

**Análise do Ciclo de Vida da Tração Animal em Três Diferentes Cenários de Manejo
Florestal**

Nathalia Bordon Pironato Sia

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de
Bragança para obtenção do Grau de Mestre em
Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação
com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.*

Orientado por

Professor Doutor Artur Jorge de Jesus Gonçalves

Professor Doutor João Brandão Rodrigues

Professora Doutora Cristiane Kreutz

**Bragança
2023**

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas bênçãos que me trouxeram até aqui. Aos meus pais Junior e Taciana, por terem me criado para ser forte e resiliente, para nunca desistir dos meus sonhos e nunca terem medido esforços para que eu pudesse realizar os mesmos. À minha irmã Amanda, por ser meu alicerce na terra. Aos meus avós, quem me ensinaram tanto. Esse trabalho é de vocês.

Agradeço a todos aqueles que passaram em meu caminho durante este ciclo e contribuíram de alguma forma para o meu desenvolvimento, em principal aos que estiveram comigo desde o início e que levarei para a vida, Gabriela Gariani, Julia Castro, Bianca Gabriela, Leticia Varraschin. Aos amigos de Campo Mourão, da Bateria Infernal e da Atlético Demônios do Campo, pelo acolhimento e parceria durante todo esse tempo.

As minhas amigas da infância para a vida, Gabriela, Rayane, Ana Carolina e Fernanda, por sempre estarem presentes, me apoiando e vibrando por todas as conquistas. Ao meu companheiro e melhor amigo Lucas, por ter sido meu porto seguro durante todos esses anos, por me incentivar a ir atrás dos meus sonhos e vivê-los comigo.

Aos meus grandes amigos de Portugal e a “Big House”, foi um prazer enorme ter vivenciado essa experiência incrível com vocês, obrigada por terem sido a minha família durante esse ano e deixarem a estadia mais leve.

Agradeço o meu orientador Professor Doutor Artur Jorge de Jesus Gonçalves por toda confiança e auxílio para o desenvolvimento deste. À minha orientadora Professora Doutora Cristiane Kreutz, por todo apoio desde a época da faculdade. Ao Professor Doutor João Azevedo e ao Professor Doutor João Brandão Rodrigues. À minha colega de laboratório Laís, por ter me ajudado em todos os momentos de dúvidas.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade de me desenvolver a partir do acordo internacional de dupla-diplomação e proporcionar que eu vivesse uma das maiores realizações profissionais junto ao Instituto Politécnico de Bragança que esteve de portas abertas a me receber. Aos professores que tive contato durante esses longos seis anos, vocês foram fundamentais para a minha formação, os meus mais sinceros obrigado.

E por fim a mim mesma, por todo esforço e persistência, para que eu nunca esqueça da minha força, de onde eu vim e onde eu quero chegar!

“Seja forte e corajoso, não temas, nem te espantes, porque o Senhor, teu Deus, é contigo por onde quer que andares”

Josué 1:9

RESUMO

Sabendo das crescentes preocupações ambientais no setor florestal, a utilização da tração animal é vista como um contributo mais favorável para o ambiente em comparação a tração mecânica. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo analisar o uso da tração animal em três diferentes cenários de manejo florestal por meio da análise de ciclo de vida, uma ferramenta de extrema importância para se estimar os impactos ambientais relacionados à um processo ou produto. Dados primários foram adotados de uma atividade prática realizada em campo e que serviu de base para a elaboração dos cenários de manejo florestal utilizando a tração animal, a tração mecânica e uma opção mista. A pesquisa revelou que a tração animal proporciona uma notável redução de 56% nas emissões de CO₂ em comparação com a tração mecânica, devido à sua menor dependência de combustíveis fósseis. Os resultados estimam-se que o cenário com a tração animal e o cenário misto mecanizado-animal, contribuíram em menor quantidade para cinco, das seis categorias analisadas, e, o cenário que apresentou o melhor desempenho ambiental dentro do manejo florestal foi o de tração animal. Contudo, a tração animal apresenta desafios, como a dependência de animais e limitações na capacidade de carga. Para mitigar essas limitações, destaca-se a integração de um sistema misto, combinando tração animal e tratores, como uma abordagem equilibrada para reduzir os impactos ambientais. Além disso, enfatizamos a transição para o uso de biodiesel em máquinas florestais como uma estratégia eficaz na redução das emissões de gases de efeito estufa. Independentemente da escolha de abordagem, a gestão florestal sustentável continua sendo essencial.

ABSTRACT

In light of the escalating environmental concerns within the forestry sector, the utilization of animal traction is regarded as a more environmentally favorable contribution in comparison to mechanical traction. Accordingly, the present study aimed to scrutinize the utilization of animal traction in three distinct forest management scenarios through life cycle analysis, a tool of paramount significance for estimating environmental impacts associated with a given process or product. Primary data were derived from a field-based practical activity, forming the foundation for crafting forest management scenarios involving animal traction, mechanical traction, and a mixed option. The research unveiled that animal traction yields a noteworthy 56% reduction in CO₂ emissions as opposed to mechanical traction, attributable to its diminished reliance on fossil fuels. The findings postulate that both the animal traction scenario and the mechanized-animal mixed scenario made lesser contributions to five out of the six analyzed categories. Notably, the animal traction scenario demonstrated the most commendable environmental performance within the domain of forest management. Nevertheless, animal traction poses challenges, such as reliance on animals and limitations in load capacity. To alleviate these constraints, the integration of a mixed system, amalgamating animal traction and tractors, is underscored as a judicious approach to curbing environmental impacts. Furthermore, we underscore the transition to the use of biodiesel in forestry machinery as an efficacious strategy in abating greenhouse gas emissions. Irrespective of the chosen approach, the imperative of sustainable forest management remains unabated.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	4
1.1. Objetivos.....	6
1.1.1. Objetivo geral.....	6
1.1.2. Objetivos específicos.....	6
1.2. Estrutura da Dissertação	7
2. Revisão Bibliográfica.....	4
2.1. Setor Florestal.....	4
2.1.1. Gestão Florestal Sustentável	5
2.1.2. Operações Florestais	6
2.1.3. Impactos Ambientais das Operações Florestais	7
2.2. Modelação de Povoamento Florestal.....	9
2.3. Tração Animal	10
2.3.1. Evolução histórica.....	10
2.3.2. Benefícios Socioeconômicos e Ambientais	11
2.4. Avaliação do Ciclo de Vida.....	14
2.4.1. Definição do Objetivo e Âmbito	16
2.4.2. Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	17
2.4.3. Avaliação de Impacto.....	18
2.4.4. Interpretação da ACV.....	20
2.4.5. ACV da Produção Florestal.....	21
3. Metodologia	23
3.1. Recolha de dados primários.....	23
3.2. Dados Florestais	25
3.3. Cenários.....	27
3.4. ACV Aplicada à gestão florestal	28

