométricos e operacionais dos plantios de eucalipto. Os dados regionais foram: localização geográfica das áreas e seus respectivos tamanhos, tipo topográfico e características edafoclimáticas (clima e solo). Os dados dendrométricos foram: volume de madeira ($m^3 \cdot ha^{-1}$), densidade da madeira (t/ha), número de árvores por hectare, relação raiz/parte aérea para determinação de biomassa abaixo do solo.

Os dados operacionais foram divididos em dois grupos: quanto aos fertilizantes (nitrogênio), informações sobre o tipo (orgânico ou sintético), quais áreas são

fertilizadas, quantidade aplicada por hectare e frequência de aplicação; quanto às máquinas, equipamentos e veículos utilizados nas atividades de extração, colheita, transporte e manutenção de estradas, fazem-se necessário saber os tipos, marcas e quantidade utilizadas, tipo e quantidade de combustível consumido, rendimento energético (litros/ha, km/ha, ...) por área, combinações adotadas destas máquinas e equipamentos para realização das atividades por área.

Antes da realização da colheita florestal, as empresas realizam o inventário pré-corte para melhor monitoramento do rendimento da floresta e o planejamento da colheita e das atividades industriais. Assim, foram consultados em bancos de dados informações sobre produtividade média (IMA) e rotação. Para o cálculo do sequestro de carbono foram necessários dados sobre a produção ($m^3 \cdot ha^{-1}$) e a densidade da madeira.

3.2. MATRIZ DE PAGAMENTO DE CRÉDITOS DE CARBONO

A matriz de pagamento de créditos de carbono deve ser efetuada de acordo com a metodologia de escopo setorial e pelo tipo de atividade de mitigação, como energia renovável, geração de eletricidade de baixo carbono, medidas de eficiência energética, mudança de combustível, destruição de gases de efeito estufa (GEE), prevenção de emissões e remoção de GEE por sumidouros (UNFCCC, 2010). O estudo aqui proposto enquadra-se no escopo setorial de “Uso da Terra, Mudança do uso da Terra e Floresta” por ser tratar de reflorestamentos de eucalipto, e a atividade de mitigação é “Remoção de GEE por sumidouros”. Ainda, dentre as nove metodologias aprovadas para atividades de projetos de Florestamento e Reflorestamento (F/R) de larga escala, ajusta-se à “AR-AM005 – Atividades de Florestamento e Reflorestamento implementadas para usos comerciais e, ou, industriais”.

No Brasil, atualmente, existe apenas um projeto de remoção de GEE por sumidouros (área de reflorestamento) no qual as atividades foram implementadas para fins comerciais, que é o projeto “Reflorestamento como fonte renovável de suprimento de madeira para uso industrial no Brasil”. Este projeto foi proposto pela Plantar S/A, empresa responsável pelo estabelecimento de plantios de eucalipto para suprimento de indústria de ferro com carvão vegetal (Plantar, 2009). Com base neste projeto e na Metodologia do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo da UNFCCC, o presente

estudo analisa atividades de reflorestamento de eucalipto para suprimento de indústria de celulose e papel, buscando simular a matriz de pagamento de créditos de carbono fundamentado na metodologia AR-AM005 e o Documento de Concepção do Projeto proposto pela Plantar S/A e validado pelo Banco Mundial.

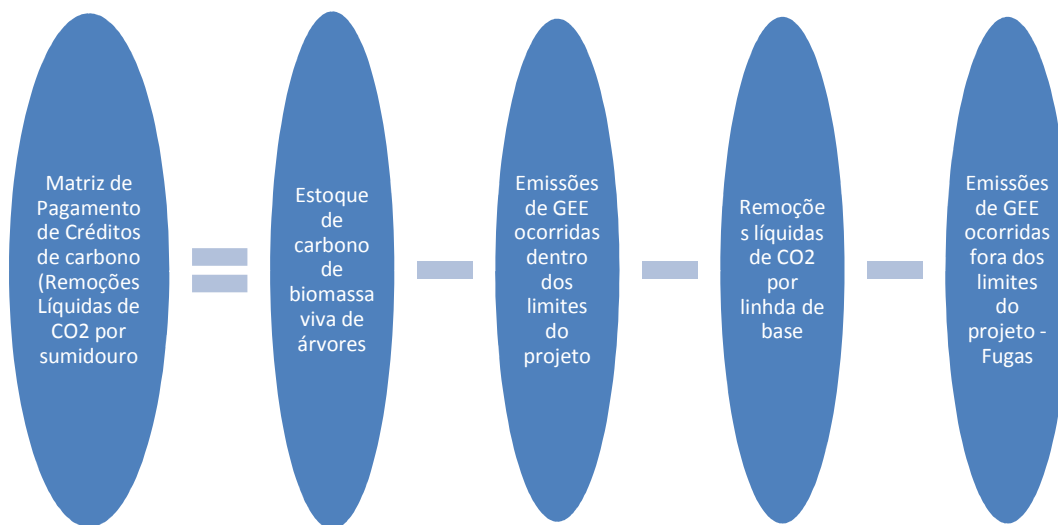


Figura 5 – Esboço da matriz de pagamento de créditos de carbono
Fonte: Elaborado pela autora adaptado de UNFCCC (2006)

Conforme apresentado pela UNFCCC (2006) e Plantar S/A. (Plantar, 2009), para determinação da matriz de pagamento de crédito de carbono em estudo são necessárias às mensurações das remoções líquidas de GEE pelo sumidouro e as fugas de CO₂, conforme Figura 5. Entende-se por remoções líquidas pelo sumidouro, o saldo entre o sequestro do carbono pelo estoque de biomassa e as emissões realizadas dentro dos limites geográficos do projeto. Por fugas de CO₂, as emissões ocorridas em resultado de aumento nas emissões mensuráveis e atribuíveis a atividades do projeto que envolva o consumo de combustíveis fósseis fora dos limites geográficos do projeto, por exemplo: transporte de mudas, de pessoal, de fertilizantes, entre outros.

A matriz de pagamento de créditos de carbono, ou remoções líquidas de GEE antropogênicos por sumidouros em tCO₂e (tonelada de dióxido de carbono equivalente) descrita na Figura 5 acima, conforme UNFCCC (2006) e Plantar (2009), são determinados pela equação 3:

$$C_{AR-CDM} = \Delta C_{ATUAL} - \Delta C_{BSL} - LK \quad (3)$$

Onde:

C_{AR-CDM} = remoções líquidas de gases de efeito estufa antropogênicos por sumidouros;
em toneladas de CO₂-e

ΔC_{ATUAL} = remoções líquidas reais de gases de efeito estufa por sumidouros; toneladas
de CO₂-e

ΔC_{BSL} = remoções líquidas de gases de efeito estufa de linha de base por sumidouros;
toneladas de CO₂-e

LK = fugas em toneladas de CO₂-e

3.2.1. REMOÇÕES LÍQUIDAS REAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR SUMIDOUROS

As remoções líquidas de GEE por sumidouros são o resultado final entre o sequestro e as emissões de carbono dentro da área geográfica do projeto, de acordo com UNFCCC (2006) e Plantar (2009), conforme a equação 4:

$$\Delta C_{ATUAL,t} = \sum_{i=1}^{Ip} \sum_{j=1}^{Jp} \sum_{k=1}^{Kp} \Delta C_{ijk,t} - GHG_{E,t} \quad (4)$$

Onde:

$\Delta C_{ATUAL,t}$ = remoções líquidas reais de gases de efeito estufa por sumidouros; toneladas
CO₂ -e ano⁻¹ no ano t

$\Delta C_{ijk,t}$ = alterações anuais médias nos estoques de carbono da biomassa viva de árvores
por estrato i , espécie j , sub-estrato k (classe etária); toneladas CO₂ ano⁻¹ no ano t

$GHG_{E,t}$ = aumentos anuais nas emissões de GEE por fontes situadas dentro dos limites
geográficos do projeto em resultado da implementação do projeto F/R MDL;
toneladas CO₂-e ano⁻¹ no ano t

i = número de estratos do projeto, $i = 1,2,3 \dots IP$

j = número de espécies do projeto, $j = 1,2,3 \dots JP$

k = número de sub-estratos do projeto, $k = 1,2,3 \dots KP$

3.2.1.1. ALTERAÇÕES NOS ESTOQUES DE CARBONO DA BIOMASSA VIVA DE ÁRVORES

Como o objetivo deste estudo não foi de desenvolver uma metodologia de monitoramento para projetos de MDL Florestal, mas sim de desenvolver um modelo de simulação da matriz de pagamento de créditos de carbono das atividades de reflorestamento de eucalipto para uso industrial, não foram necessárias medições dendrométricas em povoamento florestais. Foram utilizadas as informações obtidas nos bancos de dados já disponíveis.

Para quantificação das alterações nos estoques de biomassa viva é necessário: o volume e o incremento médio anual (IMA) em diferentes idades, a rotação florestal, a densidade básica média da madeira, a massa seca, o teor de carbono em biomassa, a massa (ou volume) de carbono e de dióxido de carbono.

As alterações do estoque de carbono na biomassa viva foi calculada a partir da área de cada estrato i , espécie j e sub-estrato k no ano de monitoramento t e o somatório dos estoques médios de carbono na biomassa acima da superfície do solo e na biomassa abaixo da superfície do solo por unidade de área, dada pelas equações 5 a 7, conforme UNFCCC (2006) e Plantar (2009).

Algumas vezes a quantidade de carbono armazenada na biomassa é relatada como uma quantidade equivalente de dióxido de carbono. Isto ocorre com frequência quando se considera a quantidade de dióxido de carbono que foi removida da atmosfera e convertida finalmente para biomassa através de fotossíntese. A conversão do dióxido de carbono (peso atômico 44) para carbono (peso atômico 12) obtém-se multiplicando a quantidade de carbono por 3,67 (Ravindranath e Ostwald, 2008).

$$\Delta C_{ijk,t} = (C_{AB,ijk,m} + C_{BB,ijk,m}) * \frac{44}{12} \quad (5)$$

$$C_{AB,ijk,m} = A_{ijk,m} * MC_{AB,ijk,m} \quad (6)$$

$$C_{BB,ijk,m} = A_{ijk,m} * MC_{BB,ijk,m} \quad (7)$$

Onde:

$C_{AB,ijk,m}$ = alterações no estoque de carbono na biomassa acima da superfície do solo para estrato i , espécie j sub-estrato k ; toneladas de C no ano de monitoramento m

$C_{BB,ijk,m}$ = alterações no estoque de carbono na biomassa abaixo da superfície do solo para estrato i , espécie j sub-estrato k ; toneladas de C no ano de monitoramento m

$A_{ijk,m}$ = área do estrato i , espécie j sub-estrato k ; hectare (ha) no ano de monitoramento m

$MC_{AB,ijk,m}$ = estoque médio de carbono na biomassa acima da superfície do solo para estrato i , espécie j sub-estrato k ; toneladas de C ha⁻¹ no ano de monitoramento m

$MC_{BB,ijk,m}$ = estoque médio de carbono na biomassa abaixo da superfície do solo para estrato i , espécie j sub-estrato k ; toneladas de C ha⁻¹ no ano de monitoramento m

Para os cálculos das alterações nos estoques de carbono é necessário determinar os estoques médios de carbono na biomassa acima e abaixo do solo dentro de cada estrato ($MC_{AB,ijk,m}$ e $MC_{BB,ijk,m}$) que, conforme UNFCCC (2006) e Plantar (2009), são estabelecidos pelas equações 8 e 9:

$$MC_{AB,ijk,m} = \frac{\sum_{p=1}^{P_{ijk}} PC_{AB,ijk,plot,m}}{P_{ijk}} \quad (8)$$

$$MC_{BB,ijk,m} = \frac{\sum_{p=1}^{P_{ijk}} PC_{BB,ijk,plot,m}}{P_{ijk}} \quad (9)$$

Para aplicação das equações 8 e 9, faz-se necessário estimar os estoques de carbono no nível da parcela em biomassa acima e abaixo do solo de acordo com as equações 10 e 11, conforme UNFCCC (2006) e Plantar (2009). O valor a ser aplicado para densidade da madeira será baseado na média em função das espécies utilizadas pelas empresas e pelas características edafoclimáticas das regiões.

$$PC_{AB,ijk,plot,m} = \sum_{tr=1}^{TR} TB_{AB,ijk,tree,m} * CF_j \quad (10)$$

$$PC_{BB,ijk,plot,m} = \sum_{tr=1}^{TR} TB_{BB,ijk,tree,m} * CF_j \quad (11)$$

Onde:

$PC_{AB,ijk,plot,m}$ = estoque de carbono no nível da parcela em biomassa acima da superfície do solo para estrato i espécie j sub-estrato k por unidade de área; toneladas de C ha⁻¹ no ano de monitoramento m

$PC_{BB,ijk,plot,m}$ = estoque de carbono no nível da parcela em biomassa abaixo da superfície do solo para estrato i espécie j sub-estrato k por unidade de área; toneladas métricas de C ha⁻¹ no ano de monitoramento m

$TB_{AB,ijk,tree,m}$ = biomassa acima da superfície do solo por árvore de estrato i espécie j e sub-estrato k ; toneladas de matéria seca de árvore⁻¹ no ano de monitoramento m

$TB_{BB,ijk,tree,m}$ = biomassa abaixo da superfície do solo por árvore de estrato i espécie j e sub-estrato k ; toneladas de matéria seca de árvore⁻¹ no ano de monitoramento m
 CF_j = fração de carbono de matéria seca para espécie j , toneladas métricas de C⁻¹

Biomassa significa a massa de matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal e a biomassa florestal significa toda a biomassa existente na floresta ou apenas na sua fração arbórea (Sanquetta, 2002). Para Martinelli *et al.* (1994), biomassa é a quantidade expressa em massa do material vegetal disponível em uma floresta, sendo que os componentes de biomassa geralmente estimados são a biomassa viva horizontal acima do solo, composta de árvores e arbustos, a biomassa morta acima do solo, composta pela serapilheira e troncos caídos, e a biomassa abaixo do solo, composta pelas raízes. A biomassa total é dada pela soma de todos esses componentes. Trabalhos têm sido realizados utilizando-se estimativas de volume e biomassa em diferentes partes das árvores e nos compartimentos das florestas, as quais são convertidas em quantidades de carbono pela utilização de fatores de conversão, ou seja, de forma indireta (Cooper, 1983; Brown e Lugo, 1984; Brown, Lugo e Chapman, 1986; Schroeder, 1992), principalmente devido ao custo elevado para obtenção desse elemento de forma direta.

As plantas na fotossíntese removem dióxido de carbono da atmosfera e armazenam na sua biomassa. Ainda que o carbono entre na planta através de suas folhas como dióxido de carbono e seja transformado por processos metabólicos da planta para se tornar um constituinte, são necessárias combinações químicas dentro da planta. Medidas do conteúdo de carbono na biomassa de árvores têm sugerido que não existe muita diferença entre espécies ou em diferentes partes da planta. Estudos na Austrália de uma variedade de espécies de árvores mostraram que a biomassa seca sobre o solo geralmente contém cerca de 50 % do carbono enquanto as raízes contêm 49% (Gifford, 2000). Assim, o teor de carbono em biomassa para as árvores, inclusive o eucalipto, é de 0,5 ou 50%.

As alterações nos estoques de carbono da biomassa viva de árvores são aquelas que estimam a biomassa acima e abaixo da superfície do solo em função do peso de matéria seca de árvore, pelas equações 12 e 13. Para isto, é fundamental saber a densidade da madeira, que é definida como fator utilizado na determinação do peso da madeira. Representa a massa ou peso por unidade de volume. Uma vez que a densidade

da madeira pode variar no sentido da medula para a casca e também ao longo do tronco, faz-se necessário o uso da densidade básica média que é a ponderação do volume de seções entre pontos onde foram retirados discos-amostra (Campos e Leite, 2013).

$$TB_{AB,ijk,tree,m} = V_{ijk,m} * D_j * BEF_{j,k} \quad (12)$$

$$TB_{BB,ijk,tree,m} = TB_{AB,ijk,tree,m} * R_j \quad (13)$$

Onde:

$TB_{AB,ijk,tree,m}$ = biomassa acima da superfície do solo por árvore do estrato i espécie j e sub-estrato k ; toneladas de matéria seca árvore⁻¹ no ano de monitoramento m

$TB_{BB,ijk,tree,m}$ = biomassa abaixo da superfície do solo por árvore de estrato i espécie j e subestrato k ; toneladas de matéria seca de árvore⁻¹ no ano de monitoramento m

$V_{ijk,m}$ = volume comercial médio por árvore (diâmetro DBH e altura H) no estrato i espécie j e sub-estrato k (classe etária); m³ de árvore⁻¹ no ano de monitoramento m

D_j = densidade básica da madeira para a espécie j ; toneladas m⁻³ de volume comercial médio

BEF_{jk} = fator de expansão da biomassa para conversão de volume comercial médio para biomassa de árvores acima da superfície do solo para espécie j sub-estrato k ; sem dimensão

R_j = razão raiz/parte aérea apropriada para espécie j (*eucalipto*); sem dimensão

Segundo Campos e Leite (2013), o IMA é a produção até uma idade particular dividida por essa idade, ou seja, a taxa média do aumento da produção desde a implantação do povoamento até uma idade particular. Ainda, os autores definem a rotação florestal de corte ou colheita como o período de tempo desde o estabelecimento do povoamento até a sua substituição após o corte raso, sendo próximo da idade técnica de corte. Apontam que, do ponto de vista biológico e da sustentabilidade, a rotação é definida com base na maximização da produtividade média. No cultivo do eucalipto no Brasil, a rotação florestal encontra-se na faixa de 5 a 7 anos, na maioria das vezes.

O volume comercial médio por árvore ($V_{ijk,m}$) é determinado pela relação entre o Incremento médio anual (IMA) e a rotação do plantio, como segue a equação 14.

$$V_{ijk,m} = \text{IMA} \div n \quad (14)$$

Onde:

n = número de fustes por hectare

IMA = incremento médio anual ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$)

3.2.1.2. AUMENTO NAS EMISSÕES DE GEE POR FONTES SITUADAS DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO

De acordo com a Metodologia AR-AM005 do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (UNFCCC, 2010) e o Documento de Concepção de Projeto da Plantar (Plantar, 2009), o aumento nas emissões de GEE esperadas de um projeto F/R é oriundo das emissões de gases de efeito estufa a partir da queima de combustíveis fósseis para preparação do local, desbaste e derrubada e corte de madeira; das reduções no estoque de carbono na biomassa viva da vegetação não arbórea existente, causada pela perda de biomassa na preparação do local (limpeza das pastagens em estado estável devido à preparação do local para implantação do projeto de F/R); das emissões de N_2O causadas pela aplicação de fertilizantes com nitrogênio e das emissões de gases de efeito estufa não- CO_2 a partir da queima de biomassa devido a incêndios acidentais, uma vez que a prática de queimada não é adotada por este projeto como boa prática de manejo florestal. Conforme apresentado em Plantar (2009), o cálculo do aumento nas emissões de GEE por fontes situadas dentro dos limites geográficos do projeto é determinado pela equação 15.

$$GHG_{E,t} = E_{FuelBurn,t} + E_{BiomassLoss,t} + E_{Non-CO_2,BiomassBurn,t} + N_2O_{Direct-Nfertilizer,t} \quad (15)$$

Onde:

$GHG_{E,t}$ = aumentos anuais nas emissões de GEE por fontes situadas dentro dos limites geográficos do projeto em resultado da implementação do projeto F/R MDL; toneladas CO_2 -e ano^{-1} no ano t

$E_{FuelBurn,t}$ = aumento anual nas emissões de CO_2 advindas da queima de combustíveis fósseis dentro dos limites geográficos do projeto; toneladas CO_2 -e ano^{-1} no ano t

$E_{BiomassLoss,t}$ = aumento anual nas emissões de GEE associadas à perda de biomassa na preparação da área e na sua conversão em F/R dentro dos limites geográficos do projeto; toneladas CO_2 -e ano^{-1} no ano t

$E_{Non-CO_2, Biomass Burn, t}$ = aumento anual em emissões outras (que não CO₂) em resultado da queima de biomassa dentro dos limites geográficos do projeto; toneladas CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$N_2O_{Direct- N fertilizer, t}$ = aumento anual em emissões de N₂O em resultado da aplicação direta de nitrogênio dentro dos limites geográficos do projeto; toneladas CO₂-e ano⁻¹ no ano t

A) AUMENTO NAS EMISSÕES DE CO₂ ORIUNDAS DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO

As emissões por queima de combustíveis fósseis utilizados dentro dos limites geográficos do projeto resultam do uso de máquinas para a realização das atividades de exaustão (preparo do solo, irrigação, etc.), colheita, transporte e estradas (implantação e manutenção). Elas são determinadas com base no tamanho da área onde serão realizadas as atividades, o consumo médio de combustível (por hectare, metro cúbico de madeira ou quilômetro percorrido), a frequência com que estas atividades são realizadas durante a rotação de corte e qual a duração desse ciclo e o fator de emissão de CO₂ para o tipo de combustível utilizado. A equação 16 determina essas emissões por queima de combustível.

$$E_{FuelBurn, t} = (CA_{Diesel, t} * EF_{Diesel} + CA_{Gasoline, t} * EF_{Gasoline}) * 0,001 \quad (16)$$

Onde:

$E_{FuelBurn, t}$ = aumento anual nas emissões de CO₂ advindas da queima de combustíveis fósseis dentro dos limites geográficos do projeto; toneladas CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$CA_{Diesel, t}$ = volume de consumo de diesel; litro(l).ano⁻¹ no ano t

$CA_{Gasoline, t}$ = volume de consumo de gasolina; litro(l).ano⁻¹ no ano t

EF_{Diesel} = fator de emissão de carbono para diesel; KgCO₂ l⁻¹ (Padrão IPCC: 2,83)

$EF_{Gasoline}$ = fator de emissão de carbono para gasolina; KgCO₂ l⁻¹ (Padrão IPCC: 2,33)

0,001 = conversão de kgCO₂ para tCO₂

B) AUMENTO NAS EMISSÕES DE GEE ASSOCIADAS À PERDA DE BIOMASSA DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO

As emissões a partir de perda de biomassa na preparação do local e conversão de pastagens em áreas de F/R são determinadas de acordo as equações 17 e 18. Será adotada a premissa conservadora de que todo estrato de linha de base é conservadoramente identificado como pastagem em seu pico e estado estável.

$$E_{BiomassLoss, t} = \sum_{i=1}^I A_i * B_{w,i} * (1 + R_G) * CF_{N-A} * \frac{44}{12} \quad \forall t = 1 \quad (17)$$

$$E_{BiomassLoss, t} = 0 \quad \forall t > 1 \quad (18)$$

Onde:

$E_{BiomassLoss, t}$ = redução anual média na biomassa de pastagens devido à conversão de pastagens em florestas no estrato i , espécie j , sub-estrato k ; toneladas de CO₂ ano⁻¹ no ano t

A_i = área do estrato i ; ha

$B_{w,i}$ = pico (máximo) de biomassa acima da superfície do solo de vegetação não arbórea pré-existente no estrato i ; toneladas de matéria seca ha⁻¹

R_G = razão raiz/parte aérea apropriada para vegetação não arbórea pré-existente; sem dimensão

CF_{pe} = fração de carbono de biomassa seca em vegetação não arbórea pré-existente; toneladas de C

i = estrato i (número total de estratos I)

$\frac{44}{12}$ = proporção de pesos moleculares de CO₂ e carbono, sem dimensão

C) EMISSÕES A PARTIR DA QUEIMA DE BIOMASSA DEVIDO A INCÊNDIOS ACIDENTAIS

As emissões não-CO₂ oriundas de incêndios florestais só podem ser calculadas *ex-post*, ou seja, após a ocorrência do fato. No entanto, em virtude das grandes áreas que compõe os projetos de F/R, as empresas possuem programas de monitoramento de incêndios que auxiliam na detecção de focos. O cálculo *ex-post* das emissões não-CO₂ devido a incêndios acidentais é monitorado conforme prevê a Metodologia do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo AR-AM005 e estimado pelas equações 19 a 22.

$$E_{Non-CO_2, BiomassBurn, t} = E_{BiomassBurn, N_2O, t} + E_{BiomassBurn, CH_4, t} \quad (19)$$

$$E_{BiomassBurn, N_2O, t} = E_{BiomassBurn, C, t} * N/C_{ratio} * EF_{N_2O} * GWP_{N_2O} * \frac{44}{28} \quad (20)$$

$$E_{BiomassBurn,CH_4,t} = E_{BiomassBurn,C,t} * EF_{CH_4} * GWP_{CH_4} * \frac{16}{12} \quad (21)$$

$$E_{BiomassBurn,C,t} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K A_{burn,ijk,t} * B_{ijk,t} * CE * CF \quad (22)$$

Onde:

$E_{Non-CO_2,BiomassBurn,t}$ = emissão não-CO₂ como resultado da queima de biomassa dentro do limite do projeto devido a incêndios acidentais; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$E_{BiomassBurn,N_2O,t}$ = emissão de N₂O a partir da queima de biomassa devido a incêndios acidentais; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$E_{BiomassBurn,CH_4,t}$ = emissão de CH₄ a partir da queima de biomassa devido a incêndios acidentais; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$E_{BiomassBurn,C,t}$ = perda de estoque de carbono na biomassa acima da superfície do solo devido à queima resultante de incêndios acidentais; toneladas de C ano⁻¹ no ano t

N/C_{ratio} = proporção nitrogênio/carbono; sem dimensão

EF_{N_2O} = proporção de emissão padrão do IPCC para N₂O de queima de biomassa (padrão do IPCC: 0,007 kg CO₂-e. kg C⁻¹)

EF_{CH_4} = proporção de emissão padrão de IPCC para CH₄ de queima de biomassa (padrão do IPCC: 0,012 kg CO₂-e. kg C⁻¹)

GWP_{N_2O} = potencial de aquecimento global para N₂O (padrão do IPCC para o primeiro período de compromisso: 310 kg CO₂ . kg N₂O⁻¹)

GWP_{CH_4} = potencial de aquecimento global para CH₄ (padrão do IPCC para o primeiro período de compromisso: 21); kg CO₂ . kg CH₄⁻¹)

$\frac{44}{28}$ = proporção de pesos moleculares de N₂O e nitrogênio; sem dimensão

$\frac{16}{12}$ = proporção de pesos moleculares de CH₄ e carbono; sem dimensão

$E_{BiomassBurn,C,t}$ = perda de estoque de carbono na biomassa acima da superfície do solo devido a queima; toneladas de C ano⁻¹ no ano t

$A_{burn,ijk,t}$ = área anual afetada pela queima da biomassa no estrato i espécie j sub-estrato k ; ha ano⁻¹ no ano t

$B_{ijk,t}$ = biomassa média acima da superfície do solo antes da queima para estrato i espécie j sub-estrato k ; toneladas métricas de ha⁻¹

Nota: $B_{ijk,t}$ indica a biomassa acima da superfície do solo de floresta estabelecida no ano t .

CE = eficiência da combustão; sem dimensões (padrão do IPCC = 0,5)

CF = fração de carbono de matéria seca; toneladas de C (tonelada de matéria seca)⁻¹

i = estrato i (I = número total de estratos)

j = espécie j (J = número total de espécies)

k = sub-estrato k (K = número total de sub-estratos)

D) EMISSÃO DIRETA DE N₂O COMO RESULTADO DA APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO DENTRO DO LIMITE DO PROJETO

A aplicação de fertilizantes nas áreas de reflorestamento com eucalipto ocorre nos três primeiros estágios (anos) de plantio e replantio. A fertilização utilizada é do tipo N (NPK). Cada empresa emprega uma dosagem diferente em função das características edafoclimáticas, mas seu volume é determinado em função de área (kg/ha). O cálculo das emissões diretas de N₂O em função da fertilização do plantio é determinado pelas equações 23 e 24.

$$N_2O_{\text{Direct-N fertilizer, t}} = [(F_{SN,t} + F_{ON,t}) * EF_i] * \frac{44}{28} * GWP_{N_2O} \quad (23)$$

$$F_{SN,t} = N_{SF-Fert,t} * (1 - FRAC_{GASF}) \quad (24)$$

Onde:

$N_2O_{\text{direct-N fertilizer}}$ = emissão direta de N₂O como resultado da aplicação de nitrogênio dentro do limite do projeto; toneladas de CO₂-e ano⁻¹

$F_{SN,t}$ = quantidade anual de nitrogênio de fertilizante sintético aplicado ajustado para volatilização como NH₃ e NOx; toneladas de N ano⁻¹ no ano t

$F_{ON,t}$ = quantidade anual de nitrogênio de fertilizante orgânico aplicado ajustado para volatilização como NH₃ e NOx; toneladas de N ano⁻¹ no ano t

$N_{SF-Fert,t}$ = quantidade anual de nitrogênio de fertilizante sintético aplicado; toneladas de N ano⁻¹ no ano t

EF_i = fator de emissão para emissões a partir de entradas de N; toneladas de N₂O-N (toneladas de entrada de N)⁻¹

$FRAC_{GASF}$ = a fração que se volatiliza como NH₃ e NOX para fertilizantes sintéticos; (padrão do IPCC: 0,02); sem dimensões.

GWP_{N_2O} = potencial de aquecimento global para N₂O (padrão do IPCC: 310); kg CO₂ (kg N₂O)⁻¹

$\frac{44}{28}$ = proporção de pesos moleculares de N₂O e nitrogênio; sem dimensões.

3.2.2. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DE LINHA DE BASE POR SUMIDOURO

As remoções líquidas de GEE por sumidouros na linha de base são avaliadas de acordo com os procedimentos da metodologia válida, considerando-se as terras dentro dos limites geográficos do projeto como tendo por cenário de linha de base a manutenção das pastagens em seu estado estável. A metodologia AR-AM005 prevê duas categorias de uso do solo: manutenção das pastagens em seu estado atual; e implementação de florestamento/reflorestamento à taxa do pré-projeto (ha/ano). Para o cálculo das remoções líquidas de linha de base utiliza-se a equação 25.

$$\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{GLB,t} + \Delta C_{ARB,t} \quad (25)$$

Onde:

$\Delta C_{BSL,t}$ = remoções líquidas de GEE de linha de base por sumidouros por ano t ; toneladas CO₂

$\Delta C_{GLB,t}$ = remoções líquidas de GEE de linha de base por sumidouros por ano t , sob o cenário de linha de base *manutenção das pastagens em seu estado estável*; em toneladas de CO₂

$\Delta C_{ARB,t}$ = remoções líquidas de GEE de linha de base por sumidouros por ano t , sob o cenário de linha de base com *atividades de F/R implementadas à taxa do pré-projeto*; em toneladas de CO₂

t = ano para o qual as remoções líquidas de GEE de linha de base por sumidouros são calculadas

No cenário de linha de base, a área do projeto é considerada em seu pico de estoque de carbono e mantida neste estado, visto que as tendências nacionais apontam para as pastagens como sendo o uso do solo mais comum. Donde a estratificação da área do projeto *ex ante* ser conservadoramente considerada como apresentando um único estrato (terras de pastagens altas, em seu pico de estoque de carbono).

De acordo com a metodologia aprovada, sob o cenário de linha de base de *manutenção das pastagens em seu estado atual*, supõe-se que os reservatórios de carbono permaneçam em estado constante (no qual os ganhos e perdas anuais de carbono se anulem mutuamente). Portanto, as alterações do estoque de carbono na biomassa viva da pastagem, para qualquer ano t , são tidas como equivalentes a zero, tal como representado na equação 26.

$$\Delta C_{GLB, t} = 0 \quad (26)$$

De acordo com a metodologia para áreas de pastagens com vegetação nativa e árvores isoladas, as alterações nos estoques de carbono da biomassa viva de árvores isoladas deverão ser estimadas, e as remoções líquidas de GEE de linha de base por sumidouros em tais casos deverão ser representadas pela equação 27.

$$\Delta C_{GLB, t} = \Delta C_{ijk, t, ETB} \quad (27)$$

Onde:

$\Delta C_{ijk, t, ETB}$ = soma das alterações anuais nos estoques de carbono de biomassa viva (acima e abaixo da superfície do solo) das árvores preexistentes no estrato i , sub-estrato j , espécie k ; t CO₂ ano⁻¹.

3.2.3. EMISSÕES DE GEE FORA DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO – FUGAS

Os cálculos de fuga – emissões de GEE fora dos limites geográficos do projeto – levam em conta duas categorias: emissões de CO₂ a partir do uso de combustíveis fósseis no transporte das mudas, produtos e pessoal; e o deslocamento de atividades econômicas para áreas situadas fora dos limites geográficos do projeto (por exemplo: transferência da criação de gado para outro local). Para determinar estas emissões, utiliza-se a equação 28.

$$LK_t = LK_{Vehicle, CO_2, t} + LK_{Activity_Disp, t} \quad (28)$$

Onde:

LK_t = aumento anual nas emissões de GEE fora dos limites geográficos do projeto; toneladas CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$LK_{Vehicle,CO_2,t}$ = aumento anual nas emissões de CO₂ fora dos limites geográficos do projeto devido a queima de combustíveis fósseis por veículos automotores; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$LK_{Activity_Disp,t}$ = aumento anual nas emissões de GEE fora dos limites geográficos do projeto resultantes do deslocamento de atividades econômicas; toneladas CO₂-e ano⁻¹ no ano t

Nota: Normalmente, a aquisição de terras para implementação de um projeto de F/R é feita dentre aquelas onde já existe interesse em sua comercialização, desta forma não há deslocamento de atividade em virtude do interesse por sua descontinuidade.

A. QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS FORA DOS LIMITES DO PROJETO

O aumento nas emissões de GEE fora dos limites geográficos do projeto é causado pela combustão de combustíveis fósseis para transporte de mudas, operários, funcionários, e produtos da colheita de/para as áreas do projeto e de/para os mercados. Essas emissões podem ser estimadas utilizando-se a equação 29 e 30.

$$LK_{Vehicle,CO_2,t} = \frac{\sum_v \sum_f (EF_{vf} * FuelConsumption_{ij,t})}{1000} \quad (29)$$

Onde:

$LK_{Vehicle,CO_2,t}$ = aumento anual em emissões de CO₂ fora dos limites geográficos do projeto devido à queima de combustíveis fósseis por veículos automotores; toneladas CO₂-e ano⁻¹ no ano t

EF_{vf} = fator de emissão para veículo tipo v com combustível tipo f ; kg CO₂ l⁻¹

$FuelConsumption_{if,t}$ = consumo de combustível tipo f por veículo do tipo v , em litros no ano t

v = refere-se ao tipo do veículo

f = refere-se ao tipo de combustível

$$FuelConsumption_{vf} = n_{vf} * k_{vf} * e_{vf} \quad (30)$$

Onde:

$FuelConsumption_{vf}$ = consumo do tipo de combustível f pelo tipo de veículo v , litros

n_{vf} = número de veículos de tipo v com tipo de combustível f

k_{vf} = quilômetros percorridos por cada tipo de veículo v c/ tipo de combustível f , km

e_{vf} = consumo médio de comb. do tipo de veículo v c/ tipo de comb. f , litros km-1

v = refere-se ao tipo de veículo

f = refere-se ao tipo de combustível

Obs.: Para o cálculo das fugas serão considerados: transporte de mudas do viveiro até área de plantio (quando produzidos fora dos limites geográficos do projeto), transporte de madeira até fábrica, transporte de fertilizante do vendedor até área de plantio, transporte de MDO até área de plantio e monitoramento do campo (atividade comum à gerência florestal).

B. DESLOCAMENTO DE ATIVIDADE ECONÔMICA

Deslocamento de atividade ocorre quando as atividades econômicas associadas ao uso da terra dentro da área do projeto mudam para áreas de fora aumentando as emissões de GEE em áreas fora do limite do projeto. A determinação da presença ou ausência de deslocamento atividade deve ser feita antes de adotar os métodos e procedimentos propostos para medir o deslocamento da atividade sob a Metodologia AR-AM0005 (UNFCCC, 2006).

B.1. NENHUM DESLOCAMENTO DE ATIVIDADE

Quando nenhum deslocamento de atividades relacionadas com o projeto está previsto a partir do projeto, então:

$$LK_{DAE,t} = 0 \quad \text{se}$$

Nas situações em que, segundo Metodologia AR-AM0005 (UNFCCC,2006):

- A proposta de atividade do projeto de MDL F/R prevê as mesmas quantidades de produtos em relação às previstas no cenário de referência;
- Atividades de prevenção fugas são implementadas como parte do projeto de modo que o deslocamento de atividade do projeto é impedido. Como exemplo a empresa Plantar S/A que adotou uma política interna de prevenção de fugas devido ao

deslocamento de atividades/domicílios, onde se restringe a compra de terras àquelas que já estavam à venda no mercado. Desta forma, a decisão de vender as terras não é atribuível ao estabelecimento do projeto (Plantar, 2009);

- Área fora do projeto serve como substituto temporário (sazonal) para fornecer os bens cessantes do projeto;

- Atividades pré-projeto são deslocadas para as áreas fora do limite do projeto que têm menor biomassa em comparação com as áreas do projeto a partir do qual as atividades de uso da terra são deslocadas como resultado do projeto.

Em situações diferentes das descritas acima, o deslocamento de atividade e mudança no uso da terra é assumida a ocorrer fora do projeto.

B.2. DESLOCAMENTO DE ATIVIDADE

Se o deslocamento das famílias ou de atividades pré-projeto resulta em perda de biomassa que podem ser razoavelmente atribuídos à atividade do projeto, então as emissões da atividade de deslocamento ocorrem. O deslocamento das atividades econômicas de uma atividade de projeto de MDL F/R para áreas fora do limite do projeto pode ter impactos potenciais sobre o uso da terra em termos de desmatamento resultante da perda de vegetação e conversão para agricultura e outros usos da terra ou a degradação da vegetação devido à colheita prolongada e não regulamentada de produtos florestais, como lenha e forragem (incluindo pastagem) (UNFCCC, 2006).

É possível que o deslocamento de atividade seja de uma ou mais atividades de uso da terra (conversão para agricultura/outros usos, e, ou, coleta de lenha), conforme equação 31.

As categorias de atividades consideradas como deslocamento atividade são:

- Desmatamento/Mudança do uso da terra - conversão de terras florestais fora do limite do projeto para a agricultura, pastagens e outros usos da terra;

- A degradação dos recursos de biomassa - a partir da colheita prolongada de lenha.

$$LK_{DAE,t} = LK_{DAE-D,t} + LK_{DAE-F,t} \quad (31)$$

Onde:

$LK_{DAE,t}$ = aumento das emissões de GEE fora do limite do projeto, resultando em deslocamento de atividades econômicas; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$LK_{DAE-D,t}$ = emissões por desmatamento e mudança do uso da terra para agricultura e outros usos, devido ao deslocamento das famílias; toneladas de CO_2 -e ano^{-1} no ano t

$LK_{DAE-F,t}$ = emissões do uso de lenha, devido ao deslocamento das famílias; toneladas de CO_2 -e ano^{-1} no ano t

Entre as famílias que deverão deslocar, esta metodologia diferencia entre as famílias que permanecem nas imediações do projeto (famílias residentes que são deslocadas para áreas nas imediações do projeto, por exemplo, até 5 km de raio) e aquelas que emigram da área do projeto (famílias de emigrantes). Todas as famílias deslocadas que não se qualificam como famílias residentes são classificadas como famílias de emigrantes.

B.2.1. FUGAS DE DESMATAMENTO E MUDANÇAS NO USO DA TERRA PARA A AGRICULTURA E, OU, OUTROS USOS DA TERRA

Segundo UNFCCC (2006), se a realização de uma atividade de projeto de MDL F/R acarretar no deslocamento de pessoas e, ou, atividades econômicas que resultam em mudanças no uso e, ou, na cobertura da terra fora do limite do projeto, o aumento das emissões associadas a tal alteração deverá ser estimada.

Se o estoque de carbono das áreas em que as famílias se reinstalam em relação às áreas em que as famílias residiam antes da mudança é, no mínimo, 50% mais baixos, então $LK_{DAE-D,t} = 0$. Além disso, as famílias podem decidir abandonar as atividades pré-projeto com a venda de suas terras, que são posteriormente trazidos sob a atividade do projeto após o período de 3 a 5 anos e no caso em que as famílias deslocadas podem decidir buscar outras formas de vida que não está ligado ao uso do solo pré-projeto, então $LK_{DAE-D,t} = 0$.

As fugas das atividades agrícolas devem ser avaliadas se o uso da terra das famílias para essas atividades é deslocado para áreas que têm um estoque de carbono maior do que a metade de 50% do estoque de carbono pré-projeto de seu projeto.

As emissões da mudança do uso/cobertura da terra associadas a famílias residentes e emigrantes são representados na equação 32.

$$LK_{DAE-D,t} = LK_{DAE-D-R,t} + LK_{DAE-D-E,t} \quad (32)$$

Onde:

$LK_{DAE-D,t}$ = emissões por desmatamento e mudança do uso da terra para agricultura e outros usos, devido ao deslocamento das famílias; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$LK_{DAE-D-R,t}$ = emissões da conversão do uso/cobertura da terra fora do limite do projeto para a agricultura ou outro uso da terra atribuível às famílias residentes; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

$LK_{DAE-D-E,t}$ = emissões da conversão do uso/cobertura da terra fora do limite do projeto para a agricultura ou outro uso da terra atribuível às famílias emigrantes; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

Os estratos sujeitos a mudança no uso da terra devem ser comparados com os estratos antes da conversão para avaliar a extensão da mudança do uso/cobertura da terra, conforme equações 33 e 34 abaixo.

$$Area_{Def,t} = AF_{t2} - AF_{t1} \quad (33)$$

$$MAD_h = \frac{AF_{t2} - AF_{t1}}{nH_r} \quad (34)$$

Onde:

$Area_{Def,t}$ = área desmatada para mudança do uso da terra devido ao deslocamento das famílias; hectares no ano t

AF_{t2}, AF_{t1} = área de uso da terra no ano t2 e t1 ano, respectivamente; hectares

MAD_h = área média sujeita a mudança no uso/cobertura da terra por amostra residente domiciliar h; hectares

nH_r = número de domicílios da amostra residente nas imediações do projeto

As emissões devem ser estimadas como o produto da área sujeita a mudanças no uso/cobertura da terra e o estoque médio de carbono na biomassa viva das terras para onde as áreas das atividades pré-projeto provavelmente serão deslocadas. As emissões de GEE da mudança do uso/cobertura da terra atribuíveis às famílias residentes deslocadas devem ser estimadas, de acordo com as equações 35 e 36.

$$LK_{DAE-D-R,t} = \sum_{h=1}^H MAD_h * MC * \frac{44}{12} * \frac{NH_r}{nH_r} \quad (35)$$

$$MC = B_{LB} * CF * EF_{all-pools} \quad (36)$$

Onde:

$LK_{DAE-D-R,t}$ = emissões da mudança do uso/cobertura da terra fora do limite do projeto para a agricultura e, ou, outro uso da terra atribuível às famílias residentes; toneladas de CO₂ -e ano⁻¹ no ano t

MAD_h = área média sujeita a mudança do uso/cobertura da terra por amostra residente casa h; hectares

MC = média do estoque de carbono por hectare na área sujeita a mudança do uso/cobertura da terra; toneladas C ha⁻¹

B_{LB} = biomassa viva de árvores (biomassa acima e abaixo do solo) por hectare na área sujeita a mudança do uso/cobertura da terra; toneladas m.s. ha⁻¹

CF = fração de carbono da biomassa na área sujeita mudança do uso/cobertura da terra; toneladas C (tonelada m.s.)⁻¹

$EF_{all-pools}$ = fator de expansão (1,2 a 1,5) para converter o estoque de carbono de biomassa viva de árvores para o estoque de carbono que representa todos os sumidouros dependendo da densidade da vegetação

NH_r = número total de famílias deslocadas residentes nas proximidades do projeto

nH_r = número de domicílios da amostra residente nas imediações do projeto.

h = domicílio h (H = total de domicílios)

$\frac{44}{12}$ = razão de pesos moleculares de CO₂ e de carbono; adimensional.

As informações sobre o número de famílias emigradas devem ser recolhidas a partir de registros oficiais e os dados de pesquisas domiciliares em famílias residentes sendo usadas como base para estimar as emissões associadas com estas famílias. A dificuldade de obtenção de informações justifica a adoção de medidas preventivas de fugas, como aquelas adotadas pela empresa Plantar S/A já mencionadas. No entanto, em caso de ocorrência destas fugas, seu cálculo deve seguir a equação 37 abaixo:

$$LK_{DAE-D-E,t} = MAD_h * MC * \frac{44}{12} * NH_e \quad (37)$$

Onde:

$LK_{DAE-D-E,t}$ = aumento anual das emissões de conversão do uso/cobertura da terra fora do limite do projeto para a agricultura/outro uso da terra atribuível às famílias de emigrantes; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

MAD_h = média área sujeita a mudança no uso da terra / cobertura por amostra residente casa h; hectares

MC = média do estoque de carbono por hectare na área sujeita a mudança no uso da terra / cobertura; toneladas C ha⁻¹

NH_e = número total de famílias de emigrantes

$\frac{44}{12}$ = razão de pesos moleculares de CO₂ e de carbono; adimensional.

B.2.2. FUGA DE COLETA DE LENHA

De acordo com UNFCCC (2006), uma grande proporção de famílias rurais depende de lenha para fins energéticos domésticos, como cozinhar e aquecimento. Um grande número de famílias deslocadas pode depender da área de que não fazem parte do projeto para satisfazer as suas fontes de combustível de madeira. Considerando as limitações de escolha do combustível, as famílias podem ser forçadas à colheita de lenha de forma insustentável por longos períodos até que tenham alternativas energéticas domésticas adequadas. A colheita contínua de lenha leva à degradação dos recursos de biomassa e poderia contribuir para as emissões fugitivas.

Os dados sobre consumo de lenha, fontes de abastecimento de lenha, e os padrões de consumo de lenha/carvão vegetal devem ser estimados ou coletados a partir dos dados de pesquisas domiciliares e registros oficiais/ estudos de mercado / estudos sobre lenha na região durante o período prévio de 5 a 10 anos, a fim de estimar o consumo per capita de lenha, que é assumido como constante ao longo de todo o período de crédito. O cálculo do consumo anual per capita de lenha é definido pela equação 38:

$$PFC_t = \frac{FG_t * D * BEF_2}{P_t} \quad (38)$$

Onde:

PFC_t = consumo anual per capita de lenha; toneladas m.s. (pessoa)⁻¹ ano⁻¹ no ano t

FG_t = volume anual de uso de lenha; m³ ano⁻¹

D = densidade básica da madeira; toneladas m.s. m⁻³

BEF_2 = fator de expansão de biomassa para a conversão de volumes de tora extraída para o total de biomassa acima do solo (incluindo a casca); adimensional

P_t = população da região; número de pessoas no ano t

A partir do consumo anual de lenha per capita e do crescimento anual da população pode-se determinar as emissões anuais de coleta de combustíveis fora dos limites geográficos do projeto atribuídas as famílias residentes, como segue na equação 39.

$$LK_{AD-Fuel-R,t} = \sum_{h=1}^H HS * PFC_t * (1 - FCA) * CF * \frac{44}{12} * (1 + PG)^t * \frac{NH_r}{nH_r} \quad (39)$$

Onde:

$LK_{AD-Fuel-R,t}$ = emissões anuais de coleta de combustível fora dos limites do projeto atribuíveis às famílias residentes; toneladas de CO₂-e ano⁻¹ no ano t

HS = tamanho médio de família residente; número de pessoas por domicílio

FCA = proporção do consumo de lenha per capita de terras agrícolas/privadas, incluindo compras, ao consumo per capita de lenha anual total de todas as fontes (estimados a partir de dados de pesquisa domiciliar e escala entre 0 a 1), adimensionais

CF = fração de carbono de biomassa seca; toneladas C (tonelada m.s.)⁻¹

PG = crescimento anual da população humana, em percentagem

NH_r = número total de famílias deslocadas que residem na vizinhança do projeto

nH_r = número de domicílios amostrados de residentes.

t = tempo em anos a partir da data de início da proposta de atividade do projeto de MDL

F/R

h = domicílio h (H = número total de domicílios)

$\frac{44}{12}$ = razão de pesos moleculares de CO₂ e de carbono; adimensional.

Como não é praticável obter informações sobre o consumo de lenha das famílias emigrantes, a Metodologia AR-AM0005 determina que o consumo anual de

lenha das famílias emigrantes é assumido como sendo igual ao das famílias residentes deslocadas (UNFCCC, 2006). Assim, o cálculo das emissões anuais de coleta de combustível fora dos limites do projeto atribuíveis às famílias emigrantes segue a equação 40 abaixo.

$$LK_{AD-Fuel-E,t} = HS * PFC_t * (1 - FCA) * CF * NH_e * \frac{44}{12} \quad (40)$$

Onde:

$LK_{AD-Fuel-E,t}$ = emissões anuais de coleta de combustível (lenha) fora dos limites do projeto atribuíveis às famílias de emigrantes; toneladas de CO₂-e ano-1 no ano t

HS = tamanho médio de família residente; número de pessoas por domicílio

FCA = proporção do consumo de lenha per capita de terras agrícolas/privadas, incluindo compras, ao total do consumo de lenha anual per capita de todas as fontes (estimados a partir de dados de pesquisa domiciliar e escala entre 0 a 1), adimensionais

CF = fração de carbono de biomassa seca; toneladas C (tonelada m.s.)⁻¹

PG = crescimento anual da população, em percentagem

NH_e = número total de famílias de emigrantes

$\frac{44}{12}$ = razão de pesos moleculares de CO₂ e de carbono; adimensional.

O detalhamento da matriz de pagamento de créditos de carbono de projetos de reflorestamento de eucalipto para produção de celulose e papel acima permite o entendimento das variáveis que influenciam a contabilização destes créditos. Assim, tem-se a compreensão necessária para desenvolvimento do modelo de gestão ambiental proposto neste estudo.

3.2.4. REDUÇÕES CERTIFICADAS DE EMISSÕES (RCES)

A redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) é medida em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂-e). Cada tonelada de CO₂e reduzida ou removida da atmosfera corresponde a uma unidade emitida pelo Conselho Executivo do MDL, denominada de Redução Certificada de Emissão (RCE) (Portal Brasil, 2014).

O cálculo das RCEs, sejam RCEI ou RCEt, devem seguir as orientações do Conselho Executivo do MDL sob o documento EB22 Anexo 15 (UNFCCC, 2014b).

É empregada a certificação de emissões temporária (RCEt), uma vez que o período duração do projeto de MDL de reflorestamento adotado é de 30 anos de quantificação e monitoramento das remoções líquidas de GEE do projeto. Desta forma, há apenas um período de verificação. Quando for empregado um período de 20 anos de duração do projeto, que pode ser renovado por mais 20 anos, deve-se adotar a RCEI, que reflete a diferença de incremento do estoque de carbono dos reservatórios entre dois períodos de verificação.

A RCEt reflete a mudança no estoque existente no momento da verificação menos as emissões do projeto menos as fugas ($t \text{ CO}_2$), pelas equações 41 a 44.

$$tCER(t_v) = C_p(t_v) - C_B(t_v) - \sum_0^{t_v} E_t - \sum_0^{t_v} LK_t \quad (41)$$

$$C_p - \sum_0^{t_v} E_t = \sum_1^{t_v} \Delta C_{ACTUAL,t} \quad (42)$$

$$C_B(t_v) = \sum \Delta C_{BSL,t} \quad (43)$$

Logo:

$$tCER(t_v) = \sum_1^{t_v} \Delta C_{ACTUAL,t} - \sum \Delta C_{BSL,t} - \sum_0^{t_v} LK_t \quad (44)$$

Onde:

$tCER(t_v)$ = RCEt emitida no momento da verificação t_v ($t\text{CO}_2$)

$C_p(t_v)$ = Estoques de carbono existente no momento da verificação t_v ($t\text{CO}_2$)

$C_B(t_v)$ = Estimativa dos estoques de carbono do cenário de linha de base no momento da verificação t_v ($t\text{CO}_2$)

E_t = Emissões do projeto no ano t ($t\text{CO}_2$)

LK_t = Fugas: estimativa das emissões por fontes fora do limite do projeto no ano t ($t\text{CO}_2$)

Assim, cada tonelada de CO_2 -e equivale a 1 crédito de carbono. A ideia do MDL é que cada tonelada de CO_2 -e não emitida ou retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento possa ser negociada no mercado mundial por meio de Certificados de Emissões Reduzidas (Portal Brasil, 2014).

3.2.5. MODELO DE GESTÃO AMBIENTAL

O modelo de gestão ambiental proposto apresenta a função de simulação das remoções líquidas por sumidouros de projetos de reflorestamento de eucalipto com detalhamento de todas as fontes de emissões de carbono sejam ocorridas dentro dos limites do projeto como uso de equipamentos nas atividades de exaustão, colheita, transporte e manutenção de estradas, sejam fora dos limites do projeto como fugas por queima de combustíveis fósseis e deslocamento de atividades econômicas.

3.2.5.1. SIMULAÇÃO – DINÂMICA DE SISTEMAS

A Dinâmica de Sistema possui duas linguagens fundamentais: loops causais, e estoques e fluxos (Sterman, 2000). Estas linguagens permitem ao modelador mostrar de forma gráfica o modelo para todas as pessoas envolvidas, de forma que elas possam participar de forma ativa na construção do modelo. Além disto, a linguagem de estoques e fluxos serve como base para a construção dos modelos computacionais que permitirão a simulação das diferentes políticas.

A linguagem de círculos causais, uma linguagem icônica, é normalmente utilizada em estágios iniciais do processo de modelagem e busca um entendimento inicial das relações de causalidade de uma forma fácil de ser entendida e criticada. A simbologia de círculos causais (*causal loops*) possui uma série de limitações (Richardson, 1986) e por isso, não é utilizada para a geração dos modelos computacionais. No entanto, para entendimento da dinâmica do estudo proposto serão feitos diagramas de loop causal. A partir deles, serão desenvolvidos os diagramas de fluxo e estoque. A linguagem gráfica mais utilizada na Dinâmica de Sistema está baseada em dois elementos básicos: estoques e fluxos (Sterman, 2000).

A opção pelo método de Dinâmicas de Sistema, em detrimento a outros métodos de simulação, foi consequência de dois fatores. O primeiro deles foi o fato do problema ser marcado pela complexidade dinâmica onde as ações de alguns agentes provocam reações de outros agentes. O segundo fator foi da necessidade de simular quantitativamente as políticas propostas para que pudesse ser avaliado o seu impacto na matriz de pagamento de créditos de carbono.

CAPÍTULO 4 - MODELO DE GESTÃO AMBIENTAL

4.1. ESTOQUE DE FLORESTA, MADEIRA E CARBONO DE BIOMASSA

4.1.1. FONTE DE DADOS

São estudadas oito regiões que abrigam reflorestamentos de eucalipto (*Eucalyptus spp.*) para produção de celulose e papel. As regiões de estudo, aqui denominadas de A, B, C, D, E, F, G, H estão localizadas em diferentes municípios do estado de Minas Gerais, Brasil. Mesmo algumas regiões sendo próximas, estas possuem dessemelhantes características edafoclimáticas (solo e clima) que afetam o desenvolvimento dos reflorestamentos, como pode ser observado na Tabela 4, com dados de crescimento anual (incremento corrente anual de floresta – ICA).

Tabela 4 – Incremento corrente anual e volume de produção no ano de corte por local

IDADE	ICA (m ³ .ha ⁻¹)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
3	42,26	37,89	63,10	65,36	51,52	44,22	33,04	24,95
4	60,57	43,28	45,01	49,49	58,64	49,12	36,83	28,08
5	69,07	40,18	32,72	37,17	57,97	48,40	36,88	28,53
6	60,92	30,75	24,60	28,53	52,98	44,59	34,63	27,26
7	42,71	20,22	19,09	22,45	46,49	39,63	31,36	25,08
8	25,35	12,01	15,21	18,07	40,00	34,55	27,80	22,56
9	20,45	6,70	12,39	14,84	34,13	29,84	24,34	20,00
10	13,09	5,25	10,27	10,40	29,02	25,65	21,15	17,48
Rotação de Corte	7	6	7	7	7	7	7	7
Produção (m³.ha⁻¹)	336,82*	219,40**	285,99*	288,72*	324,49*	277,62*	207,99*	149,36*
Densidade básica (t/m³)	0,4976	0,4922	0,4963	0,4977	0,5000***	0,5000***	0,5000***	0,5000***

* Volume de madeira (m³.ha⁻¹ com casca) quando a rotação de corte é de 7 anos.

** Volume de madeira (m³.ha⁻¹ com casca) quando a rotação de corte é de 6 anos.

*** Valor adotado para densidade básica da madeira em regiões não mensuradas.

No Brasil existem empresas de base florestal de diferentes portes que, para facilitar sua gestão, dividem sua área total em regiões menores. Estas regiões podem apresentar diferenças edafoclimáticas que justificam sua divisão, ou simplesmente são divididas devido à sua extensão que dificulta seu gerenciamento florestal. Considerando as regiões estudadas, seu tamanho médio de área para plantio (exceto áreas de preservação e de outros usos) é de 35 mil hectares, que foram divididos em compartimentos iguais, para efeito de estudo, de acordo com o ciclo de plantio a ser adotado, conforme Tabela 5. Foram utilizados dados de duas empresas, sendo que cada uma possui quatro das regiões estudadas.

Tabela 5- Programação anual do tamanho das áreas plantadas (hectares)

Ciclo (anos)	5	6	7	8	9	10
Tamanho dos compartimentos (ha)	7.000,00	5.833,33	5.000,00	4.375,00	3.888,88	3.500,00
Área total (ha)	35.000,00	35.000,00	35.000,00	35.000,00	35.000,00	35.000,00

Uma vez que o foco deste estudo é o uso da Dinâmica de Sistemas como simulação dos estoques de floresta, madeira e carbono, os dados utilizados de volume de madeira e incremento corrente anual (ICA) são aqueles obtidos pelos inventários florestais contínuos (IFC) e de pré-corte (IFPC) realizados pelas empresas. O IFC é baseado num conjunto de parcelas permanentes medidas anualmente no povoamento. Já no IFPC são medidas parcelas temporárias no momento que antecede o corte. O rigor empregado nestes inventários e o histórico de dados das regiões permitem estimar os valores médios de volume, ICA e densidade básica da madeira, que são utilizados no planejamento florestal. As medições são feitas em parcelas determinadas dentro de cada talhão, sendo a área desses talhões, em média, de 20 a 30 ha.

Para obtenção dos dados de volume e ICA foram utilizados os resultados dos inventários florestais contínuo e de pré-corte. As parcelas são áreas retangulares cerca de 300 m², com marcações nas árvores para facilitar sua localização para as medições posteriores. É comum definir uma parcela a cada 20 e 2 ha, respectivamente aos IFC e IFPC. As medições são feitas anualmente, a partir do segundo ano de idade do plantio, coletando o *dap* (diâmetro a 1,3m de altura) e a altura total. A densidade básica da madeira é determinada através da coleta de amostras no campo e analisadas em laboratório.

Os dados referentes ao ICA e volume de madeira apresentados na Tabela 9, correspondem aos valores médios. No entanto, como não são feitas medições nos anos 1 e 2, se faz necessário à estimação dos valores de ICA nestes períodos.

A. ESTIMATIVA DAS VARIÁVEIS UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE GOMPERTZ

Winsor (1932) propôs a utilização de modelo de Gompertz para descrever os fenômenos econômicos e biológicos associados ao crescimento. Este modelo parte do princípio que o crescimento aumenta monotonamente até quando alcançar um máximo e depois diminui de forma assintoticamente monótona. Hoffmann e Berger (1973) e Lawrence e Flower (2002) afirmam que a curva de crescimento do volume de madeira de um povoamento florestal é, geralmente, sigmoide, isto é, a curva apresenta inicialmente, declividade crescente, até atingir um ponto de inflexão, a partir do qual o crescimento é cada vez mais lento, quando a curva se aproxima de uma assíntota paralela ao eixo das abscissas. Na fase inicial da curva se observa um período onde a taxa de crescimento é perto de zero, também chamado de atraso de fase (Devlieghere et al. 2008), e é descrito como o momento em que se apresenta a maturação do sistema imunológico e estrutura a necessidade de manutenção, a sua duração é limitada pelo valor delta. Este valor corresponde à idade em que a tangente ao ponto de inflexão corta a linha do eixo X (Casas et al., 2010). Hoffmann e Thame (1970) confirmaram em seus estudos que a curva de Gompertz é adequada no ajuste sobre o crescimento do volume de madeira, por esta razão é utilizada neste estudo.

Foram utilizados os valores médios do volume de madeira, apresentados na Tabela 9, para determinar os parâmetros da equação de Gompertz, descrita na Equação (45) e suas condições na equação (46).

$$y = a \exp(-\exp(b - ct)) \quad (45)$$

$$a > 0; b > 0; 0 < c < 1 \quad (46)$$

Onde y é o volume de madeira no momento t , $a > 0$, é o volume máximo, o parâmetro $c > 0$ descreve o índice de maturidade ou a taxa de crescimento específico, e o parâmetro $b > 0$ controla a diferença entre o volume inicial e volume final no tempo t . O ponto de inflexão é o ponto no tempo em que $y = a/\exp$, o que dá $t = b/c$. A curva de Gompertz pode gerar assimetria em torno de um ponto de inflexão e neste ponto antes

de atingir 50% do volume máximo, mostra crescimento inicial rápido, mas com valores mais lentos a medida que se aproxima a assíntota, com um longo período de crescimento linear em torno do ponto de inflexão.

Os parâmetros determinados para cada região com o uso do software Curve Expert 1.4 são apresentados na Tabela 6. Estes valores foram utilizados para estimar os volumes anuais de cada região a partir do primeiro ano de plantio, bem como permitiu estimar ICA desde 1 até 10 anos (Tabela 7). Estes resultados serão utilizados como dados para a simulação dos estoques de floresta, madeira e carbono pela técnica de Dinâmica de Sistemas.

Tabela 6 – Estimativa dos parâmetros do modelo de Gompertz

Parâmetros	REGIÕES							
	A	B	C*	D	E	F	G	H
a	430,0018	276,8174	432,8742	341,7582	499,5813	435,2223	339,2920	251,8156
b	1,585230	1,286046	-2,90136	1,128569	1,388330	1,343021	1,383239	1,577069
c	0,418008	0,448934	--	0,428801	0,320607	0,308231	0,301811	0,321197

* Os dados de volume da Região C obtiveram melhor ajuste à função Exponencial Modificada ($y = a e^{b/x}$).

Tabela 7 – Valores regionais ajustados de ICA e volume de madeira para idade de 1 a 10 anos

Idade	A		B		C		D	
	Volume	ICA	Volume	ICA	Volume	ICA	Volume	ICA
1	17,30	17,30	27,49	27,49	23,79	23,79	45,64	45,64
2	51,85	34,55	63,37	35,89	101,47	77,68	92,10	46,46
3	106,81	54,96	108,02	44,64	164,57	63,10	145,49	53,39
4	171,89	65,08	151,82	43,80	209,58	45,01	195,96	50,47
5	235,13	63,24	188,66	36,84	242,30	32,72	237,90	41,94
6	288,98	53,85	216,72	28,06	266,90	24,60	269,93	32,03
7	331,01	42,03	236,78	20,06	285,99	19,09	293,08	23,15
8	361,96	30,95	250,55	13,76	301,20	15,21	309,21	16,13
9	383,90	21,94	259,75	9,20	313,59	12,39	320,19	10,98
10	399,07	15,17	265,80	6,05	323,86	10,27	327,55	7,36

Idade	E		F		G		H	
	Volume	ICA	Volume	ICA	Volume	ICA	Volume	ICA
1	27,25	27,25	26,08	26,08	17,78	17,78	7,52	7,52
2	60,51	33,26	55,03	28,95	38,33	20,55	19,73	12,21
3	107,97	47,46	95,24	40,21	67,65	29,32	39,72	19,99
4	164,36	56,39	142,52	47,27	102,97	35,32	65,97	26,25
5	222,96	58,60	191,64	49,12	140,48	37,51	95,32	29,34
6	278,18	55,22	238,22	46,58	176,76	36,28	124,47	29,16

7	326,65	48,46	279,51	41,29	209,49	32,73	151,06	26,58
8	367,02	40,38	314,35	34,84	237,53	28,04	173,83	22,77
9	399,41	32,39	342,68	28,33	260,65	23,12	192,46	18,63
10	424,70	25,28	365,11	22,43	279,19	18,53	207,21	14,75

* Valores de volume em negrito correspondem ao volume obtido na idade de corte adotada na região.

Devido a problemas internos da empresa responsável, as regiões E, F, G, e H só terão simulações quanto aos estoques de floresta, madeira e carbono de biomassa das árvores. Não participarão das simulações de emissões de carbono oriundas de dentro dos limites do projeto, nem de remoções de linha de base e suas fugas.

4.1.2. DINÂMICA DE SISTEMAS

4.1.2.1. DIAGRAMA DE LOOP CAUSAL

Sterman (2000) apud Gunal (2012) sintetiza um modelo de dinâmica de sistemas por dois elementos básicos: estoques para manter o controle dos níveis das “coisas”, e fluxos para taxar a mudanças das “coisas”. “Coisas” são entidades em um sistema que alteram seus estados com base nos loops de feedback de outras ações. Explica ainda que entidades representam grupos e loop-feedback é representado por relações causais. Um diagrama de laço causal é usado para visualizar loops de feedback que existem em um sistema. Existem dois tipos de feedbacks: reforço positivo, que representa o comportamento de crescimento, e o reforço negativo que representa o comportamento de equilíbrio.

A Figura 6 apresenta o Diagrama de Loop Causal do balanço da matriz de pagamento de créditos de carbono de projetos de reflorestamento de eucalipto. O Diagrama Causal é composto por três feedbacks, sendo dois de reforço positivo e um de reforço negativo. O primeiro feedback de reforço positivo diz que a “área de reflorestamento” influencia positivamente a “produção de celulose e papel”, ou seja, quanto maior a área de plantio, maior é o volume de matéria-prima para a produção de celulose e papel. Esta produção, por sua vez, também influencia positivamente as “receitas da empresa florestal”, pois quanto maior a produção, maior tende a ser o volume de vendas e as receitas geradas.