3.4.1.	Definição de objetivo e âmbito	28
3.4.2.	Unidade Funcional	29
3.4.3.	Limites do Sistema	29
3.4.4.	Inventário do Ciclo de Vida	29
3.4.5.	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida	30
3.4.6.	Categorias de Impacto	30
3.4.7.	Software	34
4.	Resultados e Discussão	34
4.1.	Modelo do Sistema	34
4.2.	Categorias de impacto	35
4.3.	Cenário mecanizado	35
4.4.	Cenário tração animal	37
4.5.	Cenário misto.....	39
4.6.	Comparação de cenários	41
5.	Conclusões	45
	REFERÊNCIAS	45
	ANEXOS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de uma ACV	16
Figura 2 - Procedimentos para o inventário	18
Figura 3 - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.....	19
Figura 4 - Midpoint e Endpoint relacionados	20
Figura 5 - Enquadramento da ACV	21
Figura 6 - Etapa 1: desbaste da árvore	24
Figura 7 - Etapa 2 : carregamento da madeira pelo animal.....	24
Figura 8 - Área adotada como base para o manejo florestal	28
Figura 9 - Fronteiras do Sistema da ACV	29
Figura 10 - Modelagem do cenário mecanizado no Gabi	34
Figura 11 - Modelagem do cenário animal no Gabi	35
Figura 12 - Contribuição dos processos no cenário mecanizado	36
Figure 13 - Contribuição dos processos no cenário animal.....	38
Figura 14 - Contribuição dos processos no cenário misto	40
Figura 15 - Contribuição dos cenários nos impactos da ACV	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução do conceito de sustentabilidade da operação florestal	7
Tabela 2 - Matriz SWOT da utilização de tração animal	11
Tabela 3 - Dados primários coletados	25
Tabela 4 - Dados obtidos através de simulação do FlorNExT®	26
Tabela 5 - Valores absolutos da ACV	35

LISTA DE ABREVIACÕES

PIB – Produto interno bruto

GEE – Gases de efeito estufa

CO₂ – Dióxido de carbono

Nox – Óxidos de nitrogênio

SO₂ – Dióxido de enxofre

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

NP – Norma Portuguesa

ISO – International Organization for Standards

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

APTRAN – Associação Portuguesa de Tração Animal

PT – Portugal

GWP – Global Warming Potential

AICV – Avaliação do Inventário de Ciclo de Vida

AP – Potencial de Acidificação

PAG – Potencial de Aquecimento Global

EP – Potencial de Eutrofização

DAP – Potencial de Depleção Abiótica

CH₄ – Gás Metano

HCFs – Hidrofluorcarbonetos

PFCs - Perfluorados

SF₆ – Hexafluoreto

VOCs – Compostos Orgânicos Voláteis

PO₄ - Fosforo

1. Introdução

A silvicultura é um setor indispensável para as atividades humanas atuais e tem um papel fundamental no desenvolvimento da economia nacional. O setor florestal é altamente dinâmico e empreendedor, buscando investir em diferentes áreas para se modernizar, inovar e enfrentar os desafios emergentes do mercado global atual. Nesse mercado, várias partes interessadas estão envolvidas, incluindo empresas e unidades de pesquisa, entre outros atores. Essas partes estão inseridas nesse setor em constante evolução, adaptando-se às mudanças e características que surgem, a fim de aproveitar as oportunidades e enfrentar os desafios desse ambiente global (ENEI).

As fontes florestais são utilizadas em uma grande diversidade de aplicações e setores, desde a construção até a produção de papel ou energia. Em termos globais, a produção de produtos florestais foi cerca de 3912 milhões de m³ em 2020, em que 49,3% foi para uso de madeira como combustível e 50,7% de madeira industrial usado para produzir produtos (FAO, 2020).

Em Portugal, o setor florestal representa 5% do PIB e tem um papel significativo nas exportações do país, representado por 10% total das exportações no ano de 2022 e resultando em um saldo positivo de aproximadamente 7,1 milhões de euros. Dentre os produtos exportados, a pasta de papel, papel e cartão são os principais, representando cerca de 50% do valor total das exportações. A cortiça e produtos de cortiça também tiveram uma participação significativa, correspondendo a 21% das exportações. Os produtos de madeira, carvão vegetal, mobiliário e obras afins contribuíram com 14% das exportações. Além disso, o setor florestal é responsável pela criação de cerca de 100 mil postos de trabalho (ICNF, s.d.)

A silvicultura é um setor com uma contribuição muito forte para a mitigação dos gases de efeito estufa (GEE) através do sequestro de grandes quantidades de CO₂ pelo cultivo de árvores e armazenamento em madeira e no solo florestal (Chen et al., 2014). Porém, as operações motorizadas e mecanizadas realizadas nas atividades de manejo florestal requerem o uso de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, liberam dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Este gás é responsável por mais de 60% do efeito estufa antrópico, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2001).

O consumo de combustíveis fósseis em motores libera poluentes atmosféricos como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂). Esses poluentes, quando emitidos em quantidades acima do limite, podem contribuir para o aquecimento global,

acidificação e formação de oxidantes fotoquímicos (Dias & Arroja, 2012). Além da emissão de poluentes atmosféricos, o uso do trator em operações florestais ou agrícolas pode resultar em degradação da qualidade do solo e perda de produtividade. Esses tipos de problemas são geralmente encontrados em montanhas ou outras encostas íngremes, onde os solos florestais são pouco desenvolvidos e a espessura do manto do solo é naturalmente baixa (Cerutti et al., 2014).

Sabendo das crescentes preocupações ambientais no setor florestal, a utilização da tração animal é vista como um contributo mais favorável para o ambiente em comparação a tração mecânica. (Cerutti et al., 2014). Desde a origem da agricultura até o presente, a tração animal tem ajudado os seres humanos em vários tipos de atividades. Esses animais, que possuem grande poder muscular, são comumente utilizados para puxar arados e carroças, tal como meios de transporte de mercadorias e pessoas (Alves, 2018).

Engel et al. (2012), calcularam o desempenho ambiental de cavalos de tração para operações florestais usando avaliação do ciclo de vida (ACV) e descobriram que por hectare de floresta explorada, um sistema misto animal mecanizado tinha quase 45% menos emissões de GEE do que um sistema totalmente mecanizado, portanto, no que diz respeito às emissões de GEE, os cavalos geram menores impactos para o clima do que as máquinas de grande porte, apesar de sua menor capacidade de colheita por hectare de abeto.

No nordeste de Portugal, os agricultores tradicionais das zonas de montanha dependem de animais de trabalho, como a lavouras, para ajudar, por exemplo, a colher uvas utilizadas para a produção de vinho e operações de exploração madeireira durante etapas intermédias (Rodrigues et al., 2017). Há ainda alguns casos em que o uso da tração mecânica é difícil ou mesmo impossível de ser utilizado, como em terrenos montanhosos, arrozais e áreas sem estradas ou onde combustíveis fósseis e outros combustíveis líquidos são escassos, sendo o uso de animais para tração e transporte a única alternativa (Alves, 2018). Por outro lado, os animais, em particular os ruminantes, produzem grandes quantidades de metano, um GEE com um potencial de aquecimento global mais elevado do que o CO₂, embora um tempo de vida mais curto.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) apresenta um importante conjunto de ferramentas para quantificar, avaliar, comparar e melhorar produtos e serviços em termos dos seus potenciais impactos ambientais (Kovacic et al., 2016). Conhecer os impactos ambientais causados por cada sistema de manejo florestal seria um trunfo na tomada de decisão de uma transição da mecanização dos animais para o trator ou vice-versa. De acordo com Bosner et al. (2012), em

Capítulo I: Introdução

relação à colheita de madeira, o melhor uso da ferramenta ACV na silvicultura é comparar diferentes sistemas de colheita para selecionar opções ecologicamente corretas.

Apesar da importância significativa da tração animal e dos sistemas florestais em diferentes áreas do mundo, estudos sobre o desempenho ambiental do manejo de sistemas florestais utilizando ACV são muito raros na literatura.

O conhecimento atual sobre as implicações ambientais do uso de métodos alternativos em operações madeireiras deve ainda ser expandido e generalizado. Para isso, são necessárias contribuições de diferentes sistemas e condições geográficas para fornecer aos proprietários florestais, gestores, consultores e autoridades o melhor conhecimento para a tomada de decisões claras e responsáveis na silvicultura. Isto é particularmente relevante em zonas de montanha onde a tração animal é apelativa do ponto de vista económico, mas também como forma de contribuir para outros objetivos de gestão, como a conservação de habitats e espécies, ou a conservação de espécies domesticadas, para além da conservação do património cultural.

Cerca de 40% de Portugal continental é montanhoso, em particular as regiões norte e centro do país, sendo essas também as regiões onde o risco de incêndio é maior e também onde ocorreram incêndios florestais maiores e mais graves (Azevedo et al., 2016). A gestão das florestas é uma prioridade em Portugal e todas as alternativas de gestão devem estar disponíveis para os decisores com base em dados e informações precisas.

1.1.Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o ciclo de vida da utilização da tração animal em diferentes tipos de manejo florestal.

1.1.2. Objetivos específicos

Para alcançar os objetivos gerais, propõem-se como objetivos específicos: a revisão bibliográfica sobre a utilização da tração animal em manejos florestais e na agricultura; identificar e avaliar os impactos ambientais da utilização da tração animal em processos florestais em comparação à tração mecânica; elaborar sugestões de melhorias dentro do processo florestal.

1.2. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação foi estruturada contendo cinco capítulos, sendo esse o Capítulo I, com a introdução, contextualizando o tema que será tratado, e os objetivos deste trabalho; Capítulo II é composto com o referencial teórico, abordando os conceitos necessários para o desenvolvimento deste, como os conceitos de manejo florestal, tração animal e uma apresentação sobre a análise de ciclo de vida; Capítulo III contém os métodos, descrevendo como foi aplicada para a realização do trabalho, com as etapas da análise de ciclo de vida e os dados necessários; Capítulo IV é composto pelos resultados e discussão, que cumprem com o objetivo do trabalho e compara com trabalhos semelhantes, e por último; Capítulo V, com a conclusão do mesmo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Setor Florestal

O setor florestal refere-se a todas as atividades relacionadas à gestão, exploração e utilização dos recursos florestais. Trata-se de um setor econômico que abrange diversas atividades, como a silvicultura, a colheita e processamento de madeira, a produção de produtos florestais não madeireiros, que englobam itens destinados ao consumo humano, como alimentos, bebidas, plantas medicinais, cortiça, resinas, taninos, extratos industriais, além de colaborar com a conservação e restauração de ecossistemas florestais, entre outros.

De acordo com Polzl et al. (2003), o setor florestal possui duas direções organizacionais no segmento madeireiro, uma é denominada direção transversal e envolve os processos de transformação sucessiva da madeira, desde o estado bruto até o estado final, que abrange atividades como silvicultura, colheita florestal, primeira transformação, segunda transformação, terceira transformação e consumo final. Além disso, a cadeia produtiva da madeira pode ser segmentada em três grandes cadeias, com base nas diferentes formas de utilização da madeira bruta, como a energia, processamento mecânico e madeira industrial

A progressão do setor florestal ocorreu com o propósito de identificar a disponibilidade de recursos madeireiros e também de se desenvolver como uma produção de madeira sustentável. Com as mudanças sociais e econômicas, a silvicultura passou a incorporar a sustentabilidade e a multifuncionalidade para atender às novas demandas, buscando reduzir a degradação ambiental e ressaltar a importância das florestas (Carvalho, 2019). Esse conceito foi enfatizado na Alemanha por Dietrich (1941) e outros, nos quais as funções desempenhadas pelas florestas também possuem uma importância intrínseca relacionada ao funcionamento e à vitalidade do ecossistema.