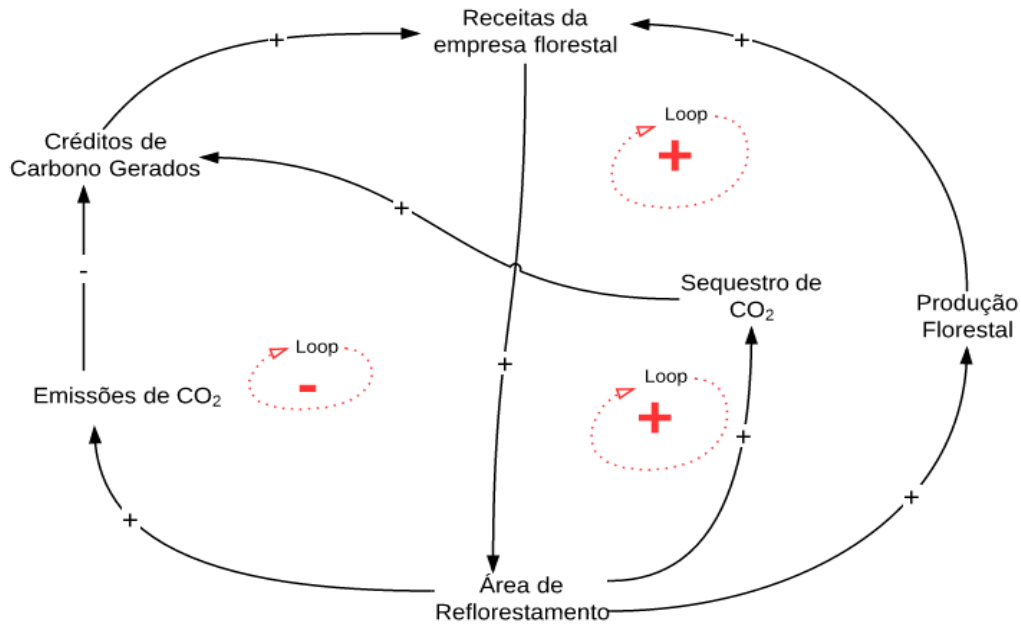


Figura 6 – Diagrama de Loop Causal do Balanço da Matriz de Pagamento de Créditos de Carbono.

O segundo feedback de reforço positivo apresenta a influencia positiva que o volume de “área de reforestamento” tem sob o volume de “sequestro de carbono”, pois o volume maior de madeira representa maior volume de biomassa, que é a forma de armazenamento de carbono pelas árvores. Aumentando o sequestro do carbono pelo reforestamento, obtém aumento dos “créditos de carbono gerados”, que acarretarão também no aumento das “receitas da empresa florestal”.

O terceiro feedback, que é de reforço negativo, indica que o aumento da “área de reforestamento” tem mesmo impacto nas “emissões de CO₂”, uma vez que muitas atividades operacionais são realizadas de forma mecanizada, ocasionando maior queima de combustíveis fósseis. Esta emissão maior influencia de forma negativa os “créditos de carbono gerados”, pois seu balanço se dá pelo saldo entre o que foi sequestrado e emitido pelo projeto de reforestamento.

4.1.2.2. DIAGRAMA DE FLUXO E ESTOQUES

Foi utilizado o software PowerSim Studio 9, por ser um pacote de software robusto e bastante utilizado, como pode ser visto em Goh e Love (2012), Gunal (2012), Borštnar et al. (2011), Kumar e Nigmatullin (2011), entre outros.

Foi elaborado o diagrama de fluxo e estoque do Modelo de Avaliação dos Estoques Florestais (MEFoS) em projetos de reflorestamento de eucalipto no Brasil através do monitoramento da estocagem de floresta em pé, de madeira e carbono. O modelo (MEFoS), detalhado nas seções seguintes, é composto por quatro sub-modelos: uso da terra, de madeira, de crescimento de floresta e do estoque de carbono. O modelo apresentado na Figura 7 representa apenas uma região, sendo necessário replicá-lo de forma a cada região possuir seu modelo com suas características incorporadas, permitindo assim a simulação simultânea de todas as regiões.

A. FLUXO E ESTOQUE DO USO DA TERRA

O primeiro sub-modelo trata do fluxo e estoque do uso da terra, que segue um planejamento de plantio de acordo com a disponibilidade de área e de corte em função da rotação de corte adotado. A programação do plantio, representada no modelo pela variável “*progr A*”, apresenta a programação do tamanho das áreas a serem plantadas anualmente. Por se tratar de uma programação anual, a variável “*progr A*” é determinada pela função-gráfico, conforme equação 47.

$$"progr A" = GRAPH (X; X1; Dx; Y(n)) \quad (47)$$

Nesta formulação:

<i>GRAPH</i>	Função “gráfico” para determinar série temporal das áreas de plantio.
<i>X</i>	Valores do eixo x, utilizando a função TIME para série temporal.
<i>X1</i>	Valor inicial do eixo x, ou seja, tempo inicial. Utilizando a função STARTTIME.
<i>Dx</i>	Incremento entre dois pontos do eixo x. Utilizando função TIMESTEP, por ser intervalo anual.
<i>Y(n)</i>	Tamanhos das áreas de plantio respectivos a cada ano por região.

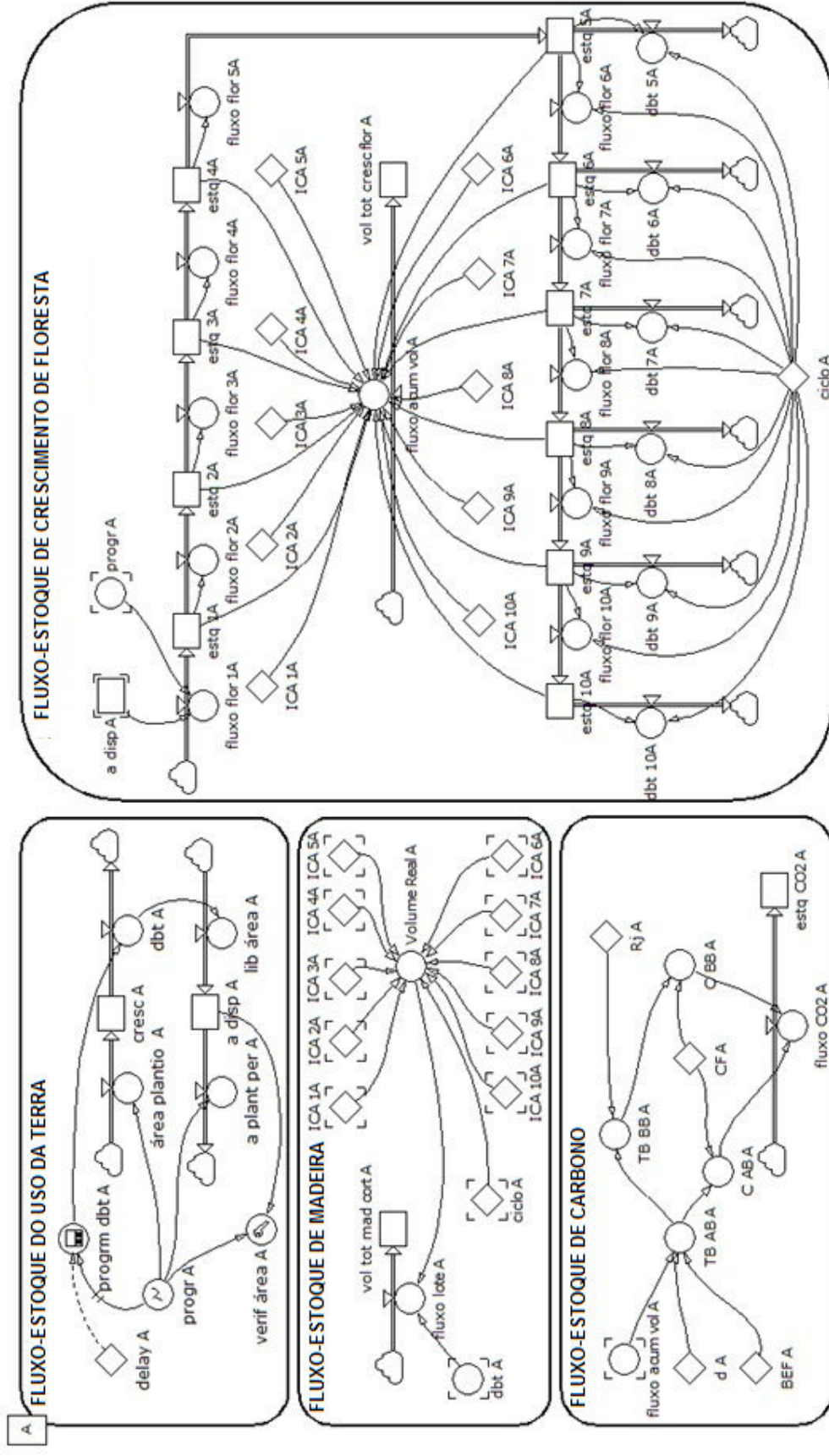


Figura 7 – Modelo desenvolvido de estoque de floresta, madeira e carbono em projeto de reflorestamento.

A programação de plantio (“*progr A*”) determina quatro fluxos seguintes. Primeiro, a variável “*verif área A*” verifica se há área disponível para plantio de acordo com o tamanho das áreas planejadas pela programação, se não houver é interrompida a simulação. Segundo, a variável “*a plant per A*” retira do estoque de área disponível (“*a disp A*”) o tamanho da área que receberá plantio no determinado ano, de acordo com a programação de plantio. Terceiro, a programação de plantio determina o fluxo de áreas que receberam plantio em cada ano pela variável “*área plantio A*”, abastecendo o estoque de áreas com floresta em crescimento (“*cresc A*”). Por último, a programação de corte (“*progrm dbt A*”), definida pela equação 48, é determinada pelas áreas utilizadas de acordo com a programação de plantio (“*progr A*”) e a rotação de corte.

$$\text{"progrm dbt A"} = \text{DELAYPPL}(\text{input}; \text{'delaytime'}; [\text{initial} = \text{input}]) \quad (48)$$

Nesta formulação:

<i>DELAYPPL</i>	Esta função funciona como uma “esteira rolante” onde os valores de entrada são mantidos em espera e liberados após cumprir este tempo de atraso no fluxo.
<i>Input</i>	Valores de entrada que passarão pela “esteira rolante”, neste modelo representado pela variável “ <i>progr A</i> ”.
<i>Delaytime</i>	Tempo de atraso na liberação dos valores de entrada, determinado pela constante “ <i>delay A</i> ”. Esta constante deve ser a ciclo de rotação menos um ano, pois este ano excluído corresponde ao ano de corte.
<i>initial= input</i>	Valor a ser retornado, neste modelo será zero, até o início da liberação dos valores de entrada (“ <i>progr A</i> ”) pelo cumprimento do atraso (“ <i>delay A</i> ”).

B. FLUXO E ESTOQUE DE MADEIRA

O segundo sub-modelo trata do fluxo e estoque de madeira cortada, em função da taxa de crescimento anual da floresta pelo ICA, da rotação de corte e a área cortada. Os incrementos (ICA) mensurados e ajustados são representados pelas variáveis “*ICA 1A*” até “*ICA 10A*”, determinam o volume por hectare ($m^3 \cdot ha^{-1}$) na idade de corte (variável “*ciclo A*”), conforme segue a equação 49.

$$\text{IF('Ciclo de Corte A'=1; 'ICA 1A'; (IF ('Ciclo de Corte A'=2; 'ICA 1A'+ICA 2A'; (IF ('Ciclo de Corte A'=3; 'ICA 1A'+ICA 2A'+ICA 3A'; (IF('Ciclo de Corte A'=4; 'ICA 1A'+ICA 2A'+ICA 3A'+ICA 4A'; (IF('Ciclo de Corte A'=5; 'ICA 1A'+ICA 2A'+ICA 3A'+ICA 4A'+ICA 5A'; (IF('Ciclo de Corte A'=6; 'ICA 1A'+ICA 2A'+ICA 3A'+ICA 4A'+ICA 5A'+ICA 6A'; (IF('Ciclo de Corte A'=7; 'ICA 1A'+ICA 2A'+ICA 3A'+ICA 4A'+ICA 5A'+ICA 6A'+ICA 7A'; (IF('Ciclo de Corte A'=8; 'ICA 1A'+ICA 2A'+ICA 3A'+ICA 4A'+ICA 5A'+ICA 6A'+ICA 7A'+ICA 8A'; (IF('Ciclo de Corte A'=9; 'ICA 1A'+ICA 2A'+ICA 3A'+ICA 4A'+ICA 5A'+ICA 6A'+ICA 7A'+ICA 8A'+ICA 9A'; 'ICA 1A'+ICA 2A'+ICA 3A'+ICA 4A'+ICA 5A'+ICA 6A'+ICA 7A'+ICA 8A'+ICA 9A'+ICA 10A'))))))))))))))) \quad (49)$$

Nesta formulação:

<i>Volume Real A</i>	Corresponde ao volume de madeira por hectare obtida na idade de corte em função dos ICA's.
<i>cicloA</i>	Rotação de corte, ou idade de corte, do plantio.
<i>ICA 1A até ICA10A</i>	Valores de incremento corrente anual (ICA) dos anos 1 ao 10.

O estoque de madeira cortada (“*vol tot mad cort A*”) é abastecido pelo fluxo de corte de madeira, determinado pela variável “*fluxo lote A*”. Este fluxo, definido pela equação 50, é estabelecido pelas áreas em idade de corte (“*dbt A*”) e o volume de madeira (“*Volume Real A*”) obtida por hectare na idade de corte.

$$"fluxo\ lote\ A" = "Volume\ Real\ A" * "dbt\ A" \quad (50)$$

Nesta formulação:

<i>fluxo lote A</i>	Trata do fluxo anual do volume de madeira cortada ($m^3 \cdot ha^{-1}$), conforme o tamanho da área e a volumetria obtida para a idade de corte correspondente.
<i>dbt A</i>	Área a ser desbastada no período vigente.

C. FLUXO E ESTOQUE DE CRESCIMENTO DE FLORESTA

O terceiro sub-modelo aborda o fluxo e estoque do crescimento de floresta através do monitoramento anual das áreas plantadas passando por diferentes níveis de crescimento (ICA) até atingir a idade de corte. O fluxo de crescimento de floresta inicia-se com o fluxo de floresta de idade 1 (“*fluxo flor 1A*”) seguindo a programação de plantio (“*progr A*”) e fazendo nova verificação acerca da disponibilidade de área para plantio, conforme equação 51. Posteriormente, ao fim de cada ano, a área de crescimento de floresta segue para o fluxo de floresta de idade seguinte, podendo chegar até idade 10.

$$"fluxo\ flor\ 1A" = IF ("a\ disp\ A" - "progrA" > 0; "progrA"; 0) \quad (51)$$

Nesta formulação:

<i>fluxo flor 1A</i>	Fluxo de floresta em crescimento na idade 1, verifica se a restrição em que a programação de plantio não pode superar o limite de área disponível.
----------------------	--

O sub-modelo possibilita ainda que a idade de corte seja entre 5 e 10 anos, determinada pelas variáveis “*dbt 5A*” até “*dbt 10A*”, dependendo da rotação de corte (“*ciclo A*”) escolhido, de acordo com equação 52.

$$"dbt xA" = IF ("ciclo A" = x; "estq xA"; 0) \quad (52)$$

Nesta formulação:

<i>dbt xA</i>	Variável que determina a idade <i>x</i> de corte.
<i>estq xA</i>	Estoque de floresta em crescimento da idade <i>x</i> .
<i>x</i>	Corresponde à idade da floresta, para questões de corte pode variar de 5 a 10.

Ao final é totalizado o volume de floresta obtido durante o período de simulação pela soma dos volumes adquiridos em cada idade por área plantada. Onde o estoque total de floresta (“*vol tot cresc flor A*”) gerado pelo reflorestamento ao longo do período total de simulação é determinado pela soma dos fluxos anuais de floresta em crescimento (“*fluxo acum vol A*”), conforme equação 53.

$$"fluxo acum vol A" = ('ICA 1A' * 'estq 1A' + 'ICA 2A' * 'estq 2A' + 'ICA 3A' * 'estq 3A' + 'ICA 4A' * 'estq 4A' + 'ICA 5A' * 'estq 5A' + 'ICA 6A' * 'estq 6A' + 'ICA 7A' * 'estq 7A' + 'ICA 8A' * 'estq 8A' + 'ICA 9A' * 'estq 9A' + 'ICA 10A' * 'estq 10A') \quad (53)$$

Nesta formulação:

<i>fluxo acum vol A</i>	Fluxos anuais de floresta em crescimento.
-------------------------	---

D. FLUXO E ESTOQUE DE CARBONO

O último sub-modelo corresponde ao fluxo e estoque de carbono, que converte o estoque acumulado de floresta em estoque total de carbono, somando o carbono acima e abaixo do solo. Este fluxo quantifica o volume de biomassa das árvores (acima e abaixo do solo) e o estoque de carbono da biomassa pela conversão da fração de carbono da matéria seca. Inicialmente são calculados os fluxos dos estoques de biomassa acima (“*TB AA A*”) e abaixo (“*TB AB A*”) do solo, conforme as equações 54 e 55.

$$"TB AA A" = "fluxo acum vol A" * "d A" * "BEFA" \quad (54)$$

$$"TB AB A" = "TB AA A" * "Rj A" \quad (55)$$

Nesta formulação:

$TB_{AA A}$	Fluxo acima do solo de biomassa das árvores do projeto de reflorestamento.
$d A$	Densidade básica da madeira
$BEF A$	Fator de expansão de biomassa, valor adotado de 1,45*.
$TB_{AB A}$	Fluxo abaixo do solo de biomassa das árvores do projeto de reflorestamento.
$Rj A$	Índice de relação raiz/parte aérea, valor adotado de 0,38*.

* Fonte: Ladeira, 1999.

Na sequencia são calculados os fluxos de carbono por meio da conversão dos fluxos de biomassa acima e abaixo do solo. Para isto, é necessário determinar a fração de carbono na matéria seca das árvores, definida pela equação 56 e 57.

$$"C_{AA A}" = "TB_{AA A}" * "CF A" \quad (56)$$

$$"C_{AB A}" = "TB_{AB A}" * "CF A" \quad (57)$$

Nesta formulação:

$C_{AA A}$	Fluxo acima do solo de carbono das árvores do projeto de reflorestamento.
$C_{AB A}$	Fluxo abaixo do solo de carbono das árvores do projeto de reflorestamento.
$CF A$	Fração de carbono de matéria seca das árvores, valor adotado de 0,50*.

Fonte: Padrão IPCC (IPCC, 2000).

Por fim, é apurado o estoque acumulado de CO_2 (“*estq CO2 A*”) através da soma dos fluxos anuais de carbono (“*fluxo CO2 A*”) gerados acima e abaixo do solo e a conversão de carbono (C) para gás carbônico (CO_2), que é a unidade de medida para contabilização de sequestro e emissões de gases de efeito estufa, como segue a equação 58.

$$"fluxo CO2 A" = ("C_{AA A}" + "C_{AB A}") * \frac{44}{12} \quad (58)$$

Nesta formulação:

$fluxo CO2 A$	carbono das árvores do projeto de reflorestamento.
$44/12$	Proporção dos pesos moleculares de CO_2 e C, necessário para converter o fluxo de C em CO_2 .
Fluxo total	

4.2. EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO

4.2.1. FONTE DE DADOS

Os dados referentes à implantação e manutenção de estradas foram obtidos juntamente com empresas terceirizadas que executam os serviços. Como só havia

disponíveis dados referentes aos dois últimos anos, utilizou-se um gerador de números aleatórios para obter dados para simulação de 30 anos. Os dados gerados correspondem a valores entre aqueles reais informados dos dois últimos anos. Outra particularidade referente à implantação e manutenção de estradas é que as máquinas executam diversas atividades cada uma, então o controle do consumo de combustível é por tipo de máquina e anual. O intervalo de consumo de combustível das máquinas, valores dos dois últimos anos definidos como mínimo e máximo, para geração dos valores para simulação são apresentados na Tabela 8.

Os dados referentes à queima de combustíveis dentro dos limites do projeto foram obtidos no banco de dados da empresa correspondente às regiões A, B, C e D. Os dados referentes às atividades de exaustão, colheita e transporte utilizados correspondem ao consumo médio e frequência de consumo aplicados nos plantios implementados nos últimos 7 anos, apresentados na Tabela 9.

Tabela 8 - Intervalo de consumo de combustível das máquinas de estradas

MÁQUINAS	Consumo regional (litros/ano)							
	A		B		C		D	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Trator de esteira	54.002,48	64.917,88	78.936,12	94.360,42	32.110,91	38.889,88	71.571,44	85.885,73
Escavadeira hidráulica	36.982,13	44.457,24	58.435,92	69.854,43	23.588,59	28.568,40	44.479,15	53.374,98
Motoniveladora	72.850,52	87.575,62	130.395,75	155.875,37	41.783,08	50.603,95	58.808,55	70.570,26
Retroescavadeira	24.273,99	29.180,43	51.386,87	61.427,98	14.711,16	17.816,85	15.743,37	18.892,05
Carregadeira de pneus	28.072,15	33.746,31	50.989,62	60.953,11	16.774,10	20.315,30	26.924,62	32.309,54
Rolo compactador	27.272,54	32.785,07	49.377,01	59.025,39	14.998,62	18.165,00	16.752,43	20.102,92
Trator agrícola	11.480,17	13.800,63	21.115,56	25.241,59	6.831,39	8.273,57	10.758,82	12.910,58
Caminhão Munck	10.623,44	12.770,73	14.737,65	17.617,42	6.307,20	7.638,72	14.860,06	17.832,07
Caminhão Pipa	10.823,34	13.011,04	16.346,47	19.540,61	6.510,11	7.884,47	13.789,76	16.547,71
Cavalo mecânico prancha	0,00	0,00	2.742,62	3.278,53	0,00	0,00	812,31	974,77
Caminhão comboio	9.195,56	11.054,23	19.418,94	23.213,45	5.478,64	6.635,24	5.997,94	7.197,53
Caminhão transporte	0,00	0,00	11.724,09	14.015,01	0,00	0,00	6.714,03	8.056,83

Tabela 9 – Consumo médio de combustível e frequência de ocorrência das atividades

Atividade	Combustível	Unidade	Região A				Região B				Região C				Região D	
			Consumo	Frequência	Distância	Consumo	Frequência	Distância	Consumo	Frequência	Distância	Consumo	Frequência	Distância	Consumo	Frequência
Limpeza	Diesel	L/ha	7	8		7	8		7	7		7	7		7	6
Aplicação de Herbicida e Calcário	Diesel	L/ha	7	2		7	1		7	1		7	1		7	1
Distribuição de Formicida	Diesel	L/ha	7	1		7	1		7	1		7	1		7	1
Subsolagem	Diesel	L/ha	14	1		14	1		14	1		14	1		14	1
Sulcamento/ Coveamento	Diesel	L/ha	14	1		14	1		14	1		14	1		14	1
Plantio	Diesel	L/ha	--	--		--	--		--	--		--	--		--	--
Irrigação*	Diesel	L/ha	6,5	2		5,83	2,3		4,83	1,5		4,83	1,5		5	1
Adubação	Diesel	L/ha	7	1		7	2		7	2		7	2		7	2
Tratos Culturais	Diesel	L/ha	--	--		--	--		--	--		--	--		--	--
Corte	Diesel	L/m³	0,49	1		0,6565	1		0,6415**	1 (Harvester)		0,6765	1 (Feller-Buncher)		0,6765	1
Corte	Diesel	L/m³	--	--		--	--		0,2689**			--	--		--	--
Extração	Diesel	L/m³	0,93	1		0,5128	1		0,6733**	1 (Forwarder)		0,4646	1 (Forwarder)		0,4646	1
Extração	Diesel	L/m³	--	--		--	--		0,4047**	1 (Clamcunk)		--	--		--	--
Processamento	Diesel	L/m³	--	--		--	--		0,4587**	1 (Garra Traçadora)		--	--		--	--
Carrregamento	Diesel	L/m³	0,32	1		0,32	--		0,32			0,32			0,32	1
Transporte Madeira ***	Diesel	km/L	1,2	1 (Trítrem)	298,04	1,35	1 (Bitrem)	74,7	1,13	1 (Bitrem)	342,76	1,11	1 (Bitrem)	159,4	1 (Truck)	159,4
Transporte Madeira	Diesel	km/L	--	--		1,94	1 (Truck)		--			1,4	1 (Truck)		1,4	1 (Truck)
Descarregamento	Diesel	L/m³	0,32	1		0,32	1		0,32	1		0,32	1		0,32	1
Transporte Diversos	Diesel	km/L	--	--		--	--		--	--		--	--		--	--

* Média entre o consumo da irrigação por trator agrícola, caminhão pipa e, ou costal (dependendo os recursos disponíveis em cada região)

** Na Região C são utilizadas duas combinações de máquinas para colheita: Harvester + Forwarder ou Feller-Buncher + Clambunk + Garra Traçadora

*** O transporte de madeira é realizado uma vez, mas há região com mais de um tipo de veículo com capacidades de carga e consumo diferentes.

Quanto aos dados referentes às áreas queimadas por incêndios acidentais não há detalhamento no banco de dados referente às idades dos plantios quando queimados. Então, a área total queimada anualmente foi dividida pelo número de anos da rotação de corte da região. Assim, é determinado que as áreas queimadas sejam distribuídas igualmente entre as idades de plantio. Sob este tamanho médio de área queimada anual por idade do plantio, atribuí-se um valor de 5% para mais e para menos, de forma a determinar um intervalo de valores de tamanho médio de área queimada anual por idade de plantio. Com este intervalo, utilizou-se um gerador de números aleatórios dentro do intervalo para obter valores de tamanho de área queimada anual por idade de plantio para realização das simulações. Isso se fez necessário uma vez que não há dados detalhados disponíveis para simulação, mas que permite exemplificar as simulações de emissões de GEE por incêndios acidentais. A Tabela 10 apresenta os intervalos de valores de tamanho médio de área queimada anual por idade de plantio utilizados na geração dos dados.

Tabela 10 - Intervalos de valores de tamanho médio de área queimada anual por idade de plantio

Tempo	Região A		Região B		Região C		Região D	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
0	75,64	81,64	78,02	86,02	41,67	48,49	45,75	52,08
1	70,00	76,00	62,49	70,49	77,19	84,01	81,27	87,60
2	57,71	63,71	52,19	60,19	49,34	56,16	53,42	59,75
3	63,00	69,00	47,45	55,45	69,53	76,35	73,61	79,94
4	64,50	70,50	58,05	66,05	71,17	77,99	75,25	81,58
5	52,00	58,00	47,25	55,25	44,45	51,27	48,53	54,86
6	143,00	149,00	107,66	115,66	79,57	86,39	83,65	89,98
7	61,00	67,00	52,38	60,38	52,16	58,98	56,24	62,57
8	32,50	38,50	23,75	31,75	36,15	42,97	40,23	46,56
9	9,50	15,50	13,45	21,45	25,20	32,02	29,28	35,61
10	76,71	82,71	57,70	65,70	51,74	58,56	55,82	62,15
11	70,57	76,57	91,99	99,99	64,31	71,13	68,39	74,72
12	53,57	59,57	105,41	113,41	64,17	70,99	68,25	74,58
13	98,43	104,43	26,13	34,13	75,31	82,13	79,39	85,72
14	90,14	96,14	104,41	112,41	29,88	36,70	33,96	40,29
15	91,29	97,29	52,13	60,13	54,60	61,42	58,68	65,01
16	10,43	16,43	13,70	21,70	32,17	38,99	36,25	42,58
17	36,57	42,57	82,84	90,84	44,02	50,84	48,10	54,43
18	138,29	144,29	25,27	33,27	76,45	83,27	80,53	86,86
19	106,43	112,43	40,41	48,41	58,17	64,99	62,25	68,58
20	114,14	120,14	97,41	105,41	70,31	77,13	74,39	80,72

(Continuação da Tabela 10)

21	71,57	77,57	21,41	29,41	38,60	45,42	42,68	49,01
22	92,29	98,29	14,13	22,13	33,17	39,99	37,25	43,58
23	128,00	134,00	65,99	73,99	74,02	80,84	78,10	84,43
24	55,14	61,14	61,41	69,41	68,74	75,56	72,82	79,15
25	76,57	82,57	58,84	66,84	28,60	35,42	32,68	39,01
26	38,57	44,57	42,13	50,13	33,02	39,84	37,10	43,43
27	111,57	117,57	64,13	72,13	29,31	36,13	33,39	39,72
28	35,71	41,71	77,70	85,70	66,60	73,42	70,68	77,01
29	122,00	128,00	48,99	56,99	31,88	38,70	35,96	42,29
30	116,00	122,00	16,27	24,27	70,31	77,13	74,39	80,72
31	13,57	19,57	20,70	28,70	44,31	51,13	48,39	54,72

As empresas florestais brasileiras adotam técnicas e recursos para prevenção e detecção de incêndios. Assim, em caso de ocorrência é rápida a detecção, localização e controle (na grande maioria dos casos, conforme relatos). Desta forma, não há queima total da biomassa da área atingida. Logo, foi necessária adaptação na formulação do sub-modelo de queima de biomassa, já que a formulação da Metodologia AR-AM 0005 prevê que ocorre queima e perda de biomassa total da área.

Outra particularidade é que, na prática, as empresas não mensuram quanto foi perdido de biomassa em cada área atingida por incêndio, mesmo não sendo queima total. Também não foram encontrados estudos sobre este tipo de mensuração, logo, não há parâmetros reais de proporção de biomassa perdida. Para efeito de simulação, a fim de verificar a eficiência do modelo desenvolvido, serão utilizados valores aleatórios 1,5 a 2% de biomassa acima do solo queimada baseados em relatos de pesquisadores da área e técnicos das empresas quanto à perda da biomassa nos incêndios.

Para o cálculo anual da queima de biomassa por incêndios, é necessária a utilização de alguns parâmetros estabelecidos pelo IPCC, disponível no Guia de Boas Práticas. A proporção de nitrogênio/carbono (N-C) é de 0,01 kgN/kg C. A proporção de emissão para N₂O de queima de biomassa (EF_{N₂O}) é de 0,007 kgCO₂e/kgC. A proporção de emissão para CH₄ de queima de biomassa (EF_{CH₄}) é de 0,012 kgCO₂e/kgC. O potencial de aquecimento global para N₂O (GWP_{N₂O}) é 310 kgCO₂/kgN₂O e para CH₄ (GWP_{CH₄}) é de 21 kgCO₂/kgCH₄. A eficiência de combustão para biomassa queimada é de 0,5.

Em relação às emissões com perda de biomassa na conversão do local para projeto de F/R, os dados utilizados são de padrão do IPCC, já que não há informações específicas das regiões. Para a variável de pico (máximo) de biomassa acima da

superfície do solo de vegetação não arbórea pré-existente (B_{wi}) é utilizado o padrão IPCC para região tropical seca no valor de 2,3t de matéria seca/ha. Para a variável razão raiz-parte aérea apropriada para a vegetação não arbórea preexistente (R_g) é utilizado o padrão IPCC para pastagens de região temperado/subtropical/tropical no valor de 1,58 (adimensional). E para a fração média de carbono de biomassa seca em vegetação não lenhosa pré-existente, o valor padrão IPCC é de 0,5. Os valores padrão utilizados estão estabelecidos no Guia de Boas Práticas do IPCC.

Quanto aos dados referentes às emissões como resultado da aplicação de nitrogênio por fertilização têm-se os seguintes parâmetros do IPCC: fração que se volatiliza como NH_3 e NO_x para fertilizantes sintéticos (FRAC Volat Sint) é de 0,01 e para fertilizantes orgânicos (FRAC Volat Org) é de 0,02 (adimensional). Ainda tem o fator de emissão (EF N) para emissões a partir de entradas de nitrogênio 0,0125 tN_2O/tN .

4.2.2. DINÂMICA DE SISTEMAS

4.2.2.1. DIAGRAMA DE LOOP CAUSAL

O Diagrama Causal é composto por dois feedbacks, sendo um de reforço positivo e um de reforço negativo. O primeiro feedback, de reforço positivo, diz que a “área de implantação de reflorestamento” influencia positivamente na “produção de floresta”, ou seja, quanto maior a área de plantio do reflorestamento, maior é o volume de floresta que será gerado. Esta produção, por sua vez, também influencia positivamente no “sequestro de CO_2 ”, que é obtido pelo incremento de biomassa das árvores anualmente. Consequentemente, o “sequestro de CO_2 ” pela floresta influencia positivamente no saldo de créditos de carbono gerados, que acarretam no aumento das “receitas da empresa florestal” por meio da venda dos créditos de carbono na forma de RCEs.

O segundo feedback, que é de reforço negativo, indica que o aumento da “produção de floresta” tem mesmo impacto nas seguintes atividades: “consumo de combustíveis fósseis”, “perda de biomassa no preparo do local”, “perda de biomassa em incêndios acidentais”, e na “aplicação de nitrogênio pela fertilização” do plantio. Todas estas atividades impactam positivamente nas “emissões de CO_2 ”, que por sua vez afetam negativamente os “créditos de carbono gerados”. Diminuindo os “créditos de

carbono gerados”, diminuem-se as “receitas da empresa florestal” e a “área de implantação de reflorestamento”.