A silvicultura é uma atividade na área das florestas que tem um grande impacto na economia, no meio ambiente e na vida das pessoas que vivem no campo. Ela ajuda a melhorar a vida das comunidades rurais e contribui para o bem do país (Mbuvi e Boon, 2008). A crescente pressão sobre os recursos florestais tem feito surgir desafios significativos para os gestores florestais e ambientais em todo o mundo, que devem encontrar um equilíbrio entre a demanda e a necessidade de proteger esses importantes recursos renováveis (Muhammed et al., 2008a). A partir da necessidade de melhoria no setor florestal foram surgindo políticas voltadas para a gestão florestal sustentável.

Capítulo II: Bibliografia

2.1.1. Gestão Florestal Sustentável

O assunto acerca da gestão sustentável foi promovido a partir da Agenda 21, na Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento (Rio de Janeiro) de 1992, e em sequência, na Segunda Conferência Ministerial para a Proteção das Florestas na Europa (CMPFE) em Helsínquia no ano de 1993, foi definida como:

“A gestão e a utilização das florestas e dos espaços arborizados de uma forma e intensidade tais que mantenham a sua biodiversidade, produtividade, capacidade de regeneração, vitalidade e o seu potencial, para desempenhar, no presente e no futuro, as funções ecológicas, econômica, e social relevantes, aos níveis local, nacional e global, sem causar prejuízos aos outros ecossistemas”

De acordo com a Direção-Geral das Florestas (1999), essa definição avançada por este processo político demonstra de forma clara a evolução do conceito de sustentabilidade, junto também da evolução das mentalidades e da sociedade, relativamente à definição clássica de sustentabilidade em que o foco era a sustentabilidade da produção, ou seja, na capacidade de fornecimento eterno de uma quantidade constante de madeira por parte das indústrias. O Acordo de Paris reconheceu esse desafio, e o protocolo de Kyoto promoveu o uso sustentável de florestas naturais e o estabelecimento de plantações florestais como uma ferramenta estratégica para mitigar a mudança climática (UNFCCC 1998).

A gestão florestal tem a capacidade de implementar e criar políticas florestais ou relacionadas com as florestas, isto é, de direcionar a sociedade a atingir os seus objetivos relativos às florestas e áreas arborizadas (Lazdinis et al., 2019). A União Europeia assume que uma gestão eficaz das florestas pode trazer várias vantagens como a mitigação de externalidades negativas, a proteção da sua biodiversidade, o bem-estar das áreas rurais e a preservação das suas paisagens (Aggestam e Pulzl., 2018). E claro, a adoção de práticas inadequadas podem ter consequências graves, afetando negativamente espécies de plantas, animais, ecossistemas e outros sistemas florestais.

Para validar uma gestão florestal sustentável foram criadas certificações florestais, como por exemplo a Forest Stewardship Council (FSC), um processo que permite verificar que produtos florestais são oriundos de florestas que são geridas de acordo com as normas reconhecidas internacionalmente, como os requisitos técnicos, econômicos, ambientais e sociais, a fim de promover uma gestão florestal sustentável (FSC, 2002). Este processo melhora o controle das operações florestais, reduz o desmatamento ilegal das florestas, auxilia nos

Capítulo II: Bibliografia

direitos dos proprietários, aumenta fundos para a gestão das florestas, atribui valor ambiental no custo da madeira comercializada, motiva o investimento na indústria de processamento de material lenhoso, aumenta a produtividade e diminuição de custos, melhora a cadeia de produção desde a floresta até o consumidor final e aumenta a transparência da comercialização de produtos de origem florestal (Caetano, 2011).

2.1.2. Operações Florestais

A operação florestal diz respeito à exploração que a floresta irá sofrer para fazer a retirada do produto lenhoso, composto por etapas como a marcação prévia das árvores a serem abatidas, o abate, o corte dos ramos e pontas, a conversão dos troncos em toras, o transporte do material lenhoso dentro da área até o local que será carregado, entre outros.

As Operações Florestais Sustentáveis (SFO) focam-se na melhor maneira possível de realizar a exploração da madeira, com tecnologias de baixa emissão, que evitem degradação do solo e poluição aquática, preserve a biodiversidade, melhores condições de trabalhos e baixo risco de acidentes fatais (Schweier et al., 2019). Seu conceito é definido como um sistema complexo que abrange um conjunto de tecnologias, métodos, sistemas e práticas que são aplicados no planejamento, implementação, monitoramento e aprimoramento de operações florestais, considerando cinco áreas de desempenho, o ambiente, ergonomia, economia, otimização da qualidade, pessoas e sociedade (Marchi et al., 2018).

A Tabela 1 destaca cada conceito que é englobado para garantir operações florestais sustentáveis. Essas abordagens e conceitos trouxeram uma nova perspectiva para o campo de pesquisa florestal, expandindo o entendimento dos sistemas e produtos florestais para além da simples produção de madeira.

Tabela 1- Evolução do conceito de sustentabilidade da operação florestal

Conceito	Descrição	Foco	Escala
ESFH	Operações florestais economicamente viáveis com o mínimo impacto ambiental	Economia; Ecologia florestal	Local e Regional
RIL	Minimização de impactos da colheita de madeira nos estandes florestais e no solo	Ecologia florestal	Local
FOE	Operações florestais ambientalmente corretas sob a perspectiva das mudanças climáticas	Ecologia ambiental	Global
SFO	Operações florestais eficientes e seguras que garantem a sustentabilidade operacional	Bioeconomia; Ecologia ambiental; Fatores humanos e Sociedade	Local; Regional e Global

ESFH – Colheita de florestas ambientalmente saudáveis; RIL – Registro de impacto reduzido; FOE – Ecologia da Operação Florestal; SFO – Operação Florestal Sustentável. Adaptado de Marchi et al., 2018

O conceito de Colheita Florestal Ambientalmente Adequada (ESFH), que é definida como um planejamento e monitoração pré-colheita, execução adequada durante as operações e avaliações pós colheita, com o objetivo de aumentar a produção de bens e gerar empregos para as populações rurais sem comprometer a capacidade regenerativa das florestas (Marchi et al., 2018), o conceito de Exploração de Impacto Reduzido (RIL), sendo a implementação intensivamente planejada e cuidadosamente controlada de operações de colheita para minimizar o impacto sobre povoamentos florestais e solos, geralmente no corte de seleção individual das árvores (FAO, 2004) e o conceito de Ecologia da Operação Florestal (FOE), que visa desenvolver e implementar tecnologias de operações florestais ambientalmente saudáveis, usar os recursos de forma eficiente, minimizar a produção geral de emissões e resíduos e minimizar os impactos ambientais na atmosfera, biosfera, hidrosfera e litosfera (Heinimann, 2007).

2.1.3. Impactos Ambientais das Operações Florestais

A produção de madeira compreende um conjunto de operações realizadas durante as atividades de manejo florestal que estão na origem de diversos impactos ambientais. Cada método de colheita, desde o mais simples até o mais sofisticado, tem o potencial de causar impactos ambientais, exigindo maiores pesquisas para concluir os danos efetivos causados pelas operações florestais, além de estratégias para mitiga-los. (Cambi et al., 2015; Riala et al., 2015).

Capítulo II: Bibliografia

Os impactos associados às emissões atmosféricas são encontrados, principalmente, nas etapas de colheita e transporte, devido ao uso de combustível fóssil para o funcionamento das máquinas, no qual ocorre a liberação de componentes como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂), que contribuem para o aquecimento global, acidificação e formação de oxidantes fotoquímicos (González-García et al., 2009). O CO₂ liberado pode variar dependendo do produto que está sendo colhido, das condições locais, das máquinas utilizadas e das distâncias de extração e transporte (Devlin et al., 2013).

Em relação ao solo, as operações florestais mecanizadas podem causar distúrbios, como a sua compactação e seu deslocamento, resultando em consequências negativas. O uso de maquinário pesado, por exemplo, pode resultar na degradação da sua qualidade e consequentemente causa uma perda de produtividade (Curran et al., 2005). Nesses ambientes frágeis, a perda de solo superficial resulta em uma diminuição na fertilidade do solo devido à má condição física dos horizontes mais profundos e à perda de matéria orgânica e nutrientes, parcialmente ligada ao aumento da erosão (Hartanto et al., 2003). As máquinas que realizam o arraste de madeira também contribui para a perda de matéria orgânica, que desestrutura a camada superficial do solo, facilitando a perda orgânica (Freitas, 2004).

As propriedades químicas do solo e a reciclagem de nutrientes no sistema solo-planta podem direta e indiretamente ser afetadas pelas operações de campo, levantando grandes preocupações sobre a manutenção da produtividade do solo e qualidade ambiental (Gartzia-Bengoetxea et al., 2009). Alguns estudos também registraram um aumento da emissão de metano e dióxido nitroso provenientes da compactação do solo induzida por passagem de máquinas (Cambi et al., 2015). Esses efeitos no solo também inviabilizam o crescimento de vegetações futuras, impactando diretamente na perda de biodiversidade.

A etapa da colheita florestal também é responsável por impactos relacionados a hidrografia, especialmente em relação aos processos erosivos. Esses impactos incluem o aumento da turvação e do assoreamento da água, que consequentemente reduzem a produtividade geral do ecossistema. A compactação do solo causada pelo trânsito das máquinas e o arraste de madeira afetam a regularidade do fluxo hídrico, resultando em aumentos no escoamento superficial e subsuperficial. Esses efeitos negativos também prejudicam a vegetação do sub-bosque, reduzindo sua capacidade de suporte para a fauna terrestre (Freitas, 2004). Além disso, as emissões de combustão, principalmente de NO_x, das máquinas florestais, ocasionam a acidificação dos corpos hídricos (González-García, 2014).

2.2. Modelação de Povoamento Florestal

Os modelos de crescimento e produção florestal são ferramentas matemáticas que permitem estimar o crescimento das árvores e prever a produção lenhosa. Esses modelos podem ser aplicados tanto em nível de árvore individual quanto em povoamentos florestais. Eles são especialmente úteis na gestão florestal, pois permitem simular diferentes práticas silviculturais, incluindo desbastes, a estimativa da produção de madeira ao longo do tempo, a avaliação dos efeitos de diferentes intervenções silviculturais, e fornecem informações detalhadas sobre a estrutura e composição dos povoamentos.

Essas informações auxiliam na tomada de decisões flexíveis e na exploração de opções de manejo sustentável. Além disso, os modelos de crescimento e produção florestal são importantes para prever a produção futura e ajudar na eficiente alocação de recursos. Eles fornecem uma base sólida para a gestão adequada das florestas, levando em consideração fatores como o tempo, as práticas silviculturais e os resultados desejados (Vanclay, 1999; Bravo et al., 2011).

Para o desenvolvimento da modelação florestal é necessário a consideração de diversos parâmetros essenciais. A idade das árvores é fundamental para determinar o estágio de desenvolvimento e as taxas de crescimento, o diâmetro e a altura auxiliam a estimar o volume de madeira e a taxa de crescimento ao longo do tempo, a área basal é utilizada para avaliar a densidade do povoamento e influenciar a competição entre as árvores, e a densidade do povoamento, ou seja, a quantidade de árvores por unidade de área, afeta a competição entre as árvores por recurso e tem influência no crescimento individual e coletivo (Vanclay, 1999). Além disso, parâmetros sobre as condições ambientais também podem ser incluídos, como a disponibilidade de água, incidência solar, nutrientes do solo e a temperatura. Esses fatores têm um impacto direto no crescimento das árvores, importante para obter resultados precisos e representativos da realidade (Maestri, et al., 2013).

Existem diversos softwares disponíveis que auxiliam na modelação e crescimento florestal, fornecendo ferramentas que facilitam as análises e tomada de decisões relacionadas à gestão e manejo dos povoamentos florestais. O FlorNEXt® por exemplo, é um Sistema de Apoio à Decisões (SAD), desenvolvido pelo Instituto Politécnico de Bragança, no âmbito do Projeto SIMWOOD, para a região do Nordeste Transmontano de Portugal com o objetivo de simular o crescimento e a produção das espécies *Pinus pinaster* Ait. (pinheiro bravo) e *Quercus pyrenaica* Willd. (carvalho negral).

Essa ferramenta utiliza modelos dinâmicos de crescimento e produção, incorporando funções de transição, como curvas de índice de sítio para altura dominante e área basal. Além disso, o software permite a utilização de equações de volume para árvores individuais ou povoamentos inteiros, juntamente com modelos estruturais para planejar diferentes regimes de desbaste. Os dados obtidos são essenciais para a tomada de decisões relacionadas ao manejo florestal sustentável, abordando aspectos financeiros, produtivos, ambientais e de minimização de riscos (Pérez-Rodríguez, 2018; Fagundes et al., 2019).