A Figura 8 apresenta o “Diagrama de Loop Causal” das emissões de GEE ocorridas dentro dos limites geográficos do projeto de reflorestamento, sejam elas do consumo de combustíveis fósseis, perda de biomassa no preparo do local para implantação do projeto, perda de biomassa por incêndios acidentais e pela aplicação de nitrogênio pela fertilização do plantio.

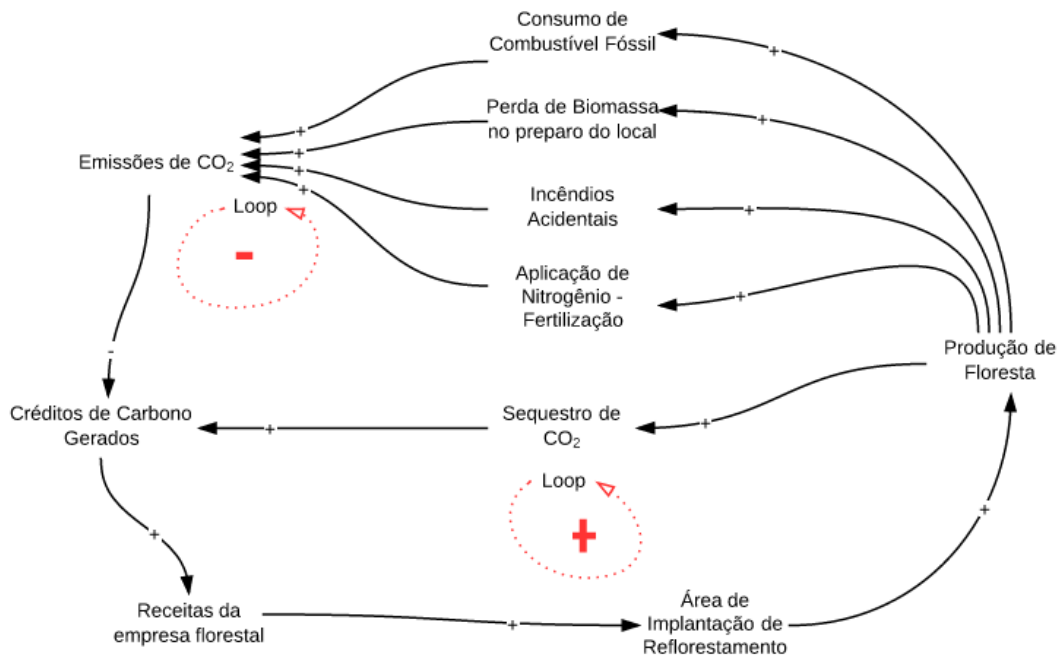


Figura 8 – Diagrama de Loop Causal do sequestro de CO₂ pelo reflorestamento e as emissões de GEE oriundas dentro dos limites geográficos do projeto.

4.2.2.2. DIAGRAMA DE FLUXO E ESTOQUES

Foi elaborado o diagrama de fluxo e estoque do modelo de cálculo das emissões de GEE oriundas dentro dos limites geográficos do projeto. O modelo, detalhado nas seções seguintes, é composto por quatro sub-modelos: queima de combustíveis fósseis, perda de biomassa no preparo do local, queima de biomassa por incêndios acidentais, e aplicação de nitrogênio por fertilização. O modelo é apresentado em partes pelas Figuras 9.1 e 9.2, representando apenas uma região, sendo necessário replicá-lo de forma a cada região possuir seu modelo com suas características incorporadas, permitindo assim a simulação simultânea de todas as regiões.

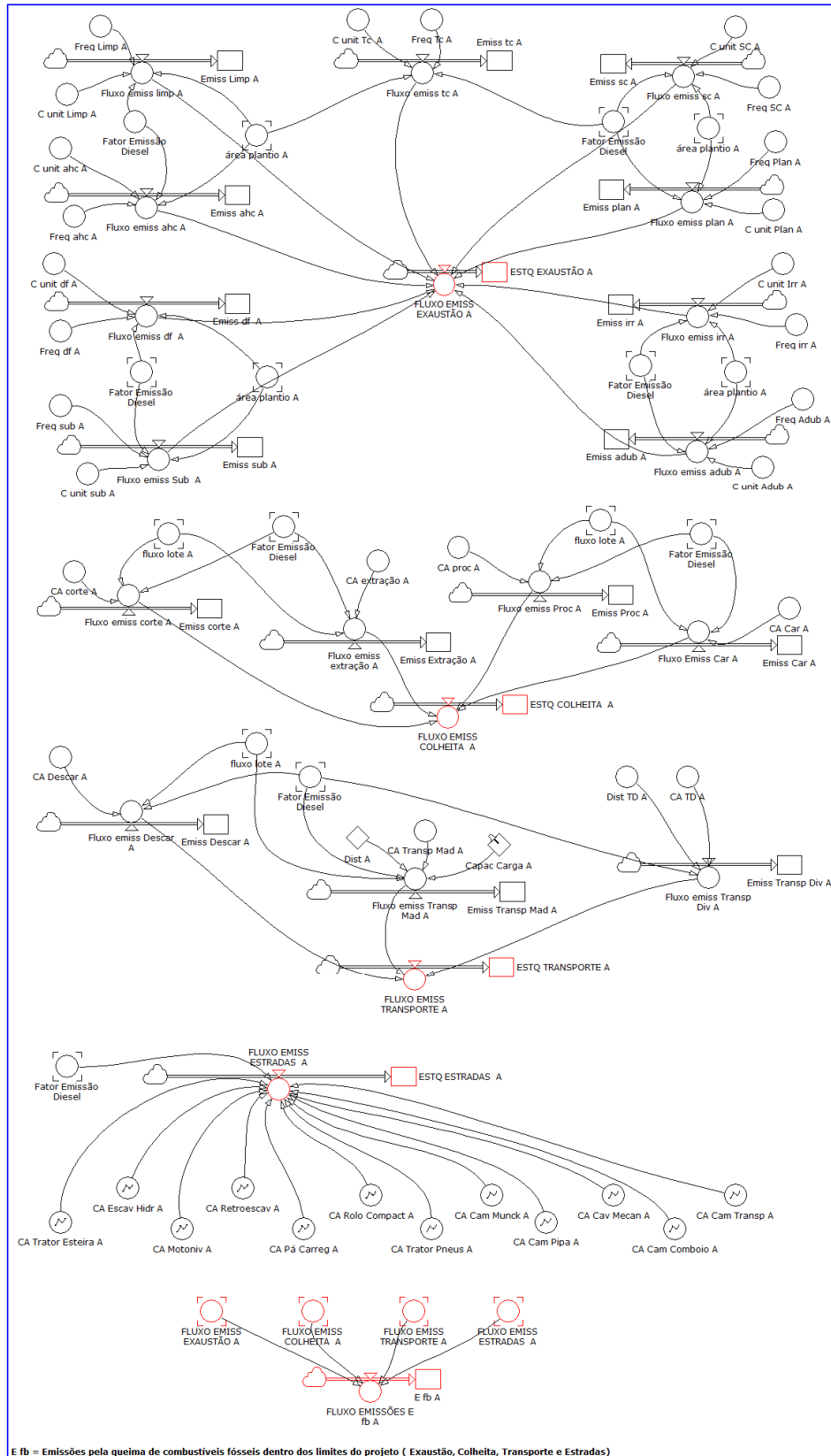


Figura 9.1 – Modelo desenvolvido de estoque das emissões de GEE ocorridas dentro do projeto: Queima de combustíveis fósseis.

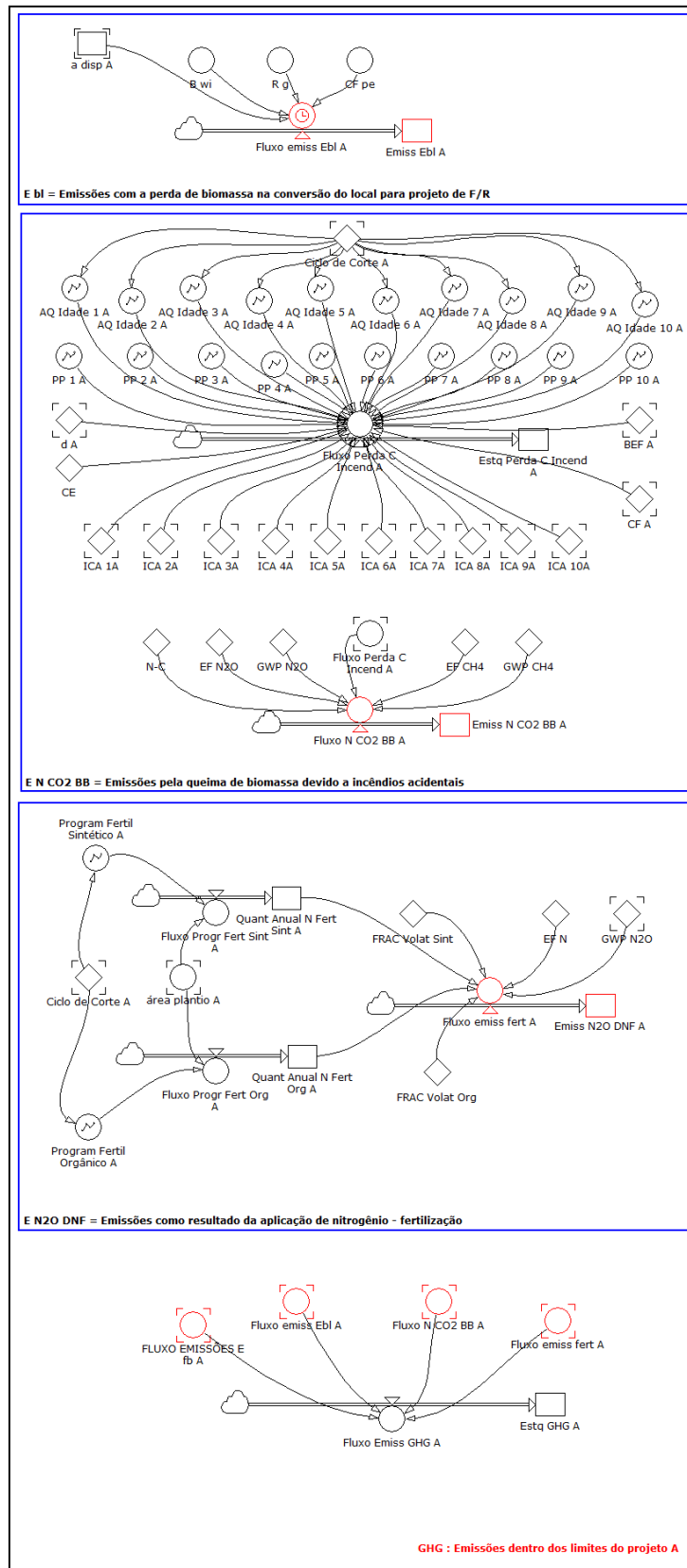


Figura 9.2 – Modelo desenvolvido de estoque das emissões de GEE ocorridas dentro do projeto: perda de biomassa, incêndios acidentais, fertilização e saldo final.

A. QUEIMA DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL

O sub-modelo corresponde ao fluxo e estoque de carbono oriundo da queima de combustíveis fósseis dentro dos limites geográficos do projeto. O combustível é utilizado para a realização das atividades de exaustão, colheita, transporte e estradas, tendo cada uma delas seu fluxo e estocagem de carbono composto pelas sub-atividades que as compõe.

A primeira parte deste sub-modelo apresenta o fluxo (“*FLUXO EMISS EXAUSTÃO A*”) e estocagem (“*ESTQ EXAUSTÃO A*”) das atividades de exaustão. Composto por nove sub-atividades, onde cada uma contabiliza o volume de queima de combustível de cada um considerando a frequência com que cada sub-atividade ocorre durante a rotação de corte, o consumo médio de combustível (l/ha), o fator de emissão do combustível usado (todas as máquinas utilizam diesel) e o tamanho da área do plantio no respectivo ano. Este tamanho de área de plantio segue a programação de plantio determinada no modelo de fluxo e estoque de floresta, madeira e carbono de biomassa. Por exemplo, o fluxo de emissão da atividade de limpeza (“*fluxo emiss limp A*”) é determinado na equação 59.

$$\begin{aligned} \text{Fluxo emiss limp } A & \qquad \qquad \qquad (59) \\ &= \text{Freq Limp } A * C \text{ unit Limp } A * \text{Fator Emissão Diesel} \\ & * \text{área plantio } A * 0,001 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>Freq Limp A</i>	Frequencia com que ocorre a atividade durante uma rotação de corte.
<i>C unit Limp A</i>	Consumo de combustível fóssil (l/ha)
<i>Fator Emissão Diesel</i>	Valor padrão IPCC: 2,83 Kg CO ₂ /l

O fluxo de queima de combustível das nove sub-atividades são somadas no fluxo (“*FLUXO EMISS EXAUSTÃO A*”) e estoque (“*ESTQ EXAUSTÃO A*”) das atividades de exaustão.

O fluxo de queima de combustível para as respectivas atividades de exaustão são: limpeza da área (“*Fluxo emiss limp A*”); aplicação de herbicida e calcário (“*Fluxo emiss ahc*”); distribuição de formicida (“*Fluxo emiss df A*”); subsolagem (“*Fluxo emiss sub A*”); sulcamento/coveamento (“*Fluxo emiss sc A*”); plantio (“*Fluxo emiss plan A*”); irrigação (“*Fluxo emiss irr A*”); adubação (“*Fluxo emiss adub A*”); e tratos culturais (“*Fluxo emiss tc A*”). O somatório destes fluxos determina o fluxo total de queima de combustível pelas atividades de exaustão (“*FLUXO EMISS EXAUSTÃO A*”). Ressalta-

se que o modelo contempla as nove atividades de exaustão comuns em reflorestamento de eucalipto, mas é possível que nem todas as atividades sejam executadas por alguma empresa. Neste caso, a frequência de ocorrência deve ser zero, não contabilizando nenhuma emissão de CO₂ por queima de combustível pela referida atividade.

A segunda parte deste sub-modelo apresenta o fluxo (“*FLUXO EMISS COLHEITA A*”) e estocagem (“*ESTQ COLHEITA A*”) das atividades de colheita. Composto por quatro sub-atividades, onde cada uma contabiliza o volume de queima de combustível de cada uma considerando o consumo médio de combustível (l/ha), o fator de emissão do combustível usado (todas as máquinas utilizam diesel) e o fluxo do lote que corresponde ao volume de madeira cortada (m³). Este fluxo do lote segue a programação de desbaste determinada no modelo de fluxo e estoque de floresta, madeira e carbono de biomassa. Por exemplo, o fluxo de emissão da atividade de corte (“*Fluxo emiss corte A*”) é determinado na equação 60.

$$\begin{aligned}
 \text{Fluxo emiss corte A} & & (60) \\
 &= CA \text{ corte A} * \text{Fator Emissão Diesel} * \text{fluxo lote A} \\
 &* 0,001
 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>CA Corte A</i>	Consumo de combustível fóssil (l/ha).
<i>Fluxo lote A</i>	Volume de madeira obtida no lote no respectivo período.
<i>Fator Emissão Diesel</i>	Valor padrão IPCC: 2,83 Kg CO ₂ /l

O fluxo de queima de combustível das quatro sub-atividades são somadas no fluxo (“*FLUXO EMISS COLHEITA A*”) e estoque (“*ESTQ COLHEITA A*”) das atividades de colheita.

O fluxo de queima de combustível para as respectivas atividades de colheita são: corte (“*Fluxo emiss corte A*”); extração (“*Fluxo emiss extração A*”); processamento (“*Fluxo emiss proc A*”); e carregamento no campo (“*Fluxo emiss car A*”). O somatório destes fluxos determina o fluxo total de queima de combustível pelas atividades de colheita (“*FLUXO EMISS COLHEITA A*”). Ressalta-se que dependendo das máquinas utilizadas para a realização das atividades, o consumo de combustível pode ser agrupado para mais de uma atividade. Por exemplo, dentre as regiões estudadas tem-se aquela que utiliza o Harvester para fazer o corte e processamento da madeira e Fowarder para fazer extração, neste caso não há contabilização do consumo de combustíveis de processamento (“*CA proc A*”), pois a mesma estará somada junto

ao consumo de combustíveis de corte (“*CA corte A*”). Como há outra região que utiliza Feller-Buncher para corte, Clambunk para extração, e Garra Traçadora para processamento, tendo cada atividade seu consumo de combustível e emissões de carbono contabilizadas separadamente.

A terceira parte deste sub-modelo apresenta o fluxo (“*FLUXO EMISS TRANSPORTE A*”) e estoque (“*ESTQ TRANSPORTE A*”) das atividades de transporte. Composto por três sub-atividades, onde cada uma contabiliza o volume de queima de combustível de forma específica. As emissões referentes ao transporte de madeira (“*Fluxo emiss Transp Mad A*”) são determinadas pelo consumo de combustível, a capacidade de carga do veículo utilizado, a distância percorrida e o fluxo do lote (volume de madeira a ser transportado), conforme equação 61.

$$\begin{aligned} \text{Fluxo emiss Transp Mad A} & \quad (61) \\ & = \left(\frac{\text{fluxo lote A}}{\text{Capac Carga A}} * \frac{\text{Dist A}}{\text{CA Transp Mad A}} \right) \\ & \quad * \text{Fator Emissão Diesel} * 0,001 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>CA Transp Mad A</i>	Consumo de combustível fóssil (l/ha).
<i>Fluxo lote A</i>	Volume de madeira obtida no lote no respectivo período.
<i>Fator Emissão Diesel</i>	Valor padrão IPCC: 2,83 Kg CO ₂ /l
<i>Dist A</i>	Distância média percorrida pelo transporte de madeira (ida e volta do veículo)
<i>Capac Carga A</i>	Capacidade de carga do veículo em m ³ .

As emissões referentes ao descarregamento de madeira no pátio (“*Fluxo emiss Descar A*”) são determinadas pelo consumo de combustível e o fluxo do lote (volume de madeira a ser descarregado), conforme equação 62.

$$\begin{aligned} \text{Fluxo emiss Descar A} & \quad (62) \\ & = \text{CA Descar A} * \text{fluxo lote A} * \text{Fator Emissão Diesel} * 0,001 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>CA Descar A</i>	Consumo de combustível fóssil (l/ha).
<i>Fluxo lote A</i>	Volume de madeira obtida no lote no respectivo período.
<i>Fator Emissão Diesel</i>	Valor padrão IPCC: 2,83 Kg CO ₂ /l

São considerados transportes diversos qualquer outro transporte realizado no projeto, como por exemplo, caminhão de apoio para manutenção de máquinas. É necessário atenção para não contabilizar repetidamente transportes em *Transportes*

Diversos (Queima de Combustível dentro do projeto) e em *Fugas* (que serão tratadas à frente). Suas emissões (“*Fluxo emiss Transp Div A*”) são determinadas pelo consumo de combustível e a distância percorrida, conforme equação 63.

$$\begin{aligned} \text{Fluxo emiss Transp Div A} & \quad (63) \\ & = CA TD A * Dist TD A * Fator Emissão Diesel * 0,001 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>CA TD A</i>	Consumo de combustível fóssil (l/ha).
<i>Dist TD A</i>	Distância percorrida anualmente.
<i>Fator Emissão Diesel</i>	Valor padrão IPCC: 2,83 Kg CO ₂ /l

A quarta parte deste sub-modelo apresenta o fluxo (“*FLUXO EMISS ESTRADAS A*”) e estocagem (“*ESTQ ESTRADAS A*”) das atividades de implantação e manutenção de estradas. A realização desta atividade tem característica diferente das demais, porque são utilizadas diversas máquinas sendo que cada uma realiza mais de uma função. Assim, o cálculo do fluxo e estoque de emissões de carbono pela atividade de estradas é determinado pelo somatório do consumo anual de combustível por cada máquina, independente do trabalho executado pelas mesmas, conforme equação 64.

$$\begin{aligned} \text{FLUXO EMISS ESTRADAS A} & \quad (64) \\ & = (CA Trator Esteira A + CA Escav Hidr A \\ & + CA Motoniv A + CA Retroescav A + CA Pá Carreg A \\ & + CA Rolo Compact A + CA Trator Pneus A \\ & + CA Cam Munck A + CA Cam Pipa A + CA Cav Mec A \\ & + CA Cam Comboio A + CA Cam Transp A) \\ & * Fator Emissão Diesel * 0,001 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>CA Trator Esteira A</i>	Consumo de combustível fóssil pelo Trator de Esteira (l/ano).
<i>CA Escav Hidr A</i>	Consumo de combustível fóssil pela Escavadeira Hidráulica (l/ano).
<i>CA Motoniv A</i>	Consumo de combustível fóssil pela Motoniveladora (l/ano).
<i>CA Retroescav A</i>	Consumo de combustível fóssil pela Retroescavadeira (l/ano).
<i>CA Pá Carreg A</i>	Consumo de combustível fóssil pela Pá Carregadeira (l/ano).
<i>CA Rolo Compact A</i>	Consumo de combustível fóssil pelo Rolo Compactador (l/ano).
<i>CA Trator Pneus A</i>	Consumo de combustível fóssil pelo Trator de Pneus (l/ano).
<i>CA Cam Munck A</i>	Consumo de combustível fóssil pelo Caminhão Munck (l/ano).
<i>CA Cam Pipa A</i>	Consumo de combustível fóssil pelo Caminhão Pipa (l/ano).
<i>CA Cav Mec A</i>	Consumo de combustível fóssil pelo Cavalo Mecânico (l/ano).
<i>CA Cam Comboio A</i>	Consumo de combustível fóssil pelo Caminhão Comboio (l/ano).
<i>CA Cam Transp A</i>	Consumo de combustível fóssil pelo Caminhão de Transporte (l/ano).
<i>Fator Emissão Diesel</i>	Valor padrão IPCC: 2,83 Kg CO ₂ /l

O sub-modelo de fluxo (“*FLUXO EMISS Efb A*”) e estoque (“*Efb A*”) de carbono oriundo da queima de combustíveis fósseis dentro dos limites geográficos do projeto é o somatório das quatro partes apresentadas acima que correspondem ao combustível utilizado para a realização das atividades de exaustão, colheita, transporte e estradas, pela equação 65.

$$\begin{aligned}
 \text{FLUXO EMISS } Efb A & & (65) \\
 &= \text{FLUXO EMISS EXAUSTÃO } A \\
 &+ \text{FLUXO EMISS COLHEITA } A \\
 &+ \text{FLUXO EMISS TRANSPORTE } A \\
 &+ \text{FLUXO EMISS ESTRADAS } A
 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>FLUXO EMISS EXAUSTÃO A</i>	Consumo de combustível fóssil anual pelas atividades de exaustão.
<i>FLUXO EMISS COLHEITA A</i>	Consumo de combustível fóssil anual pelas atividades de colheita.
<i>FLUXO EMISS TRANSPORTE A</i>	Consumo de combustível fóssil anual pelas atividades de transporte.
<i>FLUXO EMISS ESTRADAS A</i>	Consumo de combustível fóssil anual pelas atividades de estradas.

B. PERDA DE BIOMASSA NA ÁREA DO PROJETO

Neste sub-modelo são contabilizadas as emissões (“*Fluxo emiss E bl A*”) e estoque (“*Emiss Ebl A*”) de carbono a partir de perda de biomassa da vegetação pré-existente na preparação do local e conversão de pastagens em áreas de F/R, conforme equação 66. Estas emissões são contabilizadas somente no primeiro ano do projeto e em toda a área que será implementado o reflorestamento. Seu cálculo é baseado no tamanho da área do projeto, o pico de biomassa acima do solo não arbórea pré-existente, a razão raiz/parte aérea desta vegetação e sua fração de carbono de biomassa seca.

$$\begin{aligned}
 \text{Fluxo emiss } Ebl A &= IF(\text{TIME} & (66) \\
 &= 0; \left('a \text{ disp } A' * 'Bwi' * (1+'Rg') * CFpe' * \frac{44}{12} \right); 0)
 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>IF(TIME=0; ;0)</i>	Se o tempo de simulação for zero, tem emissão de perda de biomassa que será calculada; senão é zero para os demais anos.
<i>a disp A</i>	Tamanho total da área disponível para o projeto.
<i>B wi</i>	Pico (máximo) de biomassa viva acima do solo de vegetação não arbórea pré-existente.
<i>R g</i>	Razão raiz/parte aérea da vegetação não arbórea pré-existente.
<i>CF PE</i>	Fração de carbono de biomassa seca da vegetação não arbórea pré-existente.

Para efeito de simulação, em função da ausência de dados das regiões estudadas, será adotada a mesma premissa conservadora que a Plantar S/A adotou em seu projeto, de que todo estrato de linha de base é conservadoramente identificado como pastagem em seu pico e estado estável. Assim, não haverá emissão por perda de biomassa na área do projeto.

C. QUEIMA DE BIOMASSA — INCÊNDIOS ACIDENTAIS

As empresas florestais brasileiras adotam técnicas e recursos para prevenção e detecção de incêndios. Assim, em caso de ocorrência é rápida a detecção, localização e controle (na grande maioria dos casos, conforme relatos). Desta forma, não há queima total da biomassa da área atingida. Logo, foi necessária adaptação na formulação do modelo do sub-modelo de queima de biomassa, já que a formulação da Metodologia AR-AM 0005 prevê que ocorre queima e perda de biomassa total da área.

Outra particularidade é que, na prática, as empresas não mensuram quanto foi perdido de biomassa em cada área atingida por incêndio, mesmo não sendo queima total. Também não foram encontrados estudos sobre este tipo de mensuração, logo, não há parâmetros reais de proporção de biomassa perdida. Para efeito de simulação, a fim de verificar a eficiência do modelo desenvolvido, serão utilizados valores aleatórios 1,5 a 2% de biomassa acima do solo queimada baseados em relatos de pesquisadores da área e técnicos das empresas. Então, é necessário o cálculo do fluxo anual de perda de carbono da biomassa acima do solo em incêndios (“*Fluxo Perda C Incend A*”) em função de cada área queimada e seu volume de biomassa, pela equação 67.

$$\text{Fluxo Perda C Incend A} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} &= \text{SUM}('AQ \text{ idade } 1A' * 'PP 1 A' \\ &* (ICA 1A); 'AQ \text{ idade } 2A' * 'PP 2 A' \\ &* (ICA 1A + ICA 2A); \dots \dots \dots; 'AQ \text{ idade } 10A' * 'PP 10 A' \\ &* (ICA 1A + ICA 2A + ICA 3A + \dots \dots + ICA 10A) \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>AQ idade 1A até 10A</i>	Tamanho da área queimada por incêndio durante do projeto em função da idade do plantio.
<i>PP 1 A até 10A</i>	Proporção de biomassa queimada – valor aleatório entre 1,5 e 2%.
<i>ICAI A até 10A</i>	Incremento corrente anual – o somatório leva ao volume.

O fluxo (“*Fluxo N CO2 BB A*”) e estoque (“*Emiss N CO2 BB A*”) das emissões não-CO₂ oriundas de incêndios acidentais só podem ser calculadas após sua ocorrência devido à impossibilidade de previsão dos incêndios, mas efeito de simulação do modelo será realizado baseado nas premissas apresentadas. O cálculo do fluxo dessas emissões é determinado pela equação 68.

$$\begin{aligned}
 \text{Fluxo N CO2 BB A} & & (68) \\
 &= ('Fluxo Perda C Incend A' * 'N - C' * 'EF N2O' \\
 & * 'GWP N2O' * \frac{44}{28}) + ('Fluxo Perda C Incend A' * 'EF CH4' \\
 & * 'GWP CH4' * \frac{16}{12})
 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo Perda C Incend A</i>	Fluxo anual de perda de carbono da biomassa acima do solo em incêndios.
<i>N-C</i>	Proporção nitrogênio/carbono (Padrão IPCC: 0,01KgN/Kg C).
<i>EF N2O</i>	Proporção de emissão de N ₂ O de queima de biomassa (Padrão IPCC: 0,007).
<i>GWP N2O</i>	Potencial de aquecimento global para N ₂ O (Padrão IPCC: 310 KgCO ₂ /KgN ₂ O).
<i>EF CH4</i>	Proporção de emissão de CH ₄ de queima de biomassa (Padrão IPCC: 0,012).
<i>GWP CH4</i>	Potencial de aquecimento global para N ₂ O (Padrão IPCC: 21 KgCO ₂ /KgN ₂ O).
<i>44/28</i>	Proporção dos pesos moleculares de N ₂ O e nitrogênio, adimensional.
<i>16/22</i>	Proporção dos pesos moleculares de CH ₄ e nitrogênio, adimensional.

D. APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO - FERTILIZAÇÃO

O fluxo (“*Fluxo emiss fert A*”) e estoque (“*Emiss N2O DNF A*”) das emissões diretas de N₂O como resultado de aplicação de nitrogênio como fertilização, normalmente ocorre até os três primeiros anos da rotação de corte em duas ou três aplicações. Além disto, pode ser utilizado fertilizante sintético ou orgânico. Assim, para determinar o fluxo das emissões pelo uso de fertilizantes é preciso determinar o(s) tipo(s) que serão usados, as dosagens e número de aplicações. O modelo permite que sejam utilizados os dois tipos simultaneamente ou não, em função da programação de fertilização. Esta programação, seja de fertilizante sintético (“*Program Fertil Sintético A*”) ou orgânico (“*Program Fertil Orgânico A*”), determina as dosagens que serão aplicadas a cada ano durante a rotação de corte, conforme equação 69 que determina as dosagens da Região A. O fertilizante consumido nas regiões estudadas é o NPK (sintético), com 4% de nitrogênio em sua composição e aplicado nos anos 1 e 2 dos

ciclos de corte. Contudo, o modelo permite que as dosagens sejam diferentes entre os anos.

A região A consome 450kg/ha de fertilizantes, sendo 18kg/ha de nitrogênio por aplicação e duas aplicações durante a rotação de corte (ano 1 e 2). A região B consome 300kg/ha de fertilizantes, sendo 12kg/ha de nitrogênio por aplicação e duas aplicações durante a rotação de corte (ano 1 e 2). E as regiões C e D consome 400kg/ha de fertilizantes, sendo 16kg/ha de nitrogênio por aplicação e duas aplicações durante a rotação de corte (ano 1 e 2) cada uma.

$$\begin{aligned}
 \text{Program Fertil Sint/OrgA} &= \text{IF('Ciclo de Corte A')} & (69) \\
 &= 5; (\text{GRAPH}(\text{TIME}; \text{STARTTIME}; \text{TIMESTEP}; \{0,018; 0,018; 0; 0; 0; 0/ \\
 & \text{/Min: 0; Max: 0.01//}\})); \text{IF('Ciclo de Corte A')} \\
 &= 6; (\text{GRAPH}(\text{TIME}; \text{STARTTIME}; \text{TIMESTEP}; \{0,018; 0,018; 0; 0; 0; 0/ \\
 & \text{/Min: 0; Max: 0.01//}\})); \text{IF('Ciclo de Corte A')} \\
 &= 7; (\text{GRAPH}(\text{TIME}; \text{STARTTIME}; \text{TIMESTEP}; \{0,018; 0,018; 0; 0; 0; 0; 0/ \\
 & \text{/Min: 0; Max: 0.01//}\})); \text{IF('Ciclo de Corte A')} \\
 &= 8; (\text{GRAPH}(\text{TIME}; \text{STARTTIME}; \text{TIMESTEP}; \{0,018; 0,018; 0; 0; 0; 0; 0; 0/ \\
 & \text{/Min: 0; Max: 0.01//}\})); \text{IF('Ciclo de Corte A')} \\
 &= 9; (\text{GRAPH}(\text{TIME}; \text{STARTTIME}; \text{TIMESTEP}; \{0,018; 0,018; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0/ \\
 & \text{/Min: 0; Max: 0.01//}\})); \text{IF('Ciclo de Corte A')} \\
 &= 10; (\text{GRAPH}(\text{TIME}; \text{STARTTIME}; \text{TIMESTEP}; \{0,018; 0,018; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0/ \\
 & \text{/Min: 0; Max: 0.01//}\})); 0))))))
 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

If(ciclo de corte A = x; Se a rotação de corte for igual a x anos, então utilizará a programação de dosagens (em toneladas) anuais de nitrogênio determinadas no gráfico, senão é zero.

Ciclo de corte Duração da rotação de corte, ou seja, após quantos anos serão cortadas as árvores.

O consumo de fertilizante por rotação de corte é determinado pelo fluxo de programação de fertilização (sintética e orgânica), conforme equação 70.

$$\begin{aligned}
 \text{Fluxo Program Fert Sint ou Org A} &= & (70) \\
 & \text{'Program Fertil Sintético ou Orgânico A' * 'área plantio A'}
 \end{aligned}$$

A equação 71 apresenta o cálculo do fluxo das emissões de N₂O como resultado de aplicação de nitrogênio como fertilizante (“*Fluxo emiss fert A*”).

$$\begin{aligned}
 \text{Fluxo emiss fert A} & \quad (71) \\
 & = (((\text{Fluxo Progr Fert Sint A}' * (1 - \text{FRAC Volat Sint}')) \\
 & + (\text{Fluxo Progr Fert Org A}' * (1 - \text{FRAC Volat Org}')) \\
 & * \text{EF N}' * (44/28) * \text{GWP N2O}')
 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo Program Fert Sint A</i>	Fluxo do consumo de fertilizantes sintético por área de plantio.
<i>Fluxo Program Fert Org A</i>	Fluxo do consumo de fertilizantes orgânico por área de plantio.
<i>FRAC Volat Sint</i>	Fração de volatilização de fertilizantes sintéticos (Padrão IPCC: 0,01).
<i>FRAC Volat Org</i>	Fração de volatilização de fertilizantes orgânicos (Padrão IPCC: 0,02).
<i>EF N</i>	Fator de emissão para emissões a partir de entradas de N (Padrão IPCC: 0,0125t N ₂ O/t N).