2.3.Tração Animal

2.3.1. Evolução histórica

A tração animal é uma prática que remonta a tempos antigos e desempenhou um papel crucial no desenvolvimento da civilização. Acredita-se que os primeiros animais domesticados, como bois, cavalos e jumentos, tenham sido utilizados como força de tração por volta de 4000 a.C., no Oriente Médio. Inicialmente, a tração animal era realizada por meio de animais de carga, que eram usados para a realização de tarefas na agricultura, para arar, plantar, capinar, ceifar e colher, na irrigação, para acionamento de bombas d'água e captação de água de poços, para fornecer energia para a operação de equipamentos, como moinhos de grãos e máquinas de processamento de alimentos, na construção civil, para auxiliar na movimentação de terras em obras rodoviárias, no transporte, para tração de carroças e cargas e na exploração madeireira (Chia, 2004).

A utilização da tração animal, principalmente na agricultura, se espalhou por várias regiões do mundo. Na China, por exemplo, o primeiro arado de tração animal surgiu por volta de 2.800 anos a.C. Esse avanço permitiu um aumento significativo na produtividade agrícola e contribuiu para o desenvolvimento da civilização chinesa (Beretta, 1998). Ao longo dos séculos, a tração animal continuou a ser amplamente utilizada em todo o mundo, sendo uma forma essencial de energia.

Com a revolução industrial, no início do século XX, houve um rápido avanço tecnológico e a introdução dos primeiros tratores que substituíram gradualmente a tração animal em muitas áreas, devido à sua maior eficiência e capacidade de realizar tarefas agrícolas de forma mais rápida e precisa (Kaushik, 1998). Além disso, o êxodo rural, impulsionado pela urbanização e pela busca de empregos nas cidades, contribuiu para a diminuição do uso da tração animal na agricultura, principalmente em países desenvolvidos.

Capítulo II: Bibliografia

Embora o trabalho animal na agricultura tenha reduzido após a mecanização, que ocorreu de forma desigual entre os continentes, os animais de tração nunca deixaram de ser utilizados. Um fator que desempenha um papel crucial nessa persistência é o econômico, especialmente em fazendas de menor porte. Nessas circunstâncias, a mecanização agrícola em larga escala pode ser inviável devido aos altos custos fixos envolvidos, o que torna a tração animal uma opção mais acessível (FAO, 2000).

Durante a crise do petróleo na década de 1970, surgiu a preocupação com os pequenos agricultores que não possuíam recursos para adquirir equipamentos modernos. Diante desse cenário, as instituições de pesquisa passaram a se interessar pela utilização da energia animal, uma vez que os animais sempre foram considerados a principal fonte de energia e desempenham um papel importante na força de trabalho agroflorestral e na indústria.

O uso contínuo da tração animal é uma realidade atual nas áreas montanhosas, principalmente na Ásia, América Latina e África, onde ainda está aumentando. Em 2014 existiam 300 milhões de animais de trabalho distribuídos pelo mundo, sendo 70% dos cavalos e 90% dos jumentos e híbridos, e a grande maioria destes animais estavam localizados em países em desenvolvimento (FAO, 2014^a).

2.3.2. Benefícios Socioeconômicos e Ambientais

A utilização da tração animal ressalta a relevância da autossuficiência dos agricultores, da preservação dos recursos naturais e da proteção do meio ambiente, com o objetivo de promover a sustentabilidade a longo prazo da produção e o desenvolvimento da sociedade. Além disso, ela contribui para melhorar o perfil dos produtos produzidos, conferindo-lhes uma imagem tradicional e sustentável (Rigby e Cáceres, 2001).

Alguns estudos comprovam a eficiência ou ineficiência da utilização da tração animal em determinados cenários, servindo como base para tomada de decisões. Em Nunes et al. (2023), foi analisado o uso da tração animal para aprimorar a cadeia de suprimentos da biomassa residual por meio de uma análise SWOT, discorrendo sobre suas principais forças, fraquezas, oportunidades e ameaças (Quadro 2).

Tabela 2 - Matriz SWOT da utilização de tração animal

Pontos Fortes
<ul style="list-style-type: none">• Menos impactos ambientais comparado ao maquinário;• Menos perdas devido a danos causados às árvores nos estantes florestais comparado ao maquinário• Pegada de carbono menor substituindo equipamentos que usam energia fóssil

Capítulo II: Bibliografia

<ul style="list-style-type: none">• Possibilidade de recuperar biomassa residual da floresta inacessível à coleta com equipamento mecânico.• Quantidade crescente de biomassa florestal residual disponível para recuperação de energia.
Fraqueza
<ul style="list-style-type: none">• Falta de operadores qualificados com experiência na condução de animais para executar diferentes tarefas e em diferentes ambientes.• Falta de animais treinados para executar tarefas de tração.• Possibilidade de acidentes de trabalho envolvendo animais.• Dificuldades logísticas associadas ao transporte de animais e sua acomodação, proteção e alimentação no local de trabalho.
Oportunidades
<ul style="list-style-type: none">• Desenvolvimento de ferramentas que apoiem as operações florestais• Restauração de modelos de gestão agro-silvo-pastoral através da recuperação de práticas tradicionais atualizadas e adaptadas à nova realidade comercial.• Criação de novos modelos de negócios para prestação de serviços em áreas rurais.• Criação de novas cadeias de valor para biomassa residual inacessível à coleta mecanizada.• Estabelecimento de modelos de gestão sustentável em escala local, abordando simultaneamente impactos ambientais (ecológicos, eficiência energética, emissões de GEE, incorporação de matéria orgânica no solo), incorporação econômica (de externalidades positivas, desenvolvimento regional) e social (apreciação do trabalho com animais) dimensões.• Aumentar a autossuficiência energética local / regional / nacional.
Ameaças
<ul style="list-style-type: none">• Dificuldade em atingir a escala necessária para a viabilidade industrial do processo.• Possível oposição de movimentos de direitos dos animais, com alegações de exploração, maus-tratos e outras considerações relacionadas ao bem-estar animal.• O não reconhecimento da tração animal moderna como uma ferramenta para o desenvolvimento sustentável local e global pelos formuladores de políticas.• Não inclusão da tração animal moderna nas estratégias e políticas de desenvolvimento local.• Falta de interesse da academia nesta edição.• Extinção de raças de animais de tração.

Adaptado de Nunes et al., 2023.

Em resumo, é possível observar que os principais benefícios da utilização da tração animal estão relacionados à mitigação dos gases emitidos em comparação ao uso da mecanização, à redução de perdas devido a danos causados às árvores, ao acesso em áreas inacessíveis por equipamentos mecânicos, ao custo benefício e a uma redução da pegada de carbono, substituindo equipamentos que utilizam combustíveis fósil. Já de entre os pontos negativos se destacam a falta de operadores qualificados, a falta de animais treinados e, principalmente, a inviabilidade do seu uso em escala industrial.

Estimativas relatam que na década de 1990, o mesmo trabalho realizado anualmente por animais de tração exigiria 20 milhões de toneladas de petróleo se fossem realizados por tração mecânica, com um gasto de aproximadamente US\$ 6 mil milhõrd. Além disso, estudos sugerem que a energia animal tem o potencial de suprir aproximadamente 50% das necessidades globais de energia agrícola. (Swann, 2006).

Ao comparar os sistemas de cultivo mecanizado e de tração animal com o uso de fontes locais de energia renovável, foi constatado que o cultivo com tratores representou apenas 9%

Capítulo II: Bibliografia

do total, enquanto os cavalos de tração foram responsáveis por impressionantes 60% (Jansén 2000). Além disso, o uso de cavalos de tração oferece benefícios adicionais. Não apenas a energia utilizada pode ter origem na própria exploração, por meio do uso de forragens e do trabalho dos cavalos ou de outros animais, mas também os subprodutos gerados pela conversão dessa energia permanecem na fazenda, contribuindo de maneira significativa para o fechamento do ciclo de produção na propriedade agrícola.

Em relação ao consumo de combustível dos equipamentos, estudos indicam que a quantidade de biodiesel necessária para operar um trator de 35 cavalos por uma hora por dia ao longo do ano seria equivalente a ocupar 5 hectares de terra. Por outro lado, apenas 1,5 hectare de terra arável ou pasto seria suficiente para fornecer alimentação a um cavalo usado durante todo o ano, trabalhando 5 horas por dia, para realizar a mesma quantidade de trabalho (Herold et al., 2014). Além disso, em termos de eficiência de tração, um cavalo de tração apresenta uma eficiência de 17%, o que significa que 17% da ingestão de forragem é convertida em potência de tração (Johansson et al., 2013).

Através da análise de ciclo de vida, o cálculo de desempenho de cavalos de tração em operações florestais revelou que esses animais são mais benéficos para o clima em comparação com máquinas de grande porte. Em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE) por hectare de floresta explorada, um sistema misto que combina o uso de animais e máquinas mostrou uma redução de quase 45% em comparação com um sistema totalmente mecanizado (Engel et. al). No entanto, opiniões divergentes existem em relação a esse assunto, com argumentos de que o trabalho realizado pelos tratores resulta em um menor consumo de combustível em comparação com a quantidade necessária para produzir a ração consumida pelos animais, enquanto ambos realizam a mesma quantidade de trabalho (Engel et at., 2012; Cerutti et al., 2014).

Um estudo realizado em uma região montanhosa no norte da Itália comparou o desempenho ambiental da potência animal em relação à do trator e concluiu que o uso de tração animal pode apresentar vantagens significativas em termos ambientais, especialmente no que diz respeito à utilização de energias renováveis e à redução das emissões de gases de efeito estufa (Cerutti et al. 2014). Em uma perspectiva semelhante, Rydberg e Jansén (2002) na Suécia observaram que a diferença principal entre os sistemas de tração animal e tratores residia em suas fontes de energia, com a tração animal utilizando 60% de insumos renováveis, enquanto a tração por tratores utilizava apenas 9%.

O uso de cavalos de tração é amplamente reconhecido como uma prática de cultivo suave para o solo, resultando em danos reduzidos à exploração agrícola devido à baixa pressão exercida por esses animais. Essa abordagem é considerada ambientalmente amigável, o que significa que os cavalos de tração podem competir com eficácia em comparação com o uso de máquinas. Embora em certas circunstâncias os cavalos possam exercer uma pressão de solo maior em comparação com os pneus dos tratores, o efeito de compactação se limita aos primeiros centímetros do perfil do solo devido ao peso relativamente menor dos cavalos em comparação com os tratores modernos. Além disso, a pressão exercida pelos cascos dos cavalos é concentrada em pontos específicos, enquanto os tratores causam faixas de pressão e seus efeitos de compactação penetram em camadas muito mais profundas do solo, resultando em compactação do subsolo (Engel et al., 2012; Wyss, 1999; Arvidsson et al., 2003).

No que se refere ao crescimento das plantas, estudos indicam que vinhas jovens cultivadas em vinhedos onde o trabalho é realizado exclusivamente com cavalos apresentam um período mais precoce de frutificação, ocorrendo entre um a dois anos antes quando comparadas às vinhas que crescem em solos compactados por tratores. E no manejo florestal de áreas montanhosas, pesquisas comparativas revelaram que o uso de animais em vez de tratores resulta em uma redução de 50% na porcentagem de árvores danificadas e uma redução de dois terços na gravidade dos danos. (Scharnhölz 2009).

Além disso, os benefícios podem se estender além do âmbito ambiental e serem também de natureza financeira. Por exemplo, o arraste de materiais com cavalos tem um custo 30% menor em comparação com o arraste com tratores, desde que a distância de extração não exceda 100 metros e o custo de abertura da trilha seja considerado. A eficiência de custo do arraste aumenta significativamente ao usar dois cavalos por condutor, uma vez que o custo adicional do segundo cavalo é menor do que a produtividade adicional que ele proporciona (Magagnotti e Spinelli 2011a).

2.4.Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que foi desenvolvida a fim de permitir avaliar os possíveis impactos potenciais ambientais associados a um produto ou processo durante o seu ciclo de vida, analisando todos os estágios de produção. Os primeiros estudos envolvendo a ACV surgiram em meados da década de 70 e tinham como objetivo principal resolver questões como a eficiência energética e o consumo de matérias primas na elaboração de produtos e a disposição dos resíduos finais (Jensen et al, 1997).

Capítulo II: Bibliografia

A primeira pesquisa que pôde ser utilizado como base para uma ACV foi feita pela Coca-Cola, em 1965, nos Estados Unidos, e o objetivo foi comparar e identificar qual embalagem para os refrigerantes teriam menores emissões e menos consumiriam recursos naturais em sua fabricação, para o estudo foi feita a quantificação de matérias-primas e combustíveis utilizados e as cargas ambientais dos processos de fabricação de cada embalagem (Curran, 2006).