E. SALDO DAS EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO

Por fim, é apurado o estoque (“*Estq GHG A*”) acumulado das emissões de GEE ocorridas dentro dos limites geográficos do projeto através da soma dos fluxos anuais de emissões de GEE (“*Fluxo emiss GHG A*”), com segue a equação 72.

$$\begin{aligned}
 \text{Fluxo emiss GHG A} & \quad (72) \\
 & = \text{FLUXO EMISSÕES Efb A} + \text{Fluxo emiss Ebl A} \\
 & + \text{Fluxo N CO2 BB A} + \text{Fluxo emiss fert A}
 \end{aligned}$$

4.3. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DA LINHA DE BASE

4.3.1. FONTES DE DADOS

A manutenção das pastagens não manejadas ou manejadas extensivamente ocorre na ausência de fontes de sementes dentro do limite do projeto ou devido a práticas de uso da terra que impedem a regeneração de florestas. As variações de estoques na biomassa viva ocorrem principalmente nos primeiros 15-20 anos de pastagens. Após este período, a biomassa de pastagens tende a atingir um estado de

equilíbrio com mudanças esperadas limitado no futuro próximo, a menos que as pastagens estejam sujeitas a novas mudanças no seu manejo. A empresa Plantar S/A adotou essa postura conservadora, após análise da elegibilidade da terra, considerando a linha de base como pastagens em estado estacionário de pico, que não há mais alteração nos estoques de biomassa de pastagens.

As empresas que contribuíram com dados para as simulações de remoções líquidas de GEE por projetos de reflorestamento não possuem um projeto de MDL Florestal. Logo não há dados para simulação das remoções líquidas de GEE da linha de base. Desta forma, para que seja possível executar as simulações, será tomada a mesma postura conservadora adotada pela empresa Plantar S/A, que não há remoções líquidas de GEE por linha de base por ser pastagens no pico máximo de biomassa. No entanto, o modelo contempla o cálculo para possíveis remoções de GEE por linha de base quando pastagens, pastagens com árvores isoladas e florestamento/reflorestamento pré-existente.

4.3.2. DINÂMICA DE SISTEMAS

4.3.2.1. DIAGRAMA DE LOOP CAUSAL

A Figura 10 apresenta o Diagrama de Loop Causal das remoções líquidas de GEE da linha de base, sejam elas por pastagens, pastagens com árvores isoladas, e, ou, florestamento/reflorestamento.

O Diagrama Causal é composto por um feedback de reforço negativo. O aumento da “área de reflorestamento do projeto” influencia positivamente nas “remoções de linha de base”, ou seja, quanto maior a área de plantio do reflorestamento, maior é a remoção da vegetação da linha de base: pastagens, árvores isoladas ou florestamento/reflorestamento pré-existente. Esta remoção, por sua vez, também influencia positivamente nas “emissões de CO₂”, por meio da não remoção de CO₂ pela vegetação pré-existente. Consequentemente, as “emissões de CO₂”, pela ausência de remoção pela linha de base, atuam negativamente no saldo de “créditos de carbono gerados”. Ocorrendo redução nos créditos gerados, tende a ter redução da “área de reflorestamento”, devido à menor atratividade financeira do projeto.

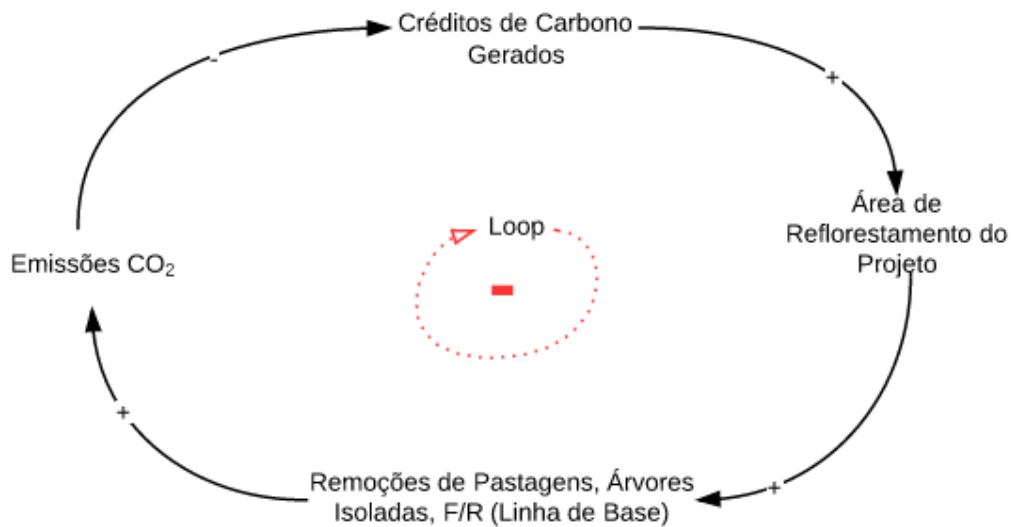


Figura 10 - Diagrama de Loop Causal das remoções de GEE pela linha de base

4.3.2.2. DIAGRAMA DE FLUXO E ESTOQUES

Foi elaborado o diagrama de fluxo e estoque do modelo de cálculo das remoções líquidas de GEE da linha de base do projeto. O modelo é apresentado em partes pela Figura 11, representando apenas uma região, sendo necessário replicá-lo de forma a cada região possuir seu modelo com suas características incorporadas, permitindo assim a simulação simultânea de todas as regiões.

Se mais de uma categoria de terra está prevista no cenário de referência, é necessário estratificar as terras sob a linha de base de acordo com o uso da terra provável ou combinações de terras usadas na linha de base. A metodologia de referência deste trabalho (AR-AM0005) prevê duas categorias de usos do solo no cenário de referência: manutenção das pastagens no seu estado atual; e o florestamento/reflorestamento (F/R) implementadas a uma taxa de pré-projeto especificada ou uma combinação de ambos.

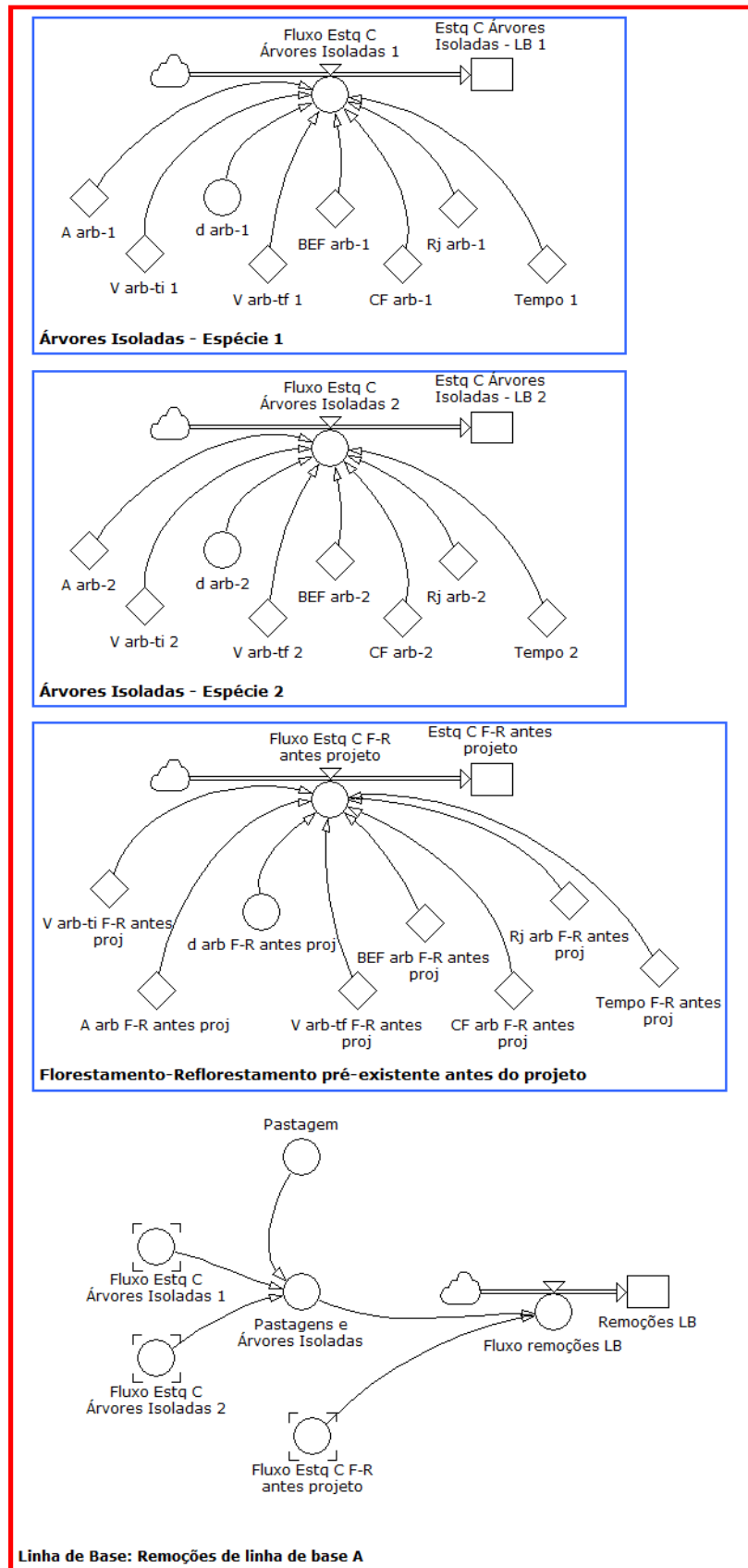


Figura 11 – Modelo desenvolvido de estoque das remoções de GEE de linha de base.

A. MANUTENÇÃO DE PASTAGENS EM SEU ESTADO - PASTAGENS E ÁRVORES ISOLADAS

De acordo com o cenário de linha de base, *manutenção de pastagens em seu estado* da Metodologia AR-AM0005, os reservatórios de carbono contabilizados são consideradas em estado estacionário. Assim, a soma das alterações do carbono da biomassa viva na pastagem, para qualquer ano t , é considerada como sendo de zero, pela equação 73.

$$\Delta C_{GLB,t} = 0 \quad (73)$$

Nesta formulação:

$\Delta C_{GLB,t}$	Somatório das mudanças dos estoques de biomassa viva de pastagens (acima e abaixo do solo) sob o cenário de linha de base.
--------------------	--

Para as áreas com árvores isoladas, as mudanças nos estoques de carbono da biomassa viva de árvores isoladas (“*Fluxo Estq C Árvores Isoladas*”) devem ser estimadas e as remoções líquidas de GEE da linha de base por sumidouros são representadas pelas equações 74 a 77.

$$\text{Fluxo Estq C Árvores Isoladas} = \frac{C_{ARB,tf} - C_{ARB,ti}}{T} * \frac{44}{12} \quad (74)$$

Onde:

$$C_{ARB} = C_{ARB-AB} + C_{ARB-BB} \quad (75)$$

$$C_{ARB-AB} = A_{ARB} * V_{ARB} * d_{ARB} * BEF_{ARB} * CF_{ARB} \quad (76)$$

$$C_{ARB-BB} = C_{ARB-AB} * R_{j_{ARB}} \quad (77)$$

Nesta formulação:

$C_{ARB,t}$	Estoque de carbono de biomassa viva de árvores isoladas calculado no tempo final.
$C_{ARB,ti}$	Estoque de carbono de biomassa viva de árvores isoladas calculado no tempo inicial.
T	Número de anos entre o tempo final e inicial.
C_{ARB-AB}	Estoque de carbono na biomassa acima do solo de árvores isoladas.
C_{ARB-BB}	Estoque de carbono na biomassa abaixo do solo de árvores isoladas.
A_{ARB}	Área sob cenário de linha de base com árvores isoladas.
V_{ARB}	Volume comercial médio de madeira das árvores isoladas.
d_{ARB}	Densidade básica da madeira das árvores isoladas.
BEF_{ARB}	Fator de expansão de biomassa.
CF_{ARB}	Fração de carbono de matéria seca das espécies de árvores isoladas.
$R_{j_{ARB}}$	Razão raiz/parte aérea das espécies de árvores isoladas.

$$\text{Pastagens e \u00c1rvores Isoladas} \quad (78)$$

$$= \Delta C_{GLB,t} + \text{'Fluxo Estq C F - R antes projeto'}$$

Nesta formula\u00e7\u00e3o:

<i>Pastagens e \u00c1rvores Isoladas</i>	Remo\u00e7\u00f5es l\u00edquidas de linha de base.
$\Delta GLB,t$	Remo\u00e7\u00f5es l\u00edquidas de pastagens.
<i>Fluxo Estq C F-R antes projeto</i>	Remo\u00e7\u00f5es l\u00edquidas de F-R implementado antes do projeto.

O modelo contempla o c\u00e1lculo do fluxo de carbono de \u00e1rvores isoladas para duas esp\u00e9cies, quando houver mais esp\u00e9cies \u00e9 necess\u00e1rio replicar o fluxo quantas vezes forem necess\u00e1rias. Como n\u00e3o h\u00e1 dados reais e nem premissas cient\u00edficas com dados que possam ser utilizados, s\u00e3o consideradas ausentes \u00e1rvores isoladas em manuten\u00e7\u00e3o de pastagens.

B. F/R IMPLEMENTADO DURANTE O PER\u00cdODO DE PR\u00c9-PROJETO

As mudan\u00e7as no estoque de carbono na biomassa viva esperada da taxa anual de atividades de F/R realizadas durante o pr\u00e9-projeto, que est\u00e1 previsto para ocorrer no futuro, deve ser inclu\u00edda como parte da linha de base e congelada para o per\u00edodo de obten\u00e7\u00e3o de cr\u00e9ditos. Devem ser contabilizadas as mudan\u00e7as separadamente por quantas esp\u00e9cies estiverem implementadas e, posteriormente, som\u00e1-las. O c\u00e1lculo da linha de base de F/R implementado durante o per\u00edodo de pr\u00e9-projeto, definido como as mudan\u00e7as dos estoques de biomassa viva de \u00e1rvores isoladas, segue a equa\u00e7\u00e3o 79 a 82.

$$\text{Fluxo Estq C F - R antes projeto} = \frac{C_{ARB-F-R,tf} - C_{ARB-F-R,ti}}{T_{F-R}} * \frac{44}{12} \quad (79)$$

$$C_{ARB-F-R \text{ antes projeto}} = C_{ARB-AB-F-R \text{ antes projeto}} + C_{ARB-BB-F-R-antes \text{ projeto}} \quad (80)$$

$$C_{ARB-AB-F-R \text{ antes projeto}} = A_{ARB-F-R} * V_{ARB-F-R} * d_{ARB-F-R} * BEF_{ARB-F-R} * CF_{ARB-F-R} \quad (81)$$

$$C_{ARB-BB-F-R \text{ antes projeto}} = C_{ARB-AB-F-R} * R_{j_{ARB-F-R}} \quad (82)$$

Nesta formulação:

$C_{ARB-F-R,tf}$	Estoque de carbono de biomassa viva de árvores isoladas calculado no tempo final.
$C_{ARB-F-R,ti}$	Estoque de carbono de biomassa viva de árvores isoladas calculado no tempo inicial.
T_{F-R}	Número de anos entre o tempo final e inicial.
$C_{ARB-AB-F-R}$	Estoque de carbono na biomassa acima do solo de árvores isoladas.
$C_{ARB-BB-F-R}$	Estoque de carbono na biomassa abaixo do solo de árvores isoladas.
$A_{ARB-F-R}$	Área sob o cenário de linha de base com árvores isoladas.
$V_{ARB-F-R}$	Volume comercial médio de madeira das árvores isoladas.
$d_{ARB-F-R}$	Densidade básica da madeira das árvores isoladas.
$BEF_{ARB-F-R}$	Fator de expansão de biomassa.
$CF_{ARB-F-R}$	Fração de carbono de matéria seca das espécies de árvores isoladas.
Rj_{ARB}	Razão raiz/parte aérea das espécies de árvores isoladas.

C. SALDO DAS REMOÇÕES DE GEE DE LINHA DE BASE

As remoções líquidas de GEE da linha de base por sumidouros na linha de base de manutenção de pastagens em seu estado, e as atividades de F/R de pré-projeto que possam ocorrer durante o período de crédito são representados da seguinte forma, conforme equação 83 abaixo.

$$\begin{aligned} \text{Fluxo remoções LB} = & \text{'Pastagens Árvores Isoladas'} & (83) \\ & + \text{'Fluxo EstqC F - R antes projeto'} \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo remoções LB</i>	Estoque de carbono de biomassa viva de árvores isoladas calculado no tempo final.
<i>Pastagens Árvores Isoladas</i>	Estoque de carbono de biomassa viva de árvores isoladas calculado no tempo inicial.
T_{F-R}	Número de anos entre o tempo final e inicial.
$C_{ARB-AB-F-R}$	Estoque de carbono na biomassa acima do solo de árvores isoladas.
$C_{ARB-BB-F-R}$	Estoque de carbono na biomassa abaixo do solo de árvores isoladas.
$A_{ARB-F-R}$	Área sob o cenário de linha de base com árvores isoladas.
$V_{ARB-F-R}$	Volume comercial médio de madeira das árvores isoladas.
$d_{ARB-F-R}$	Densidade básica da madeira das árvores isoladas.
$BEF_{ARB-F-R}$	Fator de expansão de biomassa.
$CF_{ARB-F-R}$	Fração de carbono de matéria seca das espécies de árvores isoladas.
Rj_{ARB}	Razão raiz/parte aérea das espécies de árvores isoladas.

4.4. EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS FORA DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO - FUGAS

4.4.1. FONTE DE DADOS

Os dados referentes aos cálculos das emissões de GEE por fugas foram obtidos em bancos de dados existentes na empresa. Os valores são médios entre as regiões e fornecidos pelo sistema interno, por esta razão, foram utilizados igualmente para todas as quatro regiões.

Para o transporte de mudas, o veículo utilizado tem capacidade de 80.000 unidades. A quilometragem média percorrida é de 120 km, com um consumo médio de 0,33 l/km. Foi assumido um plantio de 1111 mudas por hectare.

No transporte de fertilizantes, a capacidade do veículo considerada foi de 25 toneladas de fertilizantes, mas somente 4% é nitrogênio devido à formulação usada de NPK. Logo, a capacidade de carga de nitrogênio foi de 1 tonelada. A distância média percorrida da produção/ponto de venda ao consumo foi de 800 km e o consumo médio é de 0,23l/km.

Para cálculo das emissões por transporte de madeira colhida fora dos limites geográficos do projeto, não há dados parâmetros para simulação.

No transporte de mão de obra, foram consideradas 2.160 viagens de ônibus por ano, a uma distância média percorrida por viagem de 68,2km e um consumo médio de 0,25l/km. Os transportes de mudas, fertilizantes, madeira colhida fora e mão de obra utilizam veículos a diesel, tendo este como fator de emissão definido pelo IPCC de 2,83Kg CO₂/l.

Quanto ao transporte para realização de inspeção e monitoramento do campo é necessário um veículo que circula anualmente 5.480 km com um consumo médio de 0,1 l/km. Este veículo é a gasolina e fator de emissão definido pelo IPCC de 2,33Kg CO₂/l.

4.4.2. DINÂMICA DE SISTEMAS

4.4.2.1. DIAGRAMA DE LOOP CAUSAL

A Figura 12 apresenta o Diagrama de Loop Causal das emissões de GEE ocorridas fora dos limites geográficos do projeto, sejam elas por pastagens, pastagens com árvores isoladas, e, ou, florestamento/reflorestamento.

O Diagrama Causal é composto por dois feedbacks de reforço negativo. O aumento da “área de reflorestamento do projeto” influencia positivamente na ocorrência das fugas, ou seja, pela “queima de combustíveis fósseis” e, ou, “deslocamento de atividades econômicas”. Essas fugas, por sua vez, também influenciam positivamente

nas “emissões de CO₂”. Conseqüentemente, essas “emissões de CO₂” pelas fugas negativamente no saldo de “créditos de carbono gerados”. Ocorrendo redução nos créditos gerados, tende a ter redução da “área de reflorestamento”, devido à menor atratividade financeira do projeto.

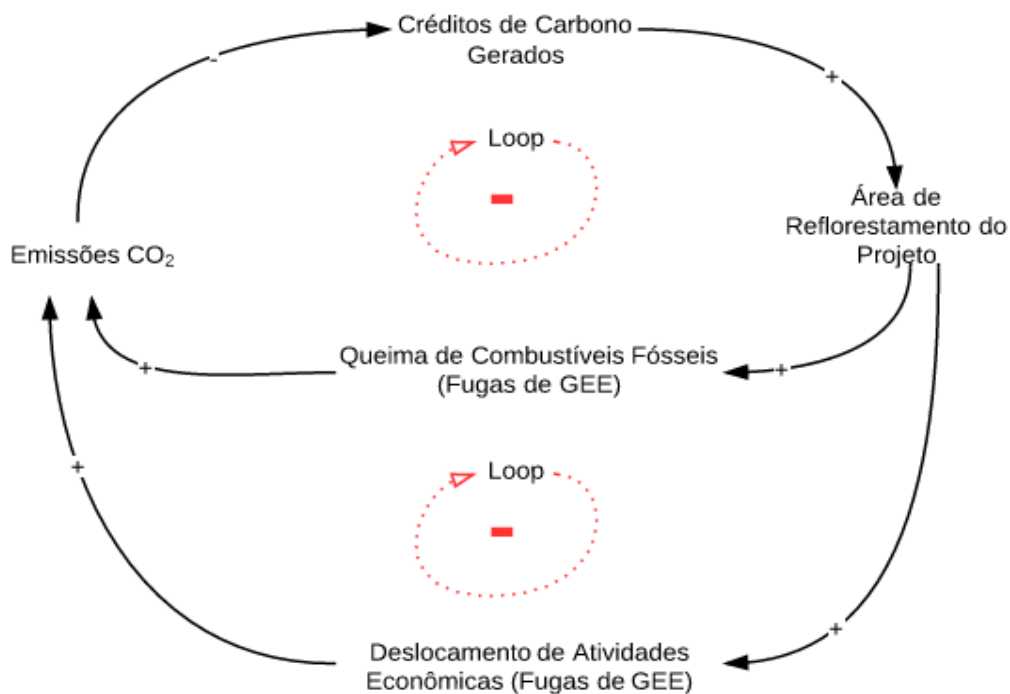


Figura 12 - Diagrama de Loop Causal das emissões de GEE ocorridas fora dos limites geográficos do projeto - Fugas

4.4.2.2. DIAGRAMA DE FLUXO E ESTOQUES

Foi elaborado o diagrama de fluxo e estoque do modelo de cálculo das emissões de GEE ocorridas fora dos limites geográficos do projeto. O modelo, detalhado nas seções seguintes, é composto por dois sub-modelos: queima de combustíveis fósseis, e deslocamento de atividade econômica. O modelo é apresentado em partes pelas Figuras 13.1 e 13.2, representando apenas uma região, sendo necessário replicá-lo de forma a cada região possuir seu modelo com suas características incorporadas, permitindo assim a simulação simultânea de todas as regiões.

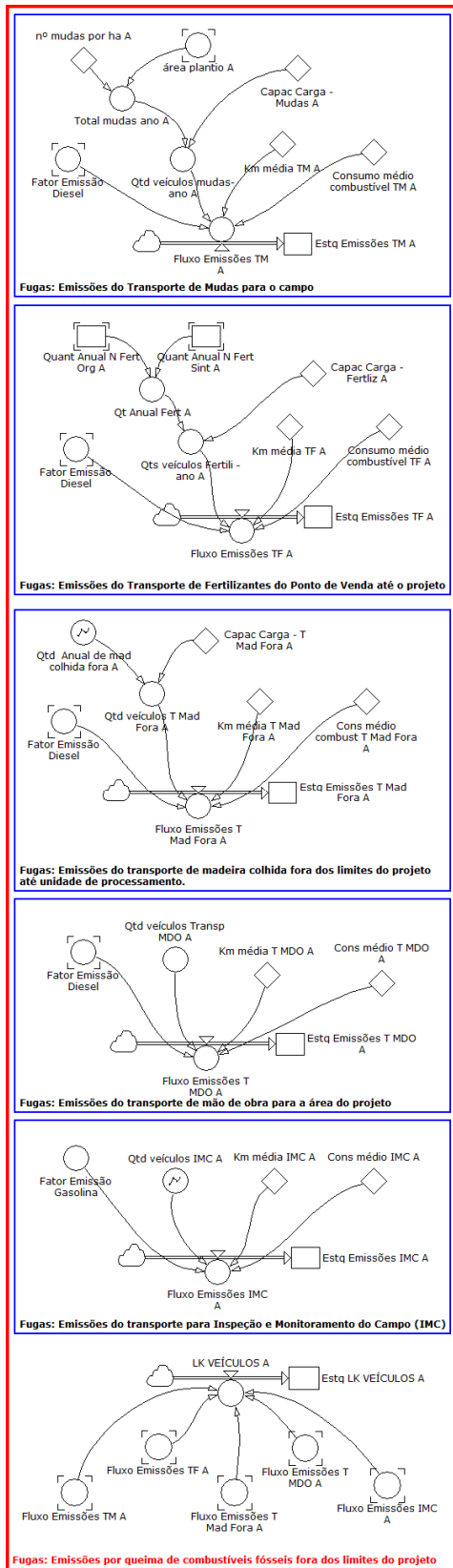


Figura 13.1 – Modelo desenvolvido de estoque das emissões de GEE ocorridas fora do projeto: queima de combustíveis fósseis.

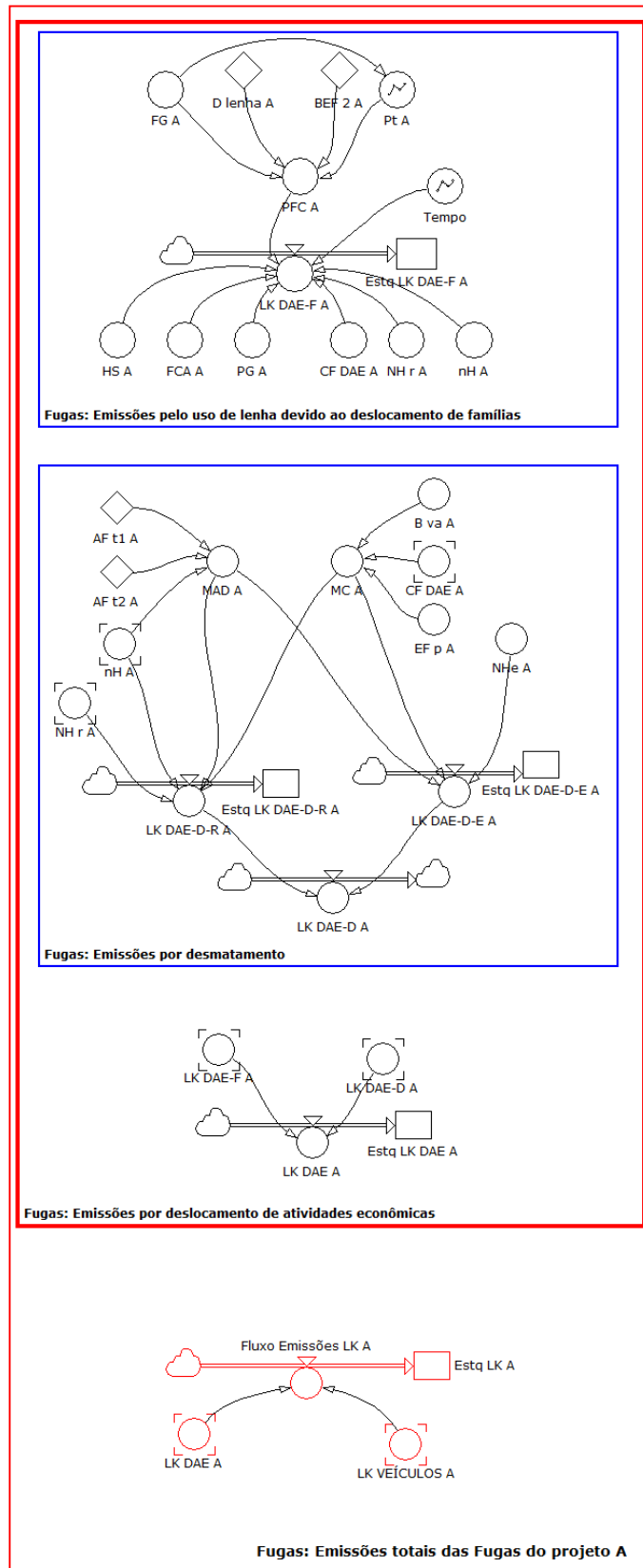


Figura 13.2 – Modelo desenvolvido de estoque das emissões de GEE ocorridas fora do projeto: deslocamento de atividades econômicas e saldo final.

A. EMISSÕES POR QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS FORA DOS LIMITES DO PROJETO

O aumento das emissões de GEE fora do limite do projeto pode ser causado por queima de combustíveis dos veículos utilizados no transporte de mudas, de pessoal e produtos de colheita, entre outros. O modelo prevê as fugas comuns de ocorrência em projetos de reflorestamento de eucalipto no Brasil, que são: transportes de mudas para o campo (equações 84 a 86); transporte de fertilizantes do ponto de venda até o projeto (equação 87 a 89); transporte de madeira colhida fora do projeto até unidade de processamento (equação 90 e 91); transporte de mão de obra até área do plantio (equação 92); transporte para inspeção e monitoramento do campo (equação 93).

$$\text{Fluxo Emissões } TM A = (\text{'consumo médio combustível } TM A' \quad (84)$$

$$* \text{'Fator Emissão Diesel'} * \text{'Km média } TM A' * \text{Qtd veículos mudas-ano } A) / 1000$$

$$\text{Qtd veículos mudas-ano } A = \text{'Total mudas ano } A' / \text{'Capac Carga-Mudas } A \quad (85)$$

$$\text{Total mudas ano } A = \text{'área plantio } A' * \text{'mudas por ha } A' \quad (86)$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo Emissões TM A</i>	transporte de mudas.
<i>Consumo médio Combustível TM A</i>	Consumo médio de combustível (0,33l/ha)
<i>Fator de emissão Diesel</i>	Fator de emissão do Diesel (Padrão IPCC: 2,83).
<i>Km média TM A</i>	Quilometragem média percorrida no transporte de mudas (120Km)
<i>Qtd veículos mudas-ano A</i>	Quantidade de veículos (viagens) necessária para transportar todo o volume de mudas necessárias anuais.
<i>Total mudas-ano A</i>	Quantidade anual de mudas em função do numero de mudas por hectare e a área de plantio anual.
<i>Capac carga-Mudas A</i>	Quantidade de mudas por veículo de transporte (80.000 mudas).
<i>área plantio</i>	Tamanho da área anual que receberá o plantio.
<i>mudas por ha A</i>	Quantidade de mudas plantadas por hectare (1.111 mudas).
<i>Fluxo das emissões do</i>	

$$\text{Fluxo Emissões } TF A = (\text{'Consumo médio combustível } TF A' \quad (87)$$

$$* \text{'Fator Emissão Diesel'} * \text{'Km média } TF A' * \text{'Qts veículos Fertilizantes - ano } A') / 1000$$

$$\text{Qts veículos Fertilizantes - ano } A = \text{'Qt Anual Fert } A' / \text{'Capac Carga - Fertiliz } A' \quad (88)$$

$$\text{Qt Anual Fert } A = \text{'Quant Anual N Fert Org } A' + \text{'Quant Anual N Fert Sint } A' \quad (89)$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo Emissões TF A</i>	Fluxo das emissões do transporte de fertilizantes.
<i>Consumo médio Combustível TF A</i>	Consumo médio de combustível (0,23 l/ha)
<i>Fator de emissão Diesel</i>	Fator de emissão do Diesel (Padrão IPCC: 2,83).
<i>Km média TF A</i>	Quilometragem média percorrida no transporte de fertilizantes (800 km)
<i>Qts veículos Fertiliz-ano A</i>	Quantidade de veículos (viagens) necessária para transportar todo o volume de fertilizantes necessários anuais.
<i>Qt Anual Fert A</i>	Quantidade anual de fertilizantes totais.
<i>Quant Anual N Fert Org A</i>	Quantidade anual de nitrogênio de fertilizantes orgânicos totais.
<i>Quant Anual N Fert Sint A</i>	Quantidade anual de nitrogênio de fertilizantes sintéticos totais.
<i>Capac Carga-Fertiliz A</i>	Quantidade de nitrogênio de fertilizante por veículo de transporte (1,5 toneladas de N).

$$\begin{aligned} \text{Fluxo Emissões T Mad Fora A} = & (\text{Qtd veículos T Mad Fora A}' * & (90) \\ & \text{'Km média T Mad Fora A}' * \text{'Cons médio combust T Mad Fora A}' * \\ & * \text{'Fator Emissão Diesel'}) / 1000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Qtd veículos T Mad Fora A} = & \text{'Qtd} & (91) \\ & \text{Anual de mad colhida}' / \text{'Capac Carga - T Mad Fora A}' \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo Emissões T Mad Fora A</i>	Fluxo das emissões do transporte de madeira colhida fora do projeto.
<i>Cons médio Combust T Mad Fora A</i>	Consumo médio de combustível (1,45 l/ha)
<i>Fator de emissão Diesel</i>	Fator de emissão do Diesel (Padrão IPCC: 2,83).
<i>Qtd veículos T Mad Fora A</i>	Quantidade anual de veículos necessários para o transporte de madeira colhida fora do projeto
<i>Km média T Mad Fora A</i>	Quilometragem média percorrida (15,64km)
<i>Qtd Anual de mad colhida</i>	Volume anual de madeira colhida (Não há).
<i>Capac carga - T Mad Fora A</i>	Capacidade de carga do veículo para transporte da madeira (38m ³)

$$\begin{aligned} \text{Fluxo Emissões T MDO A} = & (\text{Qtd veículos T MDO A}' * & (92) \\ & \text{'Km média T MDO A}' * \text{'Cons médio combust T MDO A}' * \\ & * \text{'Fator Emissão Diesel'}) / 1000 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo Emissões T MDO A</i>	Fluxo das emissões do transporte de madeira colhida fora do projeto.
<i>Cons médio Combust T MDO A</i>	Consumo médio de combustível (0,25 l/ha)
<i>Fator de emissão Diesel</i>	Fator de emissão do Diesel (Padrão IPCC: 2,83).
<i>Qtd veículos T MDO A</i>	Quantidade anual de veículos necessários para o transporte de madeira colhida fora do projeto
<i>Km média T MDO A</i>	Quilometragem média percorrida (68,2km)

$$\begin{aligned} \text{Fluxo Emissões IMC A} &= (\text{'Qtd veículos IMC A'} * & (93) \\ & \text{'Km média IMC A'} * \text{'Cons médio combust IMC A'} * \\ & * \text{'Fator Emissão Diesel'}) / 1000 \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo Emissões IMC A</i>	Fluxo das emissões do transporte de inspeção e monitoramento do campo.
<i>Cons médio Combust IMC A</i>	Consumo médio de combustível (0,10 l/ha)
<i>Fator de emissão Diesel</i>	Fator de emissão da Gasolina (Padrão IPCC: 2,33).
<i>Qtd veículos IMC A</i>	Quantidade anual de veículos necessários do transporte de inspeção e monitoramento do campo (1 veículo)
<i>Km média IMC A</i>	Quilometragem média percorrida (5480km = 4800km de inspeção e 540 de monitoramento)

O fluxo anual das emissões por queima de combustíveis fósseis para fora do projeto é determinado pela equação 94.

$$\begin{aligned} LK \text{ VEÍCULOS A} &= \text{'Fluxo Emissões TM A'} + \text{'Fluxo Emissões TF A'} + & (94) \\ & \text{'Fluxo Emissões T Mad Fora A'} + \text{'Fluxo Emissões T MDO A'} + \\ & \text{'Fluxo Emissões IMC A'} \end{aligned}$$

Nesta formulação:

<i>LK VEÍCULOS A</i>	Fluxo anual das emissões por queima de combustíveis fora do projeto (Fugas)
<i>Fluxo Emissões TM A</i>	Fluxo anual das emissões do transporte de mudas.
<i>Fluxo Emissões TF A</i>	Fluxo anual das emissões do transporte de fertilizantes.
<i>Fluxo Emissões T Mad Fora A</i>	Fluxo anual das emissões do transporte de madeira colhida fora do projeto.
<i>Fluxo Emissões T MDO A</i>	Fluxo anual das emissões do transporte de mão de obra.
<i>Fluxo Emissões IMC A</i>	Fluxo anual das emissões de inspeção e monitoramento do campo.

B. EMISSÕES POR DESLOCAMENTO DE ATIVIDADES ECONÔMICAS

As emissões de fugas por deslocamento de atividade econômica através do uso de lenha é definido pelas equações 95 e 96.

$$\begin{aligned} LK \text{ DAE} - F A &= HS A * PFC A * (1 - FCA A) * CF \text{ DAE A} * \frac{44}{12} * (1 - \\ & PGA A)^T * \frac{NHr A}{nH A} & (95) \end{aligned}$$

$$PFC A = \frac{FG A * D \text{ lenha A} * BEF 2 A}{P_t A} \quad (96)$$

Nesta formulação:

$LK DAE-F A$	Fluxo anual das emissões por queima de lenha por deslocamento de atividade econômica do projeto (Fugas).
$HS A$	Tamanho médio de família residente; número de pessoas por domicílio.
$PFC A$	Consumo anual per capita de lenha.
$FCA A$	Proporção do consumo de lenha per capita de terras agrícolas/privadas, incluindo compras, ao consumo per capita de lenha anual total de todas as fontes.
$CF DAE A$	Fração de carbono de biomassa seca.
$PG A$	Crescimento anual da população humana
T	Tempo em anos a partir da data de início da proposta de atividade do projeto.
$NH_r A$	Número total de famílias deslocadas que residem na vizinhança do projeto
$nH A$	Número de domicílios amostrados de residentes
$D lenha A$	Densidade básica da lenha.
$BEF 2 A$	Fator de expansão de biomassa da lenha.

A emissão de fugas por deslocamento de atividade econômica através do desmatamento atribuído aos residentes é definida pelas equações 97 a 99.

$$LK DAE - D - R - A = MAD A * MC A * \frac{44}{12} * \frac{NH_r A}{nH A} \quad (97)$$

$$MAD A = \frac{AF_{t2}A - AF_{t1}A}{nH A} \quad (98)$$

$$MC A = B va A * CF DAE A * EF_p A \quad (99)$$

Nesta formulação:

$LK DAE-D-R-A$	Fluxo anual das emissões de desmatamento pelo deslocamento de atividade econômica do projeto atribuído aos residentes (Fugas).
$MAD A$	Área média sujeita a mudança do uso/cobertura da terra por amostra residente por casa h .
$MC A$	Média do estoque de carbono por hectare na área sujeita a mudança do uso/cobertura da terra atribuíveis às famílias residentes.
$AF_{t2} A$	Área da terra usada no ano final (ha).
$AF_{t1} A$	Área da terra usada no ano inicial (ha).
$B va A$	Biomassa viva de árvores (acima do solo e da biomassa abaixo do solo) por ha na área sujeita a mudança no uso da terra / cobertura.
$CF DAE A$	Fração de carbono de biomassa seca usada para lenha.
$EF_p A$	Fator de expansão (1,2 a 1,5) para converter o estoque de carbono de biomassa viva de árvores para o estoque de carbono.

A emissão de fugas por deslocamento de atividade econômica através do desmatamento atribuído aos emigrantes é definida pela equação 100.

$$LK DAE - D - E - A = MAD A * MC A * \frac{44}{12} * NH_e \quad (100)$$

Nesta formulação:

<i>LK DAE-D-E-A</i>	Fluxo anual das emissões de desmatamento pelo deslocamento de atividade econômica do projeto atribuído aos emigrantes (Fugas).
<i>NH_e A</i>	Número total de famílias de emigrantes.

É importante ressaltar que, apesar do modelo desenvolvido contemplar as emissões de fugas por deslocamento de atividade econômica, não foi possível obter dados ou premissas que permitissem simulações. Assim, nas simulações realizadas, o resultado dessas emissões será zero, partindo da política adotada pela empresa Plantar S/A de prevenção de fugas de deslocamento de atividades econômicas pela aquisição de áreas com intenção de venda independente da implantação do projeto de reflorestamento.

O fluxo anual das emissões por deslocamento de atividades econômicas para fora do projeto é determinado pela equação 101.

$$LK DAE A = 'LK DAE - F A' + 'LK DAE - D A' \quad (101)$$

Nesta formulação:

<i>LK DAE A</i>	Fluxo anual das emissões por deslocamento de atividades econômicas (Fugas).
<i>LK DAE-F A</i>	Fluxo anual das emissões o uso de lenha devido ao deslocamento de famílias.
<i>LK DAE-D A</i>	Fluxo anual das emissões por desmatamento devido ao deslocamento de famílias.

C. EMISSÕES POR FUGAS

Fugas ocorrem como resultado do aumento das emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis (combustão móvel) de fora do limite do projeto (por exemplo, transporte de pessoal, mudas e do produto) e do deslocamento das atividades econômicas para áreas fora do projeto que levam ao desmatamento e mudança no uso da terra para propósitos agrícola e, ou não agrícola, colheita de lenha para atender às necessidades de energia doméstica e uso de terras como pastos para a coleta de pastagem (UNFCCC, 2006). Fugas são determinadas pela equação 102.

$$Fluxo Emissões LK A = 'LK DAE A' + 'LK VEÍCULOS A' \quad (102)$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo emissões LK A</i>	Fluxo anual das emissões por Fugas.
<i>LK DAE A</i>	Fluxo anual das emissões de deslocamento de atividades econômicas.
<i>LK VEÍCULOS A</i>	Fluxo anual das emissões por queima de combustíveis por veículos.

4.5. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DE UM PROJETO F/R

Finalizando o modelo de simulação das remoções líquidas de GEE de um projeto F/R, é preciso determinar o fluxo do saldo das remoções anuais de carbono do projeto, conforme equação 103 e Figura 14. Esta equação é uma compilação de todos os cálculos anteriores.

$$\text{Fluxo Saldo das Remoções A} = \text{'fluxo CO2 A'} - \text{'Fluxo Emiss GHG A'} - \text{'Fluxo remoções LB'} - \text{'Fluxo Emissões LK A'} \quad (103)$$

Nesta formulação:

<i>Fluxo Saldo Remoções A</i>	Fluxo anual do saldo das remoções de carbono do projeto.
<i>Fluxo CO2 A</i>	Fluxo anual do sequestro de CO ₂ pelas árvores.
<i>Fluxo Emiss GHG A</i>	Fluxo anual das emissões de GEE dentro dos limites geográficos do projeto.
<i>Fluxo remoções LB</i>	Fluxo anual das remoções de linha de base.
<i>Fluxo emissões LK A</i>	Fluxo anual das emissões das fugas.

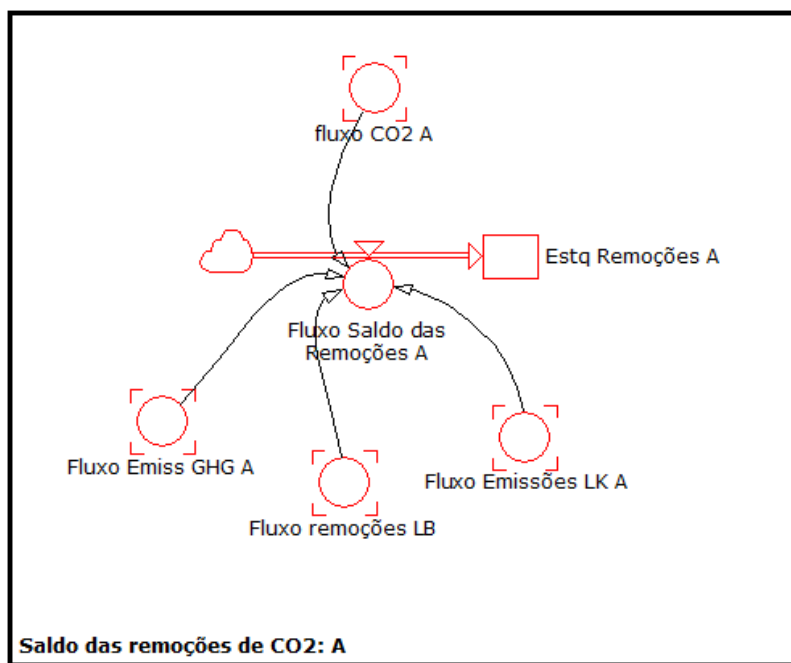


Figura 14 – Modelo desenvolvido das remoções líquidas por sumidouro.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tempo transiente do nosso modelo foi muito pequeno como esperado, porque não foi trabalho com modelos rígidos NP ou modelos de alta complexidade computacional. O tempo total de simulação foi de 0,00005 h. O modelo tem 1710 variáveis para simulação de cada regional individualmente, porém com simulação simultânea dos ciclos de corte variando entre 5 e 10 anos. O modelo foi executado em um computador Intel i5, 4,0 Gb de RAM, 32 bits.

O modelo é contínuo uma vez que sofre mudanças constantes e suaves no tempo, ou seja, é uma curta sequência de alterações discretas ao longo do tempo. Além disso, um modelo é determinístico, pois trata variáveis não aleatórias, e porque as características operacionais envolvem relações exatas. Portanto, depois de desenvolver e testar o modelo manualmente foram realizadas simulações dos cenários atual e propostos com alterações no ciclo de colheita.

5.1. ESTOQUE DE FLORESTA, MADEIRA E CARBONO DE BIOMASSA

A Dinâmica de Sistemas se mostrou uma técnica de simulação muito eficiente para a modelagem do crescimento e estocagem de floresta, madeira e carbono. Isto porque, como seguem os resultados, foi sensível às características regionais de clima e solo (edafoclimáticas), que acarretam em resultados diferentes para projetos de reflorestamento com as mesmas características de espécie, espaçamento de plantio e manejo. É importante ressaltar que o modelo considera corte total do plantio, sem condução de rebrota.

O modelo permite analisar individualmente e comparativamente as regiões estudadas. Analisando a Região A por meio da Tabela 11, simulada num horizonte temporal de 30 anos e plantio anual de áreas iguais de 5.000 hectares com rotação de corte de 7 anos, tem um volume médio por fuste de $331,01 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ e, ao final do período

simulado, um total acumulado do volume de floresta de 42.425.950m³ (variável “*vol tot cresc flor A*”), ou seja, este é o montante esperado a ser obtido de floresta considerando o planejamento florestal de área, rotação de corte e duração do projeto, além das características específicas de clima e solo traduzidas por meio do ICA da região. Enquanto o montante de floresta é contabilizado ao final de cada ano, o montante de madeira cortada só pode ser computado quando cada talhão plantado completa a rotação de corte, desta forma, o total acumulado esperado de madeira cortada desta região ao final do período de simulação é de 39.721.200 m³ (variável “*vol tot mad cort*”). Convertendo o volume de floresta em estoque acumulado de carbono gerado (variável “*estq CO₂*”) pela floresta acima e abaixo do solo tem ao final de 30 anos um total de 77.446.263,75tCO₂ estocado.

Tabela 11 – Resultados de simulação da Região A com rotação de corte de 7 anos, em tCO₂

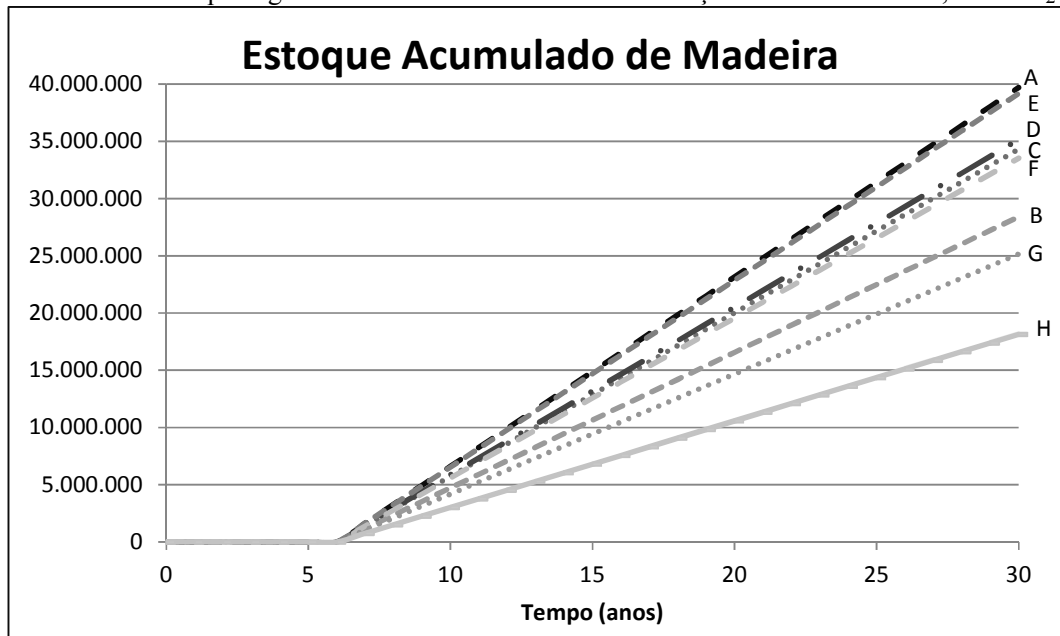
ano	fluxo acum vol A	vol tot cresc flor A	vol tot mad cort A	Volume Real A	estq CO2 A - c7
0	0,00	0,00	0,00	331,01	0,00
5	1.175.650,00	1.739.250,00	0,00	331,01	3.174.906,26
10	1.655.050,00	9.324.950,00	6.620.200,00	331,01	17.022.188,95
15	1.655.050,00	17.600.200,00	14.895.450,00	331,01	32.128.207,65
20	1.655.050,00	25.875.450,00	23.170.700,00	331,01	47.234.226,35
25	1.655.050,00	34.150.700,00	31.445.950,00	331,01	62.340.245,05
30	1.655.050,00	42.425.950,00	39.721.200,00	331,01	77.446.263,75

Non-commercial use only

Comparativamente, simulando e analisando as oito regiões, seguindo as restrições de 35 mil hectares totais de cada uma, seus respectivos ICA's, rotação de corte de 7 anos e horizonte temporal de 30 anos, tem-se os resultados apresentados na Tabela 12. Como esperado, por possuir menor volume em idade de corte (Tabela 7) sob rotação de corte de 7 anos, a Região H obteve o menor estoque acumulado de volume de floresta (“*vol tot cresc flor*”) que foi de 19.134.350,00m³, como oposto, com o melhor resultado, a Região A obteve 42.425.950,00 m³ de estoque acumulado de floresta. Esta diferença é justificada pelas diferenças edafoclimáticas (clima e solo) mais favorável ao cultivo de eucalipto para produção de celulose e papel e carvão vegetal na Região A, já que a Região H produz apenas 45,10% do que é produzido na Região A. Como os estoques de madeira cortada (“*vol tot mad cort*”) e de carbono (“*estq CO₂*”) são calculados com base nos estoques de volume de madeira, as diferenças edafoclimáticas também acarretam em piores resultados na Região H para estoque de

madeira cortada de 18.126.000,00 m³ e estoque de carbono sequestrado de 35.097.181,49 tCO₂, como pode ser visto nos Gráficos 2 e 3.

Gráfico 2 – Estoque regional acumulado de madeira com rotação de corte de 7 anos, em tCO₂



O Gráfico 2 e a Tabela 13 representam os resultados de estoque acumulado de madeira (“*vol tot mad cort*”) das oito regiões obtido pela simulação num horizonte temporal de 30 anos e ciclo de 7 anos. As Regiões A e E obtiveram os melhores estoques de madeira, resultado este esperado em virtude de possuírem os melhores ICA’s regionais conforme Tabela 7, sendo que a Região A obteve resultado 1,32% maior que a Região E. Esta diferença de resultados é pouco significativa no horizonte temporal de estudo de 30 anos e mostra que, apesar de serem regiões distintas, suas características edafoclimáticas se assemelham quanto ao impacto causado no desenvolvimento do reflorestamento de eucalipto.

Tabela 12 – Estoque regional acumulado de floresta com rotação de corte de 7 anos, em tCO₂

ano	0	10	20	30
vol tot cresc flor A	0,00	9.324.950,00	25.875.450,00	42.425.950,00
vol tot cresc flor B	0,00	7.332.150,00	19.171.150,00	31.010.150,00
vol tot cresc flor C	0,00	9.332.900,00	23.632.400,00	37.931.900,00
vol tot cresc flor D	0,00	9.331.300,00	23.985.300,00	38.639.300,00
vol tot cresc flor E	0,00	9.205.750,00	25.537.750,00	41.869.750,00
vol tot cresc flor F	0,00	7.936.000,00	21.911.000,00	35.886.000,00
vol tot cresc flor G	0,00	5.862.200,00	16.336.700,00	26.811.200,00
vol tot cresc flor H	0,00	4.029.350,00	11.581.850,00	19.134.350,00

Non-commercial use only!

Tabela 13 – Estoque regional acumulado de madeira com rotação de corte de 7 anos, em tCO₂

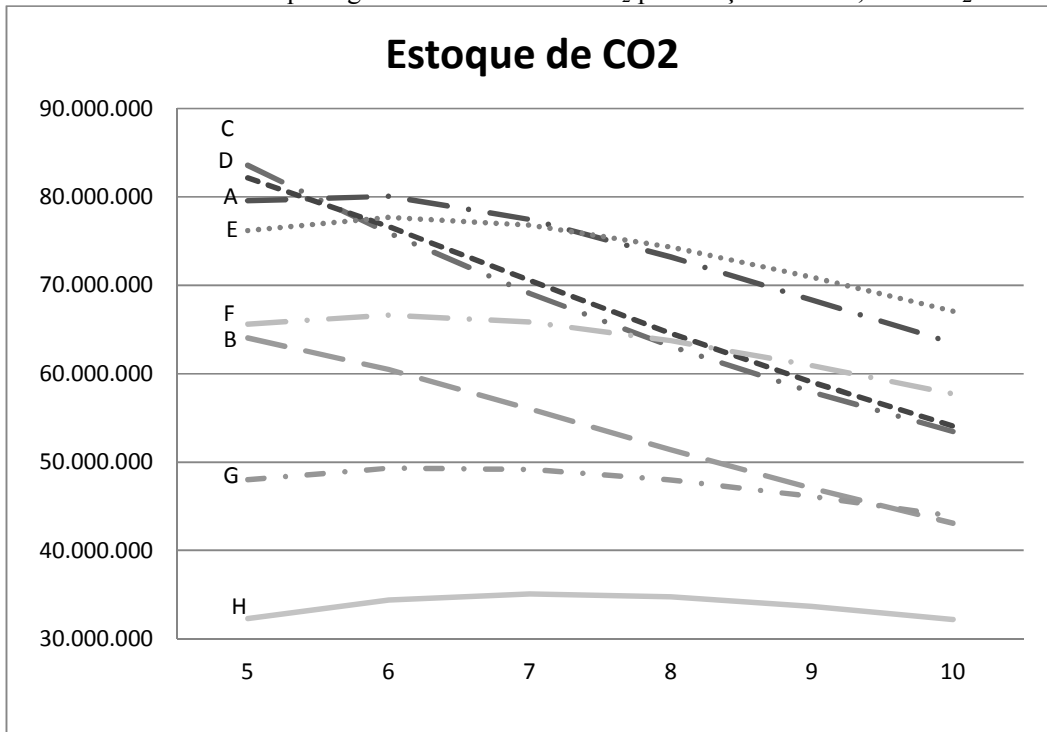
ano	0	10	20	30
vol tot mad cort A	0,00	6.620.200,00	23.170.700,00	39.721.200,00
vol tot mad cort B	0,00	4.735.600,00	16.574.600,00	28.413.600,00
vol tot mad cort C	0,00	5.719.800,00	20.019.300,00	34.318.800,00
vol tot mad cort D	0,00	5.861.600,00	20.515.600,00	35.169.600,00
vol tot mad cort E	0,00	6.532.800,00	22.864.800,00	39.196.800,00
vol tot mad cort F	0,00	5.590.000,00	19.565.000,00	33.540.000,00
vol tot mad cort G	0,00	4.189.800,00	14.664.300,00	25.138.800,00
vol tot mad cort H	0,00	3.021.000,00	10.573.500,00	18.126.000,00

Non-commercial use only!

Ressaltando que o interesse nos projetos de reflorestamento seja além da produção de floresta/madeira, mas também de sequestro de carbono para geração de créditos de carbono negociáveis com países compromissados com a redução das emissões, são analisados os resultados de simulação dos estoques de carbono. O Gráfico 3 e a Tabela 14 apresenta estes resultados separados por região e rotação de corte adotado. As Regiões C e D foram aquelas que obtiveram os maiores estoques de CO₂, respectivamente de 83.566.085,94 tCO₂ e 82.137.514,30 tCO₂, ambas quando a rotação de corte adotada foi de 5 anos. O destaque destas duas regiões é que em ambas a rotação de corte atual adotado pelas empresas é de 7 anos, assim alterando a rotação de corte atual para o que acarreta em maior estoque de CO₂, obtém-se um aumento de 21% e 16,43% respectivamente para as Regiões C e D, como pode ser visto na Tabela 15. Isto se deve aos ICA das regiões atingirem um pico máximo nos primeiros anos e terem uma grande queda a partir do sexto ano. Assim adotando uma rotação de corte de até 6 anos,

espera-se um volume maior de biomassa acumulada em floresta ao longo dos 30 anos do projeto. Ressalva-se ainda que, como o estoque de carbono e madeira é calculado com base no estoque de floresta, a rotação de corte adotado pelas empresas não é o mais produtivo para floresta, madeira e carbono. Adverte-se, no entanto que, não está sendo avaliados os custos para geração destes estoques (floresta, madeira e carbono), o que pode acarretar financeiramente na adoção de rotação de corte diferentes.

Gráfico 3 – Estoque regional acumulado de CO₂ por rotação de corte, em tCO₂



Os estoques de CO₂ retidos pelas florestas plantadas podem gerar créditos de carbono, desde que sejam contabilizadas as emissões e sequestro advindos do projeto de reflorestamento, assim se tornam um novo produto para o setor florestal. Avaliando os estoques acumulados (sequestrados) de CO₂ das oito regiões (Tabela 14) e comparando os resultados entre os ciclos atuais adotados pelas empresas e aqueles ciclos que apresentam maior estocagem (Tabela 14), constatou que é possível as empresas obterem aumentos nestes estoques somente com a alteração da rotação de corte. As Regiões A, B, E, F, G obtiveram o estoque máximo acumulado de CO₂ quando a rotação de corte empregado foi um ano menor que o ciclo atual adotado. Isto porque o modelo considera a curva de crescimento da floresta por meio da taxa de crescimento anual (ICA) de cada

região. Ressalta-se que os ganhos nestas regiões são poucos significativos, conforme Tabela 14 e que os custos de implantação e manejo do reflorestamento e de certificação dos créditos não estão sendo analisados. Desta forma, em termos de ganhos no volume de CO₂ estocado é viável a alteração da rotação de corte, não podendo afirmar financeiramente a viabilidade da troca.

Tabela 14 – Estoque regional acumulado CO₂ e comparação entre ciclos de rotação, em tCO₂

Ciclo	5	6	7	8	9	10	
Regiões	A	79.557.847,95	80.060.195,26	77.446.263,75	73.203.369,14	68.340.277,83	63.444.831,31
	B	64.046.746,93	60.465.513,84	55.993.033,90	51.385.288,59	47.032.338,86	43.093.888,45
	C	83.566.085,94	75.908.771,61	69.061.720,83	63.094.407,92	57.926.037,31	53.442.437,12
	D	82.137.514,30	76.635.192,98	70.548.115,00	64.564.197,28	59.027.468,68	54.065.501,82
	E	76.192.232,08	77.673.702,25	76.799.588,94	74.328.590,51	70.921.623,66	67.075.495,99
	F	65.606.115,00	66.633.235,52	65.823.895,50	63.746.790,80	60.907.426,20	57.696.764,80
	G	48.004.358,52	49.320.126,51	49.178.443,60	47.981.503,76	46.113.428,73	43.881.386,40
	H	32.300.830,68	34.405.481,44	35.097.181,49	34.729.999,03	33.661.752,97	32.189.510,05

Pela Tabela 15 verifica-se que a Região H obteve maior estoque de CO₂ com a atual rotação de corte adotado (7 anos), sendo seu estoque acumulado de CO₂ (“*estq CO₂*”) de 35.07.181,49 tCO₂ (Tabela 14). Isto é explicado pelo fato que o nível máximo de ICA da região é alcançado com cinco anos e que a queda nos dois anos seguintes é muito pequena, compensando manter o plantio até idade de corte de sete anos.

Tabela 15 – Comparação dos resultados dos diferentes ciclos de rotação de corte

	Ciclo Atual	Melhor Ciclo	Ganho de CO ₂	
Regiões	A	7	6	3,38%
	B	6	5	5,92%
	C	7	5	21,00%
	D	7	5	16,43%
	E	7	6	1,14%
	F	7	6	1,23%
	G	7	6	0,29%
	H	7	7	0%

As diferenças edafoclimáticas (clima e solo) traduzem as características regionais que acarretam em resultados distintos de floresta, madeira e carbono, e o

modelo é sensível a estas diferenças, como pode ser observado nos resultados de simulação.

5.2. EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS DENTRO DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO

A Tabela 16 apresenta o estoque anual acumulado das emissões de GEE dentro dos limites do projeto pela queima de combustíveis fósseis na realização das atividades de exaustão, colheita, transporte e estradas na Região A com rotação de corte de 5 anos durante 30 anos de contabilização. Do total de 1.458.703,94 tCO₂ emitidos pelas queima de combustíveis fósseis dentro dos limites do projeto, 61,78% correspondem às emissões pelas atividades de transporte, 18,39% correspondem às emissões referentes à implantação e manutenção das estradas, 14,45% correspondem às emissões das atividades de colheita e apenas 5,38% correspondem às emissões das atividades de exaustão. O modelo permite que os dados sejam exibidos anualmente, com isso é possível ter melhor acompanhamento das alterações dos estoques de carbono do projeto de F/R. Pode-se perceber o quão sensível é o modelo às variações ambientais e silviculturais.

Tabela 16 – Simulação dos estoques de emissões de GEE por queima de combustível no projeto, em tCO₂

Região A - Ciclo 5 anos				
ano	ESTQ EXAUSTÃO A	ESTQ COLHEITA A	ESTQ TRANSPORTE A	ESTQ ESTRADAS A
0	0,00	0,00	0,00	0,00
5	13.074,60	8.104,79	34.662,23	44.925,32
10	26.149,20	48.628,74	207.973,37	89.409,29
15	39.223,80	89.152,69	381.284,52	133.823,72
20	52.298,40	129.676,64	554.595,66	178.517,94
25	65.373,00	170.200,59	727.906,81	223.217,99
30	78.447,60	210.724,54	901.217,95	268.313,85

[Non-commercial use only]

Simulando a perda de biomassa pela conversão de pastagens para projeto de F/R da Região A, com a rotação de corte variando de 5 a 10 anos, constata-se que o resultado é igual para todas as condições (Tabela 17). Isso se deve ao fato de que, as emissões de carbono pela preparação do local são definidas com base na área total que receberá o projeto de F/R, independente da rotação de corte adotado. O tamanho da área

total é a mesma, muda apenas o tamanho das áreas plantadas anualmente em função do ciclo, conforme já mencionado.

Tabela 17 – Emissões com a perda de biomassa no preparo do local para F/R, em tCO₂

Região A						
ano	Ciclo 5 anos	Ciclo 6 anos	Ciclo 7 anos	Ciclo 8 anos	Ciclo 9 anos	Ciclo 10 anos
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88
10	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88
15	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88
20	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88
25	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88
30	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88	380.775,88

Non-commercial use only

Apesar do estoque total de emissões por incêndios acidentais ter sido crescente em função do tempo de duração da rotação de corte, o resultado apresentado na Tabela 18 não aponta que estas emissões estejam relacionadas à duração da rotação de corte. Isto porque estes incêndios são acidentais, sem padrão de ocorrência e de distribuição entre as idades dos plantios. Ressalta-se que, os dados gerados para simulação apresentaram este comportamento crescente.

Tabela 18 – Emissões de carbono pela queima de biomassa em incêndios acidentais, em tCO₂

Região A						
ano	Ciclo 5 anos	Ciclo 6 anos	Ciclo 7 anos	Ciclo 8 anos	Ciclo 9 anos	Ciclo 10 anos
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	230,34	336,95	466,17	619,06	781,01	909,76
10	439,18	639,92	888,18	1.176,17	1.482,54	1.727,46
15	706,87	1.031,60	1.430,60	1.887,94	2.376,73	2.769,27
20	998,37	1.456,94	2.018,80	2.664,30	3.352,53	3.906,30
25	1.249,19	1.824,76	2.529,69	3.341,99	4.205,02	4.902,27
30	1.409,09	2.057,68	2.852,05	3.766,15	4.826,18	5.610,39

Non-commercial use only

As aplicações de fertilizantes ocorrem nos anos 1 e 2 da rotação de corte na empresa fornecedora dos dados. Como não há informações sobre dosagens de nitrogênio diferenciadas pela duração da rotação de corte, foi mantida a ocorrência e dosagem regional em todas as simulações. Assim, é possível observar através dos resultados de simulação apresentados na Tabela 19 que, quanto maior for a rotação de corte, menor serão as emissões de carbono pela aplicação de nitrogênio.

Tabela 19 – Emissões de carbono pela aplicação de nitrogênio – fertilização, em tCO₂

Região A						
ano	Ciclo 5 anos	Ciclo 6 anos	Ciclo 7 anos	Ciclo 8 anos	Ciclo 9 anos	Ciclo 10 anos
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	5.317,04	4.430,87	3.797,89	3.323,15	2.953,91	2.658,52
10	12.912,82	10.760,68	9.223,44	8.070,51	7.173,77	6.456,41
15	20.508,59	17.090,48	14.648,99	12.817,87	11.393,64	10.254,30
20	28.104,37	23.420,29	20.074,55	17.565,23	15.613,50	14.052,18
25	35.700,14	29.750,10	25.500,10	22.312,59	19.833,37	17.850,07
30	43.295,92	36.079,91	30.925,66	27.059,95	24.053,23	21.647,96

(Non-commercial use only)

Analisando a Região A com rotação de corte de 5 anos constatou-se que do total de 1.884.184,82 tCO₂ emitidos por atividades ocorridas dentro do projeto (Tabela 20), 77,42% correspondem às emissões por queima de combustível fóssil dentro dos limites do projeto. O restante corresponde em 20,21% das emissões pelo preparo do local para conversão de pastagem em F/R; 2,3% de emissões pela aplicação (consumo) de nitrogênio como fertilizante; e 0,07% por incêndios acidentais.

Sintetizando as emissões de carbono ocorridas dentro dos limites geográficos do projeto da Região A com rotação de corte variando de 5 a 10 anos, observou-se que seu resultado final é menor quando a rotação de corte é 10 anos (Tabela 20). Isso porque, excetuando as emissões por incêndios que não tem comportamento pré-determinado por serem acidentes, as demais emissões de carbono (queima de combustível, preparo do local e fertilização) sofrem alterações em função da duração da rotação de corte.

Tabela 20 – Emissões de GEE ocorridas dentro dos limites do projeto, em tCO₂

Região A						
ano	Ciclo 5 anos	Ciclo 6 anos	Ciclo 7 anos	Ciclo 8 anos	Ciclo 9 anos	Ciclo 10 anos
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	487.090,20	441.364,51	439.304,26	437.815,03	436.699,76	435.806,77
10	766.288,48	722.383,36	670.992,84	619.217,05	570.953,39	527.736,40
15	1.045.476,07	1.003.421,40	945.736,79	882.998,83	821.707,03	764.991,64
20	1.324.967,26	1.284.772,87	1.220.806,32	1.147.124,98	1.072.822,08	1.002.621,88
25	1.604.423,60	1.566.072,66	1.495.804,37	1.411.158,29	1.323.819,64	1.240.116,90
30	1.884.184,82	1.847.633,35	1.771.009,70	1.675.333,89	1.574.981,68	1.477.719,88

(Non-commercial use only)

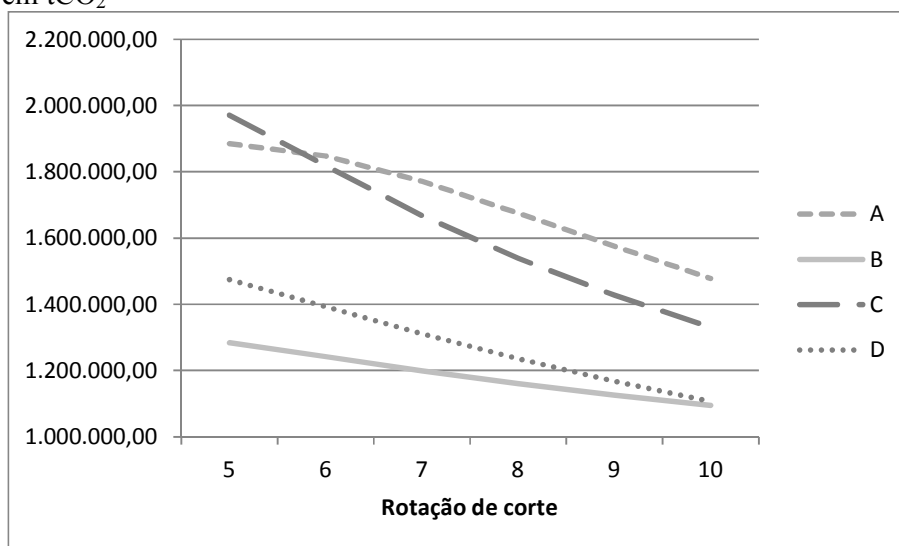
Considerando que as regiões A, C e D adotam uma rotação de corte de 7 anos e a região B uma rotação de corte de 6 anos, a Tabela 21 e Gráfico 4 apresentam todos os resultados da queima de combustível dentro dos limites do projeto. Em destaque estão os resultados regionais sob a rotação de corte adotado. Como já afirmado anteriormente,

uma vez que estas emissões tendem a diminuir quando a rotação de corte é maior, os ciclos adotados na empresa, independente da região, não apresentam os menores resultados de emissão de GEE.

Tabela 21 – Emissões regionais de GEE dentro dos limites de projeto por rotação de corte, em tCO₂

Região	Rotação de corte					
	5	6	7	8	9	10
A	1.884.184,82	1.847.633,35	1.771.009,70	1.675.333,89	1.574.981,68	1.477.719,88
B	1.284.079,50	1.241.680,16	1.199.673,04	1.160.555,89	1.125.448,59	1.094.539,89
C	1.970.479,22	1.817.987,31	1.667.712,27	1.538.392,25	1.427.125,76	1.330.807,71
D	1.474.100,60	1.392.408,57	1.311.171,52	1.235.319,04	1.167.063,31	1.106.734,51

Gráfico 4 - Emissões regionais de GEE dentro dos limites de projeto por rotação de corte, em tCO₂



5.3. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DA LINHA DE BASE

Como são consideradas pastagens em estado estacionário, ou seja, já atingiu o pico máximo de biomassa, não há remoções pela linha de base, conforme Tabela 22 para a Região A variando a rotação de corte de 5 a 10 anos. Este mesmo resultado é encontrado para as demais regiões.

Tabela 22 – Remoções de GEE por linha de base, em tCO₂

Região A						
ano	Ciclo 5 anos	Ciclo 6 anos	Ciclo 7 anos	Ciclo 8 anos	Ciclo 9 anos	Ciclo 10 anos
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

[Non-commercial use only]

Quando o modelo for empregado em um projeto de F/R para quantificação das remoções da linha de base deverá ser feito um estudo de elegibilidade da terra onde constatará a vegetação pré-existente. Caso sejam pastagens em crescimento, pastagens com árvores isoladas ou um F/R pré-existente, haverá resultado positivo de remoções de GEE por linha de base.

5.4. EMISSÕES DE GEE OCORRIDAS FORA DOS LIMITES GEOGRÁFICOS DO PROJETO – FUGAS

Os resultados referentes às emissões de GEE ocorridas fora dos limites do projeto apresentam-se baixos uma vez que não houve emissões por deslocamento de atividade econômica. Como mencionado anteriormente no capítulo 4, por não haver dados regionais disponíveis para a quantificação destas emissões, considera-se que o projeto de reflorestamento simulado tem a mesma política de prevenção de fugas adotada pela empresa Plantar S/A, de aquisição de terra à venda independente de implementação do projeto de reflorestamento.

Desta forma, nestas simulações realizadas, o saldo das fugas corresponde apenas às emissões de GEE por queima de combustíveis fora dos limites do projeto. As emissões totais de queima de combustíveis fora dos limites do projeto na região A com rotação de corte de 5 anos é de 7.231,65 tCO₂ ao final dos 30 anos do projeto (Tabela 23). As emissões por transporte de madeira colhida fora tem resultado zero, por não haver informações sobre tal atividade para simulações, mas sua ocorrência é prevista no modelo. Para as simulações sob as condições apresentadas de dados, o transporte de fertilizantes corresponde a 51,71% (3.739,81 tCO₂), e o transporte de mão de obra corresponde a 43,24% (3.126,70 tCO₂) das emissões de fugas por queima de combustível e fugas totais.

Tabela 23 – Fugas por queima de combustível da região A, em tCO₂

Região A - Ciclo de corte 5 anos						
ano	Estq Fugas Comb	Transp Mudas	Transp Fertil	Transp MD Obra	Transp Mad Fora	Transp Insp e Monit
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1.041,25	54,47	459,28	521,12	0,00	6,38
10	2.279,33	108,94	1.115,38	1.042,23	0,00	12,77
15	3.517,41	163,42	1.771,49	1.563,35	0,00	19,15
20	4.755,49	217,89	2.427,60	2.084,46	0,00	25,54
25	5.993,57	272,36	3.083,70	2.605,58	0,00	31,92
30	7.231,65	326,83	3.739,81	3.126,70	0,00	38,31

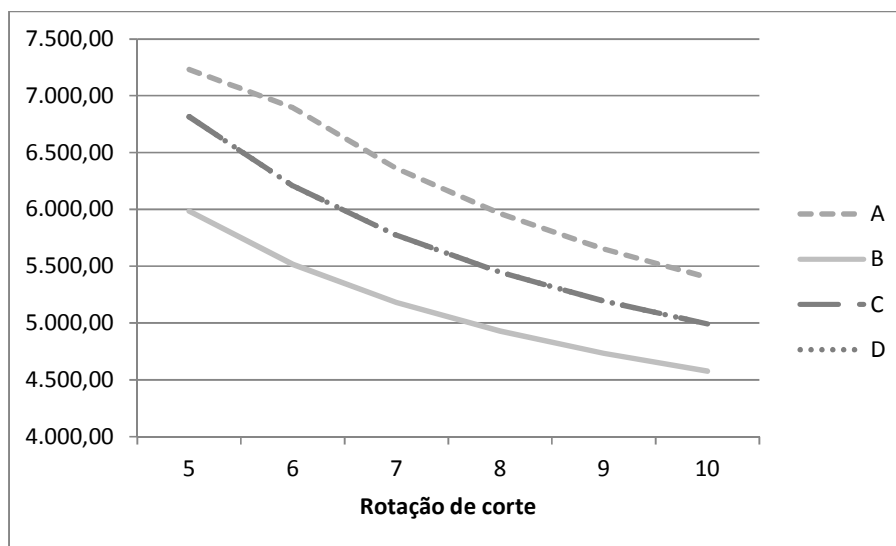
(Non-commercial use only)

Como o consumo de fertilizante e transporte de mão de obra não se alteram em função de alteração da rotação de corte, apenas em função da frequência de ocorrência, as fugas diminuem quando a rotação de corte aumenta (Tabela 24 e Gráfico 5).

Tabela 24 – Fugas totais regionais por rotação de corte, em tCO₂

Região	Rotação de corte					
	5	6	7	8	9	10
A	7.231,65	6.894,32	6.361,56	5.961,99	5.651,21	5.402,59
B	5.985,04	5.515,03	5.179,32	4.927,53	4.731,69	4.575,02
C	6.816,11	6.207,59	5.772,94	5.446,95	5.193,39	4.990,56
FUGAS D	6.816,11	6.207,59	5.772,94	5.446,95	5.193,39	4.990,56

Gráfico 5 – Fugas totais regionais por rotação de corte



5.5. REMOÇÕES LÍQUIDAS DE GEE DE UM PROJETO DE F/R

A Tabela 25 apresenta os resultados principais de todas as simulações para projetos de duração de 30 anos. As remoções líquidas de GEE do projeto são determinadas pelo sequestro de carbono pelas florestas subtraindo as remoções de linha de base (que foram nulas nestas simulações), as emissões ocorridas dentro dos limites do projeto e as fugas. Em negrito estão as remoções líquidas de GEE sob os ciclos de corte adotados na empresa para cada região. Em nenhuma delas o ciclo adotado atinge o maior resultado de remoções líquidas.

Tabela 25 – Resultados finais das simulações para projetos com 30 anos de duração.

	Região	Rotação de corte					
		5	6	7	8	9	10
Sequestro de carbono - biomassa	A	79.557.847,95	80.060.195,26	77.446.263,75	73.203.329,14	68.340.277,83	63.444.831,31
	B	64.046.746,93	60.465.513,84	53.993.033,90	51.385.288,59	47.032.338,86	43.093.888,45
	C	83.566.085,94	75.908.771,61	69.061.720,83	63.094.407,92	57.926.037,31	53.442.437,12
	D	82.137.514,30	76.635.192,98	70.548.115,00	64.564.197,28	59.027.468,68	54.065.501,82
Remoções de linha de base	A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emissões dentro do projeto	A	1.884.184,82	1.847.633,35	1.771.009,70	1.675.333,89	1.574.981,68	1.477.719,88
	B	1.284.079,50	1.241.680,16	1.199.673,04	1.160.555,89	1.125.448,59	1.094.539,89
	C	1.970.479,22	1.817.987,31	1.667.712,27	1.538.392,25	1.427.125,76	1.330.807,71
	D	1.474.100,60	1.392.408,57	1.311.171,52	1.235.319,04	1.167.063,31	1.106.734,51
Fugas	A	7.231,65	6.894,32	6.361,56	5.961,99	5.651,21	5.402,59
	B	5.985,04	5.515,03	5.179,32	4.927,53	4.731,69	4.575,02
	C	6.816,11	6.207,59	5.772,94	5.446,95	5.193,39	4.990,56
	D	6.816,11	6.207,59	5.772,94	5.446,95	5.193,39	4.990,56
Remoções líquidas do projeto	A	77.666.431,48	78.205.667,59	75.668.892,49	71.522.033,26	66.759.644,94	61.961.708,84
	B	62.756.682,39	59.218.318,65	52.788.181,54	50.219.805,17	45.902.158,58	41.994.773,54
	C	81.588.790,61	74.084.576,71	67.388.235,62	61.550.568,72	56.493.718,16	52.106.638,85
	D	80.656.597,59	75.236.576,82	69.231.170,54	63.323.431,29	57.855.211,98	52.953.776,75

Na região A, caso seja alterado a rotação de corte de 7 (adotado na empresa) para 6 anos, haverá um ganho de 3,35% de remoções líquidas de GEE. Como cada tonelada de CO₂ removida equivale a um crédito de carbono, também haverá o mesmo ganho de 3,35% em créditos de carbono. Sob o mesmo raciocínio, alterando a rotação de corte da região B haverá um ganho de 5,98% em remoções líquidas de GEE e créditos de carbono. Na região C o ganho será de 21,07% e na região D o ganho será de 16,50%.

Comparando os resultados regionais A, B, C e D exibidos nos Gráficos 3 e 6, constata que o comportamento entre ciclos dos estoques de CO₂ (sequestro de carbono pelas florestas) e das remoções líquidas do projeto é o mesmo. A rotação de corte que representa o pico máximo de estoques de carbono numa região é o mesmo que representa o pico máximo das remoções líquidas do projeto. Isto acontece porque as subtrações dos estoques de CO₂ (remoções de linha de base, emissões de GEE ocorridas dentro e fora do projeto) representam uma parcela mínima do total sequestrado pelas florestas na forma de biomassa, de acordo com a Tabela 26.

Gráfico 6 – Remoções regionais líquidas de CO₂ entre ciclos

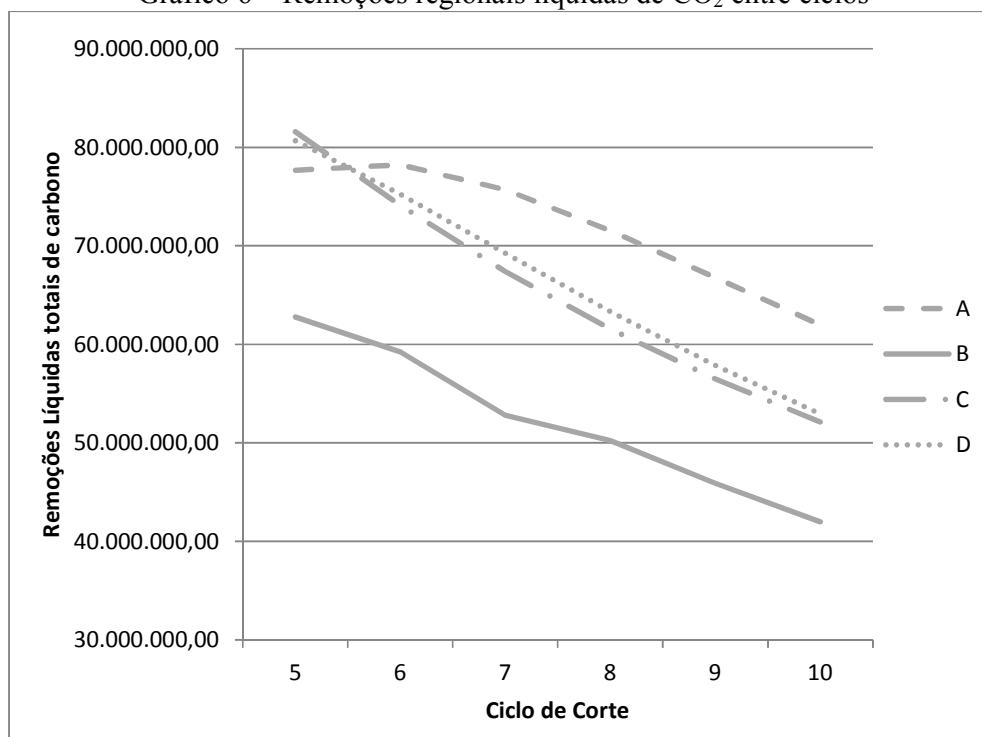


Tabela 26 – Subtrações dos estoques de CO₂ pela linha de base e emissões de GEE ocorridas dentro e fora do projeto (%)

Região	Rotação de corte					
	5	6	7	8	9	10
A	2,38	2,32	2,29	2,30	2,31	2,34
B	2,01	2,06	2,23	2,27	2,40	2,55
C	2,37	2,40	2,42	2,45	2,47	2,50
D	1,80	1,83	1,87	1,92	1,99	2,06

Sob as condições simuladas apresentadas, as subtrações dos estoques de CO₂ pelas emissões de GEE ocorridas dentro e fora dos limites do projeto e pela linha de base variam de 1,8 a 2,55% do total sequestrado pelas florestas, conforme destaques na Tabela 26.

Todas as constatações feitas sobre as alterações nos estoques de CO₂, nas remoções de linha de base, nas emissões de GEE dentro e fora dos limites do projeto e as remoções líquidas de totais de GEE do projeto mostram o quanto a Dinâmica de Sistemas enquanto técnica e o modelo desenvolvido são adequados para esse tipo de simulação. Além disso, o modelo se mostrou bastante sensível às características regionais e dos cenários propostos de alteração dos ciclos de corte. As Tabelas aqui exibidas sintetizam os resultados gradativos de 5 em 5 anos até atingirem o período de 30 anos de simulação. No entanto, o modelo foi programado para que estes resultados sejam tabelados anualmente, permitindo maior e melhor acompanhamento das alterações nos estoques de CO₂. O modelo criado foi totalmente baseado na metodologia aprovada (AR-AM0005) pela UFNCCC por meio do Conselho Executivo, uma vez que o foco é a criação de um modelo (ferramenta) de simulação, e não uma nova metodologia.

Como descrito na metodologia apresentada, cada tonelada de CO₂ obtida pela remoção líquida de CO₂ do projeto equivale a 1 crédito de carbono. Desta forma, sob a rotação de corte de 7 anos, ao final dos 30 anos do projeto, a região A terá obtido um total de 75.668.892 unidades de crédito de carbono, a região B um total de 52.788.181 unidades de crédito de carbono, a região C um total de 67.388.253 unidades de crédito de carbono, e a região D um total de 69.231.170 unidades de crédito de carbono passíveis de comercialização no mercado de carbono.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Constatou-se a eficiência da Dinâmica de Sistemas em modelar e simular o crescimento de florestas de reflorestamento de eucalipto. O modelo se mostrou sensível às variações ambientais regionais no qual as florestas foram introduzidas, através da incorporação das variáveis de incremento corrente anual regional, traduzindo assim as características edafoclimáticas específicas de cada região. Além disto, o modelo abrange não só o crescimento da floresta em volume de biomassa acima e abaixo do solo, mas também o volume de madeira gerada que efetivamente pode ser utilizado na indústria de celulose e papel, e ainda converte o crescimento da floresta em estoque de carbono.

Observou-se que a rotação de corte adotada pelas empresas nem sempre acarreta numa maior produtividade a longo prazo. Das oito regiões estudadas, apenas a Região H obteve melhor resultado com a rotação de corte adotado pela empresa. Também houve casos, como das Regiões C e D, em que a rotação de corte com melhor resultado reduziu em 2 anos em relação ao adotado, devido ao pico de incremento anual ocorrer entre os primeiros anos do plantio e reduzir bruscamente a partir do quinto ano de idade.

As simulações apresentam apenas as previsões de estoques de floresta, madeira e carbono e que o fato destes estoques serem melhores quando a rotação de corte é diferente daquele empregado na prática, não garante que financeiramente também sejam melhores.

A Dinâmica de Sistemas também é eficiente na modelagem e simulação das emissões de GEE dentro e fora dos limites geográficos do projeto e das remoções de linha de base. O modelo se mostrou sensível às variações regionais quanto às emissões de GEE uma vez que das características edafoclimáticas influenciam na realização das atividades, sejam no consumo de fertilizantes, de combustíveis, distâncias percorridas. O detalhamento do modelo permite monitorar individualmente cada item que compõe o cálculo das remoções líquidas de GEE, tornando fácil a identificação dos pontos mais impactantes nos resultados.

Assim como foi observado quanto ao sequestro de carbono pelas florestas, as subtrações que devem ser feitas para obter os resultados de remoções líquidas não são as melhores quando simulado com a rotação de corte adotado na empresa. Observou que as subtrações são insignificantes sob as condições simuladas, correspondendo no máximo a 2,55% do sequestro de carbono.

Avaliando somente as regiões A, B, C, D que tiveram simulações completas do modelo, sob as condições apresentadas e almejando maior resultado de remoções líquidas de CO₂ do projeto, a região A deveria adotar a rotação de corte de 6 anos, e as regiões B, C, D deveriam adotar ciclo de 5 anos. Isto sem considerar as exigências fisiológicas da madeira para os diversos usos ao qual o reflorestamento tenha sido implementado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABER, J.D.; NADELHOFFER, K.J.; STEUDLER, P.; MELILLO, J.M. 1989. **Nitrogen saturation in northern forest ecosystems**. *BioScience*, 39, 378–386.
- ABER, J.D.; MCDOWELL, W.; NADELHOFFER, K.J.; et al. 1998. **Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems**. *Hypotheses revisited*. *BioScience*, 48, 921–934.
- AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. 2004. **Biologia dos organismos: a diversidade dos seres vivos – Anatomia e fisiologia de plantas e animais**. 2 Ed. São Paulo: Moderna, 617p.
- ANAND, S.; VRAT, P.; DAHIYA, R. P. 2006. **Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry**. *Journal of Environmental Management*, 79, 383–398.
- ANAND, S.; DAHIYA, R. P.; VRAT, P. 2005. **Investigations of methane emissions from rice cultivation in Indian context**. *Environment International* 31, 469-482
- ANGELI, A. Indicações para escolha de espécies de *Eucalyptus*. 2005. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/eucalyptus/indicacoes.asp>>. Acessado em: 20/07/2011.
- APAYDIN, O., GONULLU, M. T. 2008. **Emission control with route optimization in solid waste collection process: A case study**. *Sādhanā*, 33, p.71–82.
- ATHANASSIADIS, D.; LIDESTAV, G.; NORDFJELL, T. 2002. **Energy use and emissions due to the manufacture of a forwarder**. *Resource, Conservation and Recycling*, v.34, p.149–160.
- ATHANASSIADIS, D. 2000. **Energy consumption and exhaust emissions in mechanized timber harvesting operations in Sweden**. *Science of the Total Environment*, 255, 135-143p.
- BACKÉUS, S.; WIKSTRÖM, P.; LÄMÅS, T. 2006. **Modeling carbon sequestration and timber production in a regional case study**. *Silva Fennica*. 40, p.615–629.
- BACKÉUS, S.; WIKSTRÖM, P.; LÄMÅS, T. 2005. **A model for regional analysis of carbon sequestration and timber production**. *Forest Ecology and Management*. 216, p.28–40.
- BARROS, M. de O. 2001. **Gerenciamento de Projetos Baseado em Cenários: Uma Abordagem de Modelagem Dinâmica e Simulação**. Tese (Doutorado) — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- BASSETTO, L. I.; GUELBERT, T. F.; KOVALESKI, J. L.; LESZCZYNSKI, S. A. C.; LIMA, I. A. de. 2006. **Crédito de Carbono: uma moeda ambiental como fator de motivação econômica**. *Anais XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Ceará.
- BASKENT, E.Z.; KELES, S. 2009. **Developing alternative forest management planning strategies incorporating timber, water and carbon values: an examination of their interactions**. *Environmental Modeling & Assessment*. 14, p.467–480.
- BASKENT, E.Z.; KELES, S; YOLASIĞMAZ, H.A. 2008. **Comparing multipurpose forest management with timber management, incorporating timber, carbon and oxygen values: a case study**. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 23, p.105–120.

- BERG, S.; LINDHOLM, E.L. 2004. **Energy use and environmental impacts of Forest operations in Sweden**. Journal of Cleaner Production, v.13, n.1, p.33 – 42.
- BERG, S.; KARJALAINEN, T. 2003. **Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden**. Forestry, 76, 271_284.
- BERG, S.; LINDHOLM, E.-L. 2005. **Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden**. Journal of Cleaner Production, 13, 33_42.
- BOINA, A. **Quantificação dos estoques de biomassa e de carbono em floresta estacional semidecidual, Vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 2008. 98p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- BORŠTNAR, M. K.; KLJAJIĆ, M.; ŠKRABA, A.; KOFJAČA, D.; RAJKOVIČA, V. 2011. **The relevance of facilitation in group decision making supported by a simulation model**. System Dynamics Review, 27, 3, 270–293.
- BRIDGES, T.C.; SMITH, E.M. 1979. **A method for determining the total energy input for agricultural practices**. Transactions of the ASAE, v.22. p.781 – 784.
- BRINKER, R.W.; KINARD, J.; RUMMER, B.; LANFORD, B. 2002. **Machine rates for selected Forest harvesting machines**. Circular 296 (revised). Auburn University, Auburn, AL.
- BROWN, S.; LUGO, A.; CHAPMAN, J. 1986. **Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget**. Canadian Journal of Forestry Research, v.16, p.390-394.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. 1984. **Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes**. Science, Washington, DC, n. 223, p. 1290-1293.
- BROWN, S. 1997. **Los bosques y el cambio climático: el papel de terrenos forestales como sumidouro de carbono**. Ankara, Turquia: Congresso Florestal Mundial, p.107-121.
- BURLA, E. R. **Mecanização de atividades silviculturais em relevo ondulado**. Belo Oriente: Cenibra, 144p, 2001.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. 2013. **Mensuração Florestal**. 4ª Ed. Viçosa: Ed. UFV, 548p.
- CANADELL, J.G.; RAUPACH, M.R. 2008. **Managing forests for climate change mitigation**. Science 320, 1456–1457.
- CANNELL, M.G.R. 1999. **Growing trees to sequester carbon in the UK: answers to some common questions**. Forestry, 72, (3), p.237–247.
- CARTY, J.; AHERN, A. 2011. **Introducing a transport carbon dioxide emissions vulnerability index for the Greater Dublin Area**. Journal of Transport Geography, 19, p.1059-107.
- CAVANA, R.Y.; CLIFFORD, L.V. 2006. **Demonstrating the utility of system dynamics for public policy analysis in New Zealand: the case of excise tax policy on tobacco**. *System Dynamics Review* 22(4): 321–348.
- CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. 2002. **Roteiro básico para a elaboração de um projeto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL**. Rio de Janeiro, 52p.

- CENAMO, M. C. **Mudanças Climáticas, o Protocolo de Quioto e Mercado de Carbono**. 2004. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/protocolo_quioto.pdf>. Acessado em: 07 de fevereiro de 2011.
- CENTER FOR CLIMATE STRATEGIES. **Final Florida Greenhouse Gas Inventory and Reference Case Projections: 1990–2025**. Report for the Florida Department Environmental Protection (DEP). 2008.
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Manual de capacitação sobre mudança climática e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)**. 1ª Ed. Brasília: CGEE, 2008.
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Manual de capacitação sobre mudança climática e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)**. Ed. revis. e atual. Brasília: CGEE, 2010.
- CHOMITZ, K.M. 2000. **Evaluating Carbon Offsets from Forestry and Energy Projects: How Do They Compare?** Development Research Group, The World Bank, Washington, DC, USA, 25 pp.
- COOPER, C. F. 1983. **Carbon storage in managed forest**. Canadian Journal of Forest Research, Ottawa, v. 13, n. 1, p. 155-165.
- CORTE, A. P. D. **Metodologia para detecção da elegibilidade, linha de base e monitoramento de projetos de MDL Florestal**. 2005. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CROPPER JR. W.P.; EWEL, K.C. 1987. **A regional carbon storage simulation for largescale biomass plantations**. Ecological Modeling 36, 171–180.
- DAMEN, K. **Future prospects for biofuel production in Brazil. A chain analysis comparison of ethanol from sugarcane and methanol from eucalyptus in São Paulo State**. 2001. Utrecht: Utrecht University, Department of Science Technology and Society, Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, 68p.
- DANTZIG, G. B. **Linear programming and extensions**. Princeton NJ: Princeton University Press, 1963.
- DIAS, A. C.; ARROJA, L.; CAPELA, I. 2007a. **Life cycle assessment of printing and writing paper produced in Portugal**. International Journal of Life Cycle Assessment, 12, 7, 521-528.
- DIAS, A.C.; ARROJA, L.; CAPELA, I. 2007b. **Carbon dioxide emissions from forest operations in Portuguese eucalypt and maritime pine stands**. Scandinavian Journal of Forest Research, 22, 5, 422-432.
- DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C. 2003. **Forest management optimisation models when carbon captured is considered: a goal programming approach**. Forest Ecology and Management. 174, p.447–457.
- FAGERHOLT, K. 1999. **Optimal fleet design in a ship routing problem**. International Transactions in Operational Research, 6, p.453–464.
- FAHEY, L.; RANDAL, R. M. **Learning from the Future**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

- FAO. **Watershed management field manual**: Road design and construction in sensitive watershed. Rome, 218p, 1989.
- FERNANDES, A.C. **Scorecard Dinâmico – Em direção à Integração dinâmica de sistemas com o Balanced Scorecard**. COPPE, UFRJ, RJ. 2003.
- FIDDAMAN, T.S. 1997. **Feedback complexity in integrated climate–economy models**. Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- FIDDAMAN, T.S. 2002. **Exploring policy options with a behavioral climate–economy model**. *SystemDynamics Review* 18(2): 243–267.
- FIGUEIREDO, R. S. **Prefácio**. In: ZAMBOM, A. C. *Análise de Fundo de Pensão: Uma abordagem de System Dynamics*. Rio de Janeiro: Funenseg, 128p., 2000.
- FISHER, B.S.; et al., 2007. **Issues related to mitigation in the long term context**. In: Metz, B.; Davidson, O.R.; Bosch, P.R.; Dave, R.; Meyer, L.A. (Eds.). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 169–250.
- FORD, A. 1996. **Testing snake river explorer**. *System Dynamics Review* 12, 305–329
- FORD, A. 1997. **System dynamics and the electric power industry**. *System Dynamics Review* 13(1): 57–85.
- FORD, A. 2005. **Simulating the impacts of a strategic fuels reserve in California**. *Energy Policy* 33: 483–498.
- FORRESTER, J. W. **Urban Dynamics**. EUA: Pegasus Communications, 1969, 285p.
- FORRESTER, J. W. **World Dynamics**. EUA: Pegasus Communications, 1971, 144p.
- FORRESTER, J. W. **Principles of Systems**. 2a, Wright Allen Press. Cambridge. MA. 1976.
- FOX, T.R.; JOKELA, E.J.; ALLEN, H.L. 2007. **The development of pine plantation silviculture in the southern United States**. *Journal of Forestry* 105, 337–347.
- FU, M.C. **Optimization for simulation: Theory VS. Practice**. *Journal on Computing*, vol. 14, n 3, 2002.
- GARREN, S.J.; et al. 2011. **Carbon dioxide emission trends in cars and light trucks: A comparative analysis of emissions and methodologies for Florida’s counties (2000 and 2008)**. *Energy Policy*. v(_), p. (_-).
- GHAFFARZADEGAN, N. 2008. **How a system backfires: dynamics of redundancy solution in security**. *Risk Analysis* 28(6): 1669–1687.
- GHAFFARZADEGAN, N.; LYNEISB, J.; RICHARDSON, G. P. 2011. **How small system dynamics models can help the public policy process**. *System Dynamics Review* vol 27, No 1 (January–March): 22–44p.
- GIFFORD, R. M. Carbon Contents of above-ground tissues of forest and woodland tree. **National Carbon Accounting System Technical Report**, n 22. Australian Greenhouse Office, Canberra. 2000.
- GOH, Y. M.; LOVE, P. E. D. 2012. **Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy**. *Safety Science*, 50, 1594–1605.

- GOLDEMBERG, J. **S.O.S. Planeta Terra – O efeito estufa**. São Paulo: Ed. Brasiliense, 72p.,1989.
- GONÇALVES, J. L. M. Conservação do solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações de florestas**. Piracicaba: IPEF, Cap. 2, p.47-129, 2002.
- GONZALEZ-BENECKE, C. A.; MARTIN, T. A.; CROPPER JR., W. P.; BRACHO, R. 2010. **Forest management effects on *in situ* and *ex situ* slash pine Forest carbon balance**. *Forest Ecology and Management*, 260, 795-805.
- GOUDRIAAN, J. Adónde va el gás carbônico? : el papel de La vegetación. **Mundo Científico**, v.126, n.12, p.687-692, 1992.
- GRIMM, A. M. **Mudanças Climáticas antrópicas e variações climáticas naturais**. Revista Parcerias Estratégicas/ Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Ed. Especial. Brasília: v.15, n.31, jul-dez, 205-210, 2010.
- GUITART, A. B.; RODRIGUEZ, L. C. E. 2010. **Private valuation of carbon sequestration in Forest plantations**. *Ecological Economics* 69, 451-458.
- GUNAL, M. M. 2012. **A guide for building hospital simulation models**. *Health Systems*, x, 1-9.
- GUNERALP, B.; BARLAS, Y. 2003. **Dynamic modelling of a shallow fresh water lake for ecological and economic sustainability**. *Ecological Modelling* 167, 115-138.
- GUO, H.C.; LIU, L.; HUANG, G.H.; FULLER, G.A.; ZOU, R.; YIN, Y.Y. 2001. **A system dynamics approach for regional environmental planning and management. A study for the lake Erhai Basin**. *Journal of Environmental Management*. 61, 93-111p.
- GUTIERREZ, M. B. O Mercado de Carbono e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: a necessidade de um marco regulatório/institucional para o Brasil. In: **Regulação e Concorrência no Brasil: Governança, Incentivos e Eficiência**. MOTTA, R. S.; SILVA, L. H. S. (Orgs.) Rio de Janeiro: IPEA, p. 271-288, 2007.
- HAWKINS, T. R.; DENTE, S. R. 2010. **Greenhouse Gas Emissions Driven by the Transportation of Goods Associated with French Consumption**. *Environmental Science & Technology*, 44, n. 22, 8656-8664p.
- HARREL, C.R.; GHOSH, B.K.; BOWDEN, R. **Simulation using Promodel**. McGraw-Hill, 2000.
- HETZ, E. J. Energy utilization in chilean agriculture. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, v.23, n.2, p. 52 – 56, 1992.
- HOEN, H.; SOLBERG, B. Potencial and economic efficiency of carbon sequestration in Forest biomass through silvicultural management. **Forest Science**, v.40, n.3, p. 429-451, 1994.
- HOFFMANN, R.; BERGER, R.. 1973. **Determinação da idade ótima de corte de povoamentos de Eucalyptus**. IPEF n.7, p.49-69.
- HOFFMANN, R.; THAME, A. C. de M.. 1970. **Determinação da Idade ótima para Primeiro Desbaste em Povoamentos de Pinus caribaeae**. *AgroEconômico*. Brasília, Ano II, n.o 2.
- HOMER, J.; HIRSCH, G.; MINNITI, M.; PIERSON, M. 2004. **Models for collaboration: how system dynamics helped a community organize cost-effective care for chronic illness**. *System Dynamics Review*, 20(3): 199-222p.

- HOMER, J.; HIRSCH, G.; MILSTEIN, B. 2007. **Chronic illness in a complex health economy: the perils and promises of downstream and upstream reforms.** *System Dynamics Review*, 23(2–3): 313–343p.
- HOMER, J.; RITCHIE-DUNHAM, J.; RABBINO, H.; PUENTE, L.; JORGENSEN, J.; HENDRICKS, K. 2000. **Toward a dynamic theory of antibiotic resistance.** *System Dynamics Review*, 16(4): 287–319p.
- HONGGANG, X.; MASHAYEKHI, A.N.; SAEED, K. 1998. **Effectiveness of infrastructure service delivery through earmarking: the case of highway construction in China.** *System Dynamics Review*, 14(2–3): 221–255p.
- HUANG, C.; KRONRAD, G.G. 2001. **The cost of sequestering carbon on private forest lands.** *Forest Policy and Economics* 2, 133–142.
- HYVÖNEN, R.; ÅGREN, G.; LINDER, S.; et al. 2007. **The likely impact of elevated CO₂, nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review.** *New Phytologist*, 173, 463–480.
- INGERSLEV, M.; MÄLKÖNEN, E.; NILSEN, P.; NOHRSTEDT, H-Ö; OSKARSSON, H.; RAULUND-RASMUSSEN, K. 2001. **Main findings and future challenges in forest nutritional research and management in the Nordic countries.** *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16, 488–501.
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change. Land Use, Land-Use Change, and Forestry.* A Special Report of the IPCC [WATSON, R.T.; et al.] Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, 377p, 2000a.
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change. Good Practice Guidance and Uncertainly Management in National Greenhouse Gas Inventories.* IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Montreal, 2000b.
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change.* In: Eggleston, B.L., Miwa, H.S., Ngara, K., Tanabe K., T. (Eds.), 2006 **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, vols. 1–5. National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, Japan. 2006.
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: the physical basis.* Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acessado em: 12 de junho de 2011a.
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability.* Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acessado em: 12 de junho de 2011b.
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change.* 2002. **Climate Change 2001: Mitigation.** Cambridge University Press, Cambridge, 762 pp.
- JOHNSON, K.H.; WEAR, D.N.; OREN, R.; TESKEY, R.O.; SANCHEZ, F.; WILL, R.E.; BUTNOR, J.; MARKEWITZ, D.; RICHTER, D.; RIALS, T.; ALLEN, H.L.; SEILER, J.; ELLSWORTH, D.; MAIER, C.; KATUL, G.; DOUGHERTY, P.M. 2001. **Carbon sequestration and southern pine forests.** *Journal of Forestry* 99, 14–21.
- KALLBEKKEN, S.; FLOTTORPA LINE, S.; RIVEA, N. 2007. **CDM baseline approaches and carbon leakage.** *Energy and Policy* 35, 4154–4163.
- KARAVEZYSIS, V.; TIMPE, K.P.; MARZI, R. 2002. **Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste.** *Mathematics and Computers in Simulation* 2071, 1–10p.

- KARJALAINEN, T.; ASIKAINEN, A. 1996. **Greenhouse gas emissions from the use of primary energy in Forest operations and long – distance transportation of timber in Finland.** *Forestry*, 69, 3, p.215 – 228.
- KAYO, C., ARAMAKI, T.; HANAKI, K. 2011. **Effect of Change of Forest Carbon Storage on Net Carbon Dioxide Balance of Wood Use for Energy in Japan.** *Journal of Industrial Ecology*, 15, 1, 122-136p.
- KELES, S. 2010. **Forest optimisation models including timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: a case study.** *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 17, 6, p.468–474.
- KELES, S.; BASKENT, E.Z. 2007. **Modeling and analyzing timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: a case study.** *Polish Journal of Environmental Studies*. 16, p.473–479.
- KENNEDY, C., STEINBERGER, J., GASSON, B., HANSEN, Y., HILLMAN, T., HAVRANEK, M., PATAKI, D., PHDUNGSILP, A., RAMASWAMI, A., VILLALBA MENDEZ, G. 2010. **Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities.** *Energy Policy*, 30, 4828–4837.
- KHANDEKAR, M. L.; MURTY, T. S.; CHITTIBABU, P. 2005. **The global warming debate: a review of the state of science.** *Pure appl. Geophys.*, v.162, n8-9, p.1557-1586.
- KIM, D. **Introduction to System Thinking.** Toolbox Reprint Series, Pegasus Communications, Inc., 1998.
- KLVAC, R.; WARD, S.; OWENDE, P. M. O.; LYONS, J. 2003. **Energy audit of wood harvesting systems.** *Scandinavian Journal of Forest Research*, 18, p. 176-183.
- KIRKWOOD, C. W. *System Dynamics Methods: A Quick Introduction.* 1998. Disponível em: <www.public.asu.edu/~kirkwood/sysdyn/SDIntro/SDIntro.htm>. Acessado em: 01/06/2011.
- KNOP, I. **Infra-estrutura para simulação de processos de software baseada em metamodelos de dinâmica de sistemas.** 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- KRCMAR, E.; STENNES, B.; VAN KOOTEN, G.C.; VERTINSKY, I. 2001. **Carbon sequestration and land management under uncertainty.** *European Journal of Operational Research*, 135, p.616–629.
- KRCMAR, E.; VAN KOOTEN, G.C.; VERTINSKY, I. 2005. **Managing forest and marginal agricultural land for multiple tradeoffs: compromising on economic, carbon and structural diversity objectives.** *Ecological Modelling*, 185, p.451–468.
- KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do Pinus no Brasil.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 160p, 2005.
- KRUG, T. **Estudo: Oportunidades de Projetos de Reflorestamento no MDL - algumas reflexões.** CGEE: 21P, 2004.
- KUMAR, S.; NIGMATULLIN, A. 2011. **A system dynamics analysis of food supply chains – Case study with non-perishable products.** *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 2151–2168.
- KUO, Y. Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 59, p. 157–165, 2010.

- KWON, T. H. 2005. **Decomposition of factors determining the trend of CO₂ emissions from car travel in Great Britain (1970–2000)**. *Ecological Economics*, 53, 261–275.
- LADEIRA, B. C. 1999. **Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de *Eucalyptus spp.* sob três espaçamentos, em uma seqüência de idades**. Viçosa: UFV.
- LANÇAS, K.P. Instrumentos para avaliação do desempenho operacional de tratores e variabilidade espacial dos solos. In: GONÇALVES, J. L. M. STAPE, J.L. (Ed.) **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. 498p.
- LISKI, J.; PUSSINEN, A.; PINGOUD, K.; MÄKIPÄÄ, R.; KARJALAINEN, T. 2001. **Which rotation length is favorable to carbon sequestration?** *Canadian Journal of Forest Research* 31, 2004–2013.
- LUGO, A.; GUCINSKI, H. Function, effects and management of forest roads. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.133, p.249-262, 2000.
- MACHADO, C. C. (Ed.). **Estradas Florestais**. Viçosa: Ed. UFV, 2011.
- MACHADO, C. C.; LOPES, E. da S.; BIRRO, M. H. B.; MACHADO, R. R. **Transporte Rodoviário Florestal**. 2ª Ed. Viçosa: Ed. UFV, 217p, 2009.
- MACHADO, C. C. (editor). **Colheita Florestal**. 2ª Ed. Viçosa: Ed. UFV, 501p, 2008.
- MACHADO, C. C. **Exploração Florestal**. Viçosa: Imprensa Universitária, v.3, 60p, 1984.
- MADACHY, R. **Software Process Dynamics**. [S.l.]: IEEE Press Wiley-InterScience, 2008. ISBN 978-0471274551.
- MAGILL, A.H.; ABER, J.D.; HENDRICKS, J.; BOWDEN, R.; MELILLO, J.M.; STEUDLER, P. 1997. **Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition**. *Ecological Applications*, 7, 402–415.
- MALACZYNSKI, J. D.; DUANE, T. P. 2009. **Reducing greenhouse gas emissions from vehicle miles traveled: integrating the california environmental quality act with the California Global Warming Solutions Act**. *Ecology Law Quarterly*. v.36, p.71–136.
- MALMSHEIMER, R.W.; HEFFERNAN, P.; BRINK, S.; CRANDALL, D.; DENEKE, F.; GALIK, C.; GEE, E.; HELMS, J.A.; MCCLURE, N.; MORTIMER, M.; RUDELL, S.; SMITH, M.; STEWART, J. 2008. **Forest management solutions for mitigating climate change in the United States**. *Journal of Forestry* 106, 115–171.
- MARAŠ, V. Determining optimal transport routes of inland waterway container ship. **Transportation Research Record**, 2026, p.50–58, 2008.
- MARKEWITZ, D. 2006. **Fossil fuel carbon emissions from silviculture: impacts on net carbon sequestration in forests**. *Forest Ecology and Management* 236, 153–161.
- MARLAND, G.; MARLAND, S. 1992. **Should we store carbon in trees?** *Water, Air and Soil Pollution* 64, 181–195.
- MARLAND, G.; SCHLAMADINGER, B.; CANELLA, L. 1997. **Forest management for mitigation of CO₂ emissions: how much mitigation and who gets the credits?** *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2, 303–318.
- MARTINELLI, L. A. et al. **Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais. Seminário Emissão x Seqüestro de CO₂ – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil**, Rio De Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CURD, 1994, p. 197-221.

- MARTINEZ-MOYANO, I.J.; RICH, E.; CONRAD, S.; ANDERSEN, D.F.; STEWART, T.R. 2008. **A behavioral theory of insider-threat risks: a system dynamics approach.** *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 18(2): Article 7.
- MASHAYEKHI, A.N. 1998. **Public finance, oil revenue expenditure and economic performance: a comparative study of four countries.** *System Dynamics Review* 14(2-3): 189-219.
- MASHAYEKHI, A.N. 1993. **Transition in New York state solid waste system: a dynamic analysis.** *System Dynamics Review* 9, 23-48.
- MATTAR, F. N. **Pesquisa de Marketing.** São Paulo: Atlas, 1996, 270p.
- MATTSSON, J.E. 1979. **Energy of Forest machines and in Swedish forestry as a whole.** In: Seminar on Energy aspects of the Forest Industries, Udine, 1979. Proceedings. Oxford: Pergamon Press, p.321 - 300.
- MCCARNEY, G. R.; ARMSTRONG, G. W.; ADAMOWICZ, W. L. 2008. **Joint production of timber, carbon, and wildlife habitat in the Canadian boreal plains.** *Canadian Journal of Forest Research*. 38:1478-1492.
- MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia. 2009. **O mecanismo de desenvolvimento limpo: guia de orientação 2009.** Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio: FIDES, 2009. 131 p. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0205/205947.pdf>. Acesso em: 04/5/2011.
- MEADOWS, D.H.; MEADOWS, D.L.; RANDERS, J.; BEHRENS, W.W. 1972. **The Limits to Growth.** Universe: New York.
- MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. de; FIEDLER, N. C.; SILVA, E. N. de. Carregamento e Descarregamento. In: MACHADO, C. C. (editor). **Colheita Florestal.** 2ª Ed. Viçosa: Ed. UFV, 501p, 2008.
- MOHAPATRA, P. K. J.; MANDAL, P. E.; BORA, M. C. **Introduction to System Dynamics Modelling,** Hyderabad, Universities Press of India. 1994.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 463p.
- MURRAY, B. C. et al. 2012. **Alternative approaches to addressing the risk of non-permanence in Afforestation and Reforestation projects under the Clear Development Mechanism. Final Report.** Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions. Duke University
- NABUURS, G.J. et al., 2007. **Forestry.** In: Metz, B.; Davidson, O.R.; Bosch, P.R.; Dave, R.; Meyer, L.A. (Eds.). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- NAILL, R.F.; GELANGER, S.; KLINGER, A.; PETERSEN, E. 1992. **An analysis of cost effectiveness of US energy policies to mitigate global warming.** *System Dynamics Review* 8, 111-118.
- NANTHAVANIJ, S.; BOONPRASURT, P.; JARUPHONGSA, W.; AMMARAPALA, V. Vehicle routing problem with manual materials handling: Flexible delivery crew vehicle assignments. In: **Proceeding of the 9th Asia Pacific industrial engineering and management system conference,** Nusa Dua, Bali, Indonesia. 2008.

- NEWELL, R.G.; STAVINS, R.N. 2000. **Climate change and forest sinks: factors affecting the costs of carbon sequestration.** Journal of Environmental Economics and Management. 40:211–235.
- NIESTEN, E.; FRUMHOFF, P.C.; MANION, M.; HARDNER, J.J. 2002. **Designing a carbon market that protects forests in developing countries.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 360, 1875–1888.
- OLIVEIRA, E. de F. dos S.; ANDRADE, S. A. **A comercialização de crédito de carbono através da redução de emissão de gases do efeito estufa: alguns casos no Espírito Santo.** Revista de Interação e Debate Acadêmico – RIDA. Ano 1, v. 2, p. 34-49, 2009.
- ORTIZ, R. **Costa Rican secondary Forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO₂.** Draft paper presented for inclusion in the Beijer Seminar in Punta Leona. Costa Rica, 19p, 1997.
- PAIVA, H. N. de; JACOVINE, L. A. G.; RIBEIRO, G. T.; TRINDADE, C. **Cultivo de Eucalipto em Propriedades Rurais.** Viçosa: Aprenda Fácil Editora, 138p, 2001.
- PAIXÃO, F. A. **Quantificação do estoque de carbono e a avaliação econômica de alternativas de uso de um povoamento de eucalipto.** 2004. 62f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- PAPAGIANNAKI, K.; DIAKOULAKI, D. 2009. **Decomposition analysis of CO₂ emissions from passenger cars: The cases of Greece and Denmark.** Energy Policy, 37,3259–3267.
- PARAVANTIS, J. A.; GEORGAKELLOS, D. A. 2007. **Trends in energy consumption and carbon dioxide emissions of passenger cars and buses.** Technological Forecasting and Social Change, 74, 682–707.
- PEDRO, M. V. **JLinkIt: Desenho e implementação de um ambiente de modelagem computacional para o ensino.** Dissertação (Mestrado) — Núcleo de Computação Eletrônica, Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- PETERSEN, A.K.; SOLBERG, B. **Greenhouse gas emissions and costs over the life cycle of wood and alternative flooring materials.** Climate Change, 64, p.143–167, 2004.
- PETERSEN, A. K.; SOLBERG, B. 2002. **Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction. Case: Beams at Gardermoen airport.** Environmental Science and Policy, 5, 169_ 182.
- PINTO, M. A. C.; et al.2008. **Modelagem econômica para análise de perspectivas no mercado de créditos de carbono.** Revista BNDES. v.14, n.29, p.112-156.
- PLANTAR S.A. 2009. **Formulário do documento de concepção do projeto para atividades de projetos de florestamento e reflorestamento (CDM-AR-PDD).** Reflorestamento como Fonte Renovável de Suprimento de Madeira para Uso Industrial no Brasil, Versão 4. 231 pg
- PLATINGA, A.J.; BIRDSEY, R.A. Optimal forest stand management when benefits are derived from carbon. **Natural Resource Modelling.** 8:373–387, 1994.
- PORTAL BRASIL. **Como funciona o mercado de crédito de carbono.** Disponível em <<https://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/entenda-como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono>>. Acessado em: 23 de maio de 2014.
- PRADO, D. **Programação Linear.** Nova Lima: INDG, 2004, 238p.

- PUETTMANN, M.; WILSON, J.. 2005. **Life-cycle analysis of wood products: Cradle to gate LCI of residential wood building materials**. Wood and Fiber Science 37:18 –29.
- RADZICKI, M.J. **Introduction to System Dynamic: A system approach to understanding Complex Policy Issues** (Versão 1.0), US Department of Energy, 1997. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/DL-IntroSysDyn>>. Acessado em: 01/06/2011
- RADZICKI, M J.; TAYLOR, R. A. 2008. **Origin f System Dynamics: Jay W. Forrester and the History of System Dynamics**. In: *U.S. Department of Energy's Introduction to System Dynamics*. Retrieved 23 Oktober 2008.
- RAMÍREZ, O.; GÓMEZ, M.; SHULTZ, S. **Valuing the contribution of plantation forestry to the national accounts of Costa Rica from the ecological economics perspective**. Beijer Research Seminar. Costa Rica, 28p., 1997.
- RAVINDRANATH, N.H. ; OSTWALD, M. **Carbon inventory methods**: Handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects. Springer, 304p. 2008.
- RAYMER, A.K.P.; GOBAKKEN, T.; HOEN, H.F.; SOLBERG, B. **Optimal forest management and cost-effectiveness when increasing the carbon benefit from a forest area: a case study of Hedmark County in Norway**. Manuscript. In: A.K.P. Raymer, editor. Modeling and analyzing climate gas impacts of forest management. [PhD thesis]. [Norway]: Norwegian University of Life Sciences, 2005.
- REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; VALENTE, O. F. **Potencial de sequestro de carbono pelas florestas brasileiras**. Ação Ambiental, Viçosa, v.17, n.21, p.20-22, dez/jan, 2001.
- RENNER, R. M. **Sequestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. 2004. 147f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa d Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- RIBEIRO, S. C. **Quantificação do estoque de biomassa e análise econômica da implementação de projetos visando a geração de créditos de carbono em pastagens, capoeira e floresta primária**. 2007. 139p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- RICHARDS, K.; STOKES, C. 2004. **A review of carbon sequestration cost studies: a dozen years of research**. Climatic Change 63, 1–48.
- RICHARDSON, G. 1986. **Problems with causal-loop diagrams**. System Dynamics Review, v.2, n.2, 158-169p.
- RICHARDSON, G.P. 1983. **Heroin addiction and its impact on the community**. In *Introduction to Computer Simulation: A System Dynamics Approach*, Roberts N et al. (eds). Addison-Wesley: Reading, MA; 419–438 (Now available from Pegasus Communication, Waltham, MA).
- RICHARDSON, G.P. 2007. **How to anticipate change in tobacco control systems**, in *Greater than the Sum: Systems Thinking in Tobacco Control*, Best A, Clark PI, Leischow SJ, Trochim WMK (eds). National Cancer Institute, US Department of Health and Human Services, NIH: Bethesda, MD.
- ROCHA, M. T. **Aquecimento Global e o Mercado de Carbono: uma aplicação do Modelo CERT**. 2003. 196p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

- ROCHA, T. R. O aquecimento global e os instrumentos de mercado para a solução do problema. In: SANGUETA, C. R. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: 89-118, 2002.
- ROUTA, J.; KELLOMA, S.; KILPELÄINEN, A.; PELTOLA, H.; STRANDMAN, H. 2011. **Effects of forest management on the carbon dioxide emissions of wood energy in integrated production of timber and energy biomass**. *Global Change Biology Bioenergy* 3, 6, 483-497.
- SAAB – SCANIA DO BRASIL LTDA. **Desempenho**. Curitiba, 1998. 62p
- SAEED, K. 1998. **Towards Sustainable Development: Essays on System Analysis of National Policy** (2nd edn). Ashgate: Aldershot, UK.
- SAITO, J. R.; FIGUEIREDO, R. S., BATALHA, M. O. **Simulando cadeias agroindustriais**. Anais do II Workshop Brasileiro de Gestão de sistemas Agroalimentares, Ribeirão Preto, p.45-55.
- SAMARA, B. S.; BARROS, J. C. de. **Pesquisa de Marketing: conceitos e metodologia**. São Paulo: Makron Books , 1994, 156p.
- SAMBRACOS, E.; PARAVANTIS, J. A.; TARANTILIS, C. D.; KIRANOUDIS, C. T. 2004. **Dispatching of small containers via coastal freight liners: The case of the Aegean Sea**. *European Journal of Operational Research*, 152, 365–381.
- SANNINO, F. **A Dinâmica em um Projeto de Tecnologia de Grande Porte**. 2006. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. *et al.* (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.
- SANT'ANNA, C. de M.. Corte. In: MACHADO, C. C. (editor). **Colheita Florestal**. 2ª Ed. Viçosa: Ed. UFV, 501p, 2008.
- SANTIN, M. F. C. de L. **Os impactos da demanda por créditos de carbono sobre o mercado de certificações de reduções de emissões no Brasil, no âmbito do Protocolo de Quioto**. 2007. 94f. (Dissertação em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SATOO, T.; MADGWICK, H. **Forest Biomass**. La Haya: Martinus Nijhoff/ Dr. W. Junk Publishers, 152p., 1982.
- SAWYER, J. 1993. **Plantations in the Tropics: Environmental Concerns**. IUCN/UNEP/WWF, Cambridge, UK, 83 pp.
- SAYSEL, A.K.; BARLAS, Y.; YENIG, O. 2002. **Environmental sustainability in na agricultural development project: a system dynamics approach**. *Journal of Environmental Management*, 64, 247–260p.
- SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura. **Relatório Técnico – Fatos e Números do Brasil Florestal**. 2008. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>>. Acessado em 03 de abril de 2011.
- SCARPINELLA, G. A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Quioto**. 2002. 182f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto Eletrotécnica e Energia – IEE, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- SCHLAMADINGER, B.; MARLAND, G. 1996. **Carbon implications of forest management strategies**. In: Apps, M.J., Price, D.T. (Eds.). Forest ecosystems, forest management and the global carbon cycle. Proceedings of a NATO Advanced Research Workshop, NATO ASI Series I, vol. 40, Springer-Verlag, Berlin. pp. 217–232.
- SCHROEDER, P. Carbon storage potential of short rotation tropical tree plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 50, p. 31-41, 1992.
- SCHWAIGER, H.; SCHLAMADINGER, B. 1998. **The potential of fuelwood to reduce greenhouse gas emissions in Europe**. Biomass and Bioenergy, 15, 369–404.
- SCHWAIGER, H.; ZIMMER, B. 2001. **A comparison of fuel consumption and greenhouse gas emissions from forest operations in Europe**. In T. Karjalainen, B. Zimmer, S. Berg, J. Welling, H. Schwaiger, L. Fine'r, et al. (Eds.), Energy, carbon and other material flows in the life cycle assessment of forestry and forest products *Achievements of the working group 1 of the COST action E9 (Discussion Paper 10, pp. 33_53). Joensuu: European Forest Institute
- SCHWARZE, R.; NILES, J.O.; OLEANDER, J. 2002. **Understanding and managing leakage in forest-based greenhouse-ga-mitigation projects**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 360, 1685–1703.
- SEDJO, R., 1989. **Forests to offset the greenhouse effect**. Journal of Forestry 87, 12–15.
- SEDJO, R.; SAMPSON, N.; WISNIEWSKI, J. 1997. **Economics of Carbon Sequestration in Forestry**. CRC Press, New York, 364 pp.
- SEIXAS, F. Extração. In: MACHADO, C. C. (editor). **Colheita Florestal**. 2ª Ed. Viçosa: Ed. UFV, 501p, 2008.
- SERRA, G.E.; HEEZEN, A.M.; MOREIRA, J.R.; GOLDEMBERG, J. **Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas**. São Paulo: Ministério da Indústria e Comércio. Secretaria de tecnologia industrial. 86p. (Relatório final). 1979.
- SERRA, G.E.; GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J.R.; CARVALHO, M.C. **Estudo energético de alternativas brasileiras para produção de energia renovável**. In: CONVENÇÃO UPADI, Santiago, p.378 – 417, 1978.
- SFB – Serviço Florestal Brasileiro. **Floresta do Brasil em resumo 2013: dados 2007-2012**. 188p. Brasília: SBF, 2013
- SGOURIDIS, S.; BONNEFOY, P. A.; HANSMAN, R. J. **Air transportation in a carbon constrained world: Long-term dynamics of policies and strategies for mitigating the carbon footprint of commercial aviation**. Transportation Research - Part A, 45, 1077–1091p. 2011.
- SILVA, R. F. **Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto**. 2007. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- SOLBERG, B. Economic aspects of forestry and climate change. **Common Wealth Forestry Review** 77, (3), p.239–233, 1997.
- SONG, C.; WOODCOCK, C.E. 2003. **A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and land use history**. Ecol. Modell. 164, p.33–47.
- STERMAN, John D. **Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World**. Boston: McGraw-Hill, 2000.

- STERMAN, J.D. 2008. **Risk communication on climate: mental models and mass balance.** *Science*, 322: 532–533p.
- SUITER FILHO, W.; REZENDE, G.C.; TONINELLO, S.L.; DABÉS, A.D. 1982. **Considerações sobre o balanço energético de florestas de eucalipto.** *Silvicultura*, v.8, n.28, p.887 – 890.
- SUNDBERG, U.; SILVERSIDES, C.R (editors). **Operational Efficiency in Forestry – Volume 1: Analysis.** Kluwer Academic Publishers, 219p, 1988.
- SUNDQUIST, E.T.; BURRUSS, R.C.; FAULKNER, S.P.; GLEASON, R.A.; HARDEN, J.W.; KHARAKA, Y.K.; TIESZEN, L.L.; WALDROP, M.P. 2008, **Carbon sequestration to mitigate climate change: U.S. Geological Survey**, Fact Sheet 2008–3097, 4 pp.
- TAMM, C.O. 1991. **Nitrogen in terrestrial ecosystems, questions of productivity, vegetational changes and ecosystem stability.** *Ecological Studies*, 81, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 115 pp.
- TAVEARES, G.; et al. A case study of fuel savings through optimization of MSW transportation routes. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, 19, p.444–454, 2008.
- TAYLOR, A.; LIPPKE, B.; PARK, W. Carbon credit schemes for forest landowners are counterproductive. **Environmental Science & Policy**. v.13, p.150-153, 2010.
- THOMPSON, K.M.; DUINTJER TEBBENS, R.J. 2007. **New analysis says eradicating polio a better option than extended control of the disease.** *Lancet* 369: 1363–1371p.
- THOMPSON, K.M; DUINTJER TEBBENS, R.J. 2008. **Using system dynamics to develop policies that matter: global management of poliomyelitis and beyond.** *System Dynamics Review*, 24(4): 433–449p.
- UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change. Executive Board Meetings.* Disponível em: < <https://cdm.unfccc.int/EB/index.html>>. Acessado em 25 de maio de 2014a.
- UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change. EB22 Annex 15: Clarifications regarding methodologies for afforestation and reforestation CDM project activities.* 2014b.
- UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change. Clean Development Mechanism – Project Cycle.* Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>>. Acessado em: 10 de junho de 2011a.
- UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change. Essential Background.* Disponível em: <http://unfccc.int/essential_background/items/2877.php>. Acessado em: 10 de junho de 2011b.
- UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change. EB28: Metodologia AR-AM0005 – Versão 1.* 2006.
- UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change. Decision 11/ CP7. Land use, land-use change and forestry. Reporto of the Conference of the Parties on its seventh session, held at Marrakesh from 29 october to 10 november 2001.* 2001. Disponível em: <<http://unfccc.int/>> Acessado em: 23 de maio de 2011.

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change. Protocolo de Quioto*. 1997. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>> Acessado em: 18 de maio de 2011.

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change. Clean Development Mechanism – Methodology Booklet*. 2010.

U. S. Department of Energy Report. **Fuel economy guide**. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov>> 2008.

USA EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2005. **Greenhouse Gas Mitigation Potential in U.S.** In: Forestry and Agriculture. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 430-R-05-006.

US EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Inventory of U.S. Green- house Gas Emissions and Sinks: 1990–2009**. 2011b. Disponível em: <http://www.epa.gov/climatechange/emissions/downloads11/US-GHG-Inventory-2011-Complete_Report.pdf>. Acessado em: 26 de março de 2011.

US EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Inventory of U.S. Green- house Gas Emissions and Sinks: 1990–2008**. Washington, D.C, 2010.

VAN KOOTEN, G.C.; GRAINGER, A.; LEY, E.; MARLAND, G.; SOL, B. Conceptual issues related to carbon sequestration: uncertainty and time. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. 27, p.65–82, 1997.

VAN KOOTEN, G.C.; BINKLEY, C.S. DELCOURT, G. Effects of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation Age and supply of carbon services. **American Journal of Agricultural Economics**, 77,(2), p.365–374, 1995.

VITOUSEK, P.M.; HOWARTH, R.W. 1991. **Nitrogen limitation on land and in the sea – how can it occur**. *Biogeochemistry*, 13, 87–115.

VIZAYAKUMAR, K.; MOHAPATRA, P.K.J. 1991. **Environmental impact analysis of a coalfield**. *Journal of Environment Management* 34, 73–93p.

VIZAYAKUMAR, K.; MOHAPATRA, P.K.J. 1993. **Modelling and simulation of environmental impacts of coalfield: system dynamics approach**. *Journal of Environmental Systems*, 22, 59–73p.

VRAT, P.; GUPTA, Y.K.; GUPTA, A. 1993. **A System dynamics study of global warming**. *Proceedings of xviiith National System Conference*, Kanpur.

WEAVER, E.A.; RICHARDSON, G.P. 2006. **Threshold setting and the cycling of a decision threshold**. *System Dynamics Review*, 22(1): 1–26.

WILLIS, H. L., TRAM, H., ENGEL, M. V. **Selecting and Applying Distribution Optimization Methods**, *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 12-17, January 1996.

WU, J.-D.; LIU, J.-C. 2012. **A forecasting system for car fuel consumption using a radial basis function neural network**. *Expert Systems with Applications*, 39, 1883–1888.

WU, J.; BARLAS, Y.; WANKAT, J.L. 1993. **Effect of patch connectivity and arrangement on animal metapopulation dynamics: a simulation study**. *Ecological Modeling*, 65, 221–254p.

YIN, X.; STRUIK, P. C. 2010. **Modelling the crop: from system dynamics to systems biology**. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 61, No. 8, 2171–2183p.

YOUSEFPOUR, R.; HANEWINKEL, M. Modeling of forest conversion planning with an adaptive simulation-optimization approach and simultaneous consideration of the values of timber, carbon and biodiversity. **Ecological Economics**. 68, p.1711–1722, 2009.

YU, C. M. **Seqüestro Florestal de Carbono no Brasil – Dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. 2004. 293p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ZAGONEL, A.A.; ROHRBAUGH, J.W.; RICHARDSON, G.P.; ANDERSEN, D.F. 2004. **Using simulation models to address “what if” questions about welfare reform**. *Journal of Policy Analysis and Management*, 23(4): 890–901.

ZAMBOM, A.C. **A utilização da simulação pela controladoria no apoio à tomada de decisão**. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Contabilidade, Goiânia: Conselho Federal de Contabilidade, 2000.