Com o fim da crise do petróleo, na década de 70, o número de estudos diminuiu, mas a partir da década de 90 voltou a ser visto como interessante para questões relacionadas ao meio ambiente, porém havia divergências entre os resultados de estudos aparentemente iguais, devido aos diferentes parâmetros adotados. Para suprir a falta de padronização nos projetos de ACV, a ISO 14040, sobre a Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura, foi criada em 1997 pela *International Organization for Standardization* (Organização Internacional para Padronização). Além dessa, foram criadas mais quatro normas, sendo a ISO 14041 – Princípios gerais (1997), ISO 14042 – Definição do objetivo e escopo (1998), ISO 14044 – Requerimento e diretrizes (2006). Em Portugal, as normas utilizadas para a avaliação de ciclo de vida são principalmente as versões NP EN ISO 14040 (2006) e NP EN ISO 14044 (2006).

As principais aplicações, de acordo com a ISO 14040, são identificar oportunidades de melhoria dos produtos; estratégias para reduzir custos pela substituição ou otimização no uso de materiais; fornecer informações detalhadas para indústria para a elaboração de planos estratégicos; desenvolvimento de políticas públicas, implementação de rotulagem ambiental por meio de *marketing* e obter indicadores relevantes de desempenho ambiental.

Conforme definido na NP EN ISO 14040, para realizar a análise de ciclo de vida é necessário compilar um inventário com as entradas de energia e materiais relevantes, e as liberações ambientais que ocorrem dentro dos estágios do ciclo de vida, avaliar os impactos ambientais potenciais associados, e interpretar os resultados, a fim de auxiliar na definição de estratégias e oportunidades de efetuar melhorias no produto ou serviço

Os estudos da análise de ciclo de vida estão divididos em quatro componentes que se interrelacionam, sendo a definição do objetivo e âmbito, inventário, avaliação de impacto e interpretação (Figura 1)

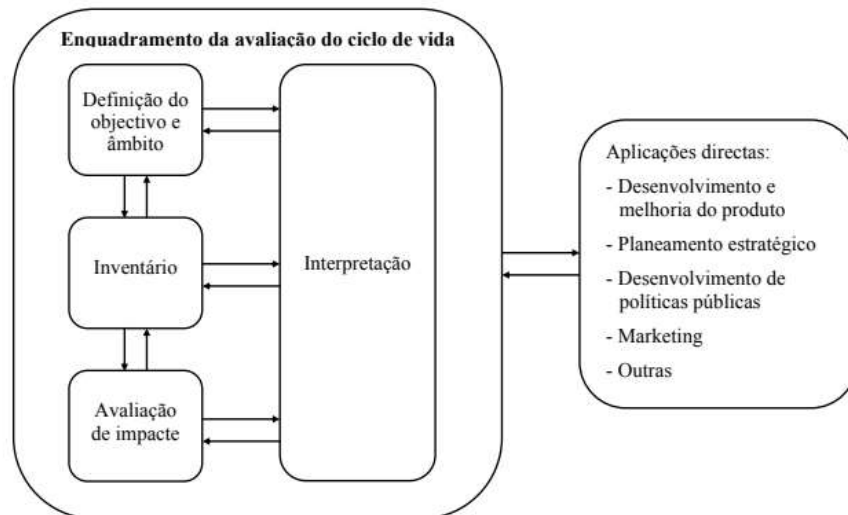


Figura 1 - Fases de uma ACV

Fonte: NP EN ISO 14040:2008

2.4.1. Definição do Objetivo e Âmbito

O objetivo da ACV estabelece e relaciona o produto com a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo, o público interessado no resultado e se os resultados podem ser utilizados para divulgação pública. O âmbito deve ser claro para assegurar que o nível de detalhe do estudo é compatível e suficiente para atingir o objetivo definido, com isso deve incluir, de acordo com a NP EN ISO 14040:

- Função do sistema, no qual é definida a função do objetivo do estudo;
- Unidade Funcional, sendo o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como unidade de referência, ou seja, é a unidade que normaliza matematicamente os dados de entrada e saída do sistema e deve ser claramente definida e mensurável;
- Fluxo de referência, com a quantidade de produto que é necessária para cumprir a função da unidade funcional;
- Fronteiras do Sistema, que define os processos unitários que devem ser incluídos no sistema, no qual o sistema de produto deverá ser modelado de tal forma que as entradas e saídas na sua fronteira sejam fluxos elementares.

Os limites do sistema podem ser definidos em quatro tipos, sendo eles:

- *Cradle-to-grave* (berço ao túmulo): considerado desde a extração da matéria prima até o uso e descarte final do produto.

Capítulo II: Bibliografia

- *Cradle-to-gate* (berço ao portão): considerado desde a extração da matéria prima até o portão da fábrica.
- *Gate-to-gate* (portão ao portão): considerado vários processos dentro de uma mesma etapa do ciclo de vida;
- *Gate-to-grave* (portão ao túmulo): considerado do portão da fábrica até o descarte final do produto.

2.4.2. Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Na etapa do inventário do ciclo de vida ocorre a recolha de dados e os cálculos para a quantificação das entradas e saídas relevantes de um sistema do produto. Os dados podem ser qualitativos ou quantitativos, referentes a entradas de energia, matéria prima, entradas auxiliares, produtos, resíduos, emissões atmosféricas, descargas para a água e para o solo e outros aspectos ambientais obtido por meio de medição, cálculo (explicitamente documentado) ou estimativa.

Para desenvolver um inventário de ciclo de vida satisfatório é necessário seguir alguns passos, como desenvolver um diagrama de fluxo, que mapeie as entradas e saídas dos processos avaliados, desenvolver um plano de coleta de dados, coletar os dados com visita *in loco* para se familiarizar com os processos, avaliar e relatar os resultados de acordo com as fronteiras definidas (Curran, 2006). A descrição de cada processo é necessária para garantir uma interpretação correta, que pode ser realizada por meio de fluxogramas, listas de especificações, instruções, entre outros. Após a recolha dos dados, os procedimentos necessários para os cálculos são a validação dos dados recolhidos, relação dos dados com os processos unitários e a relação dos dados com o fluxo de referência da unidade funcional.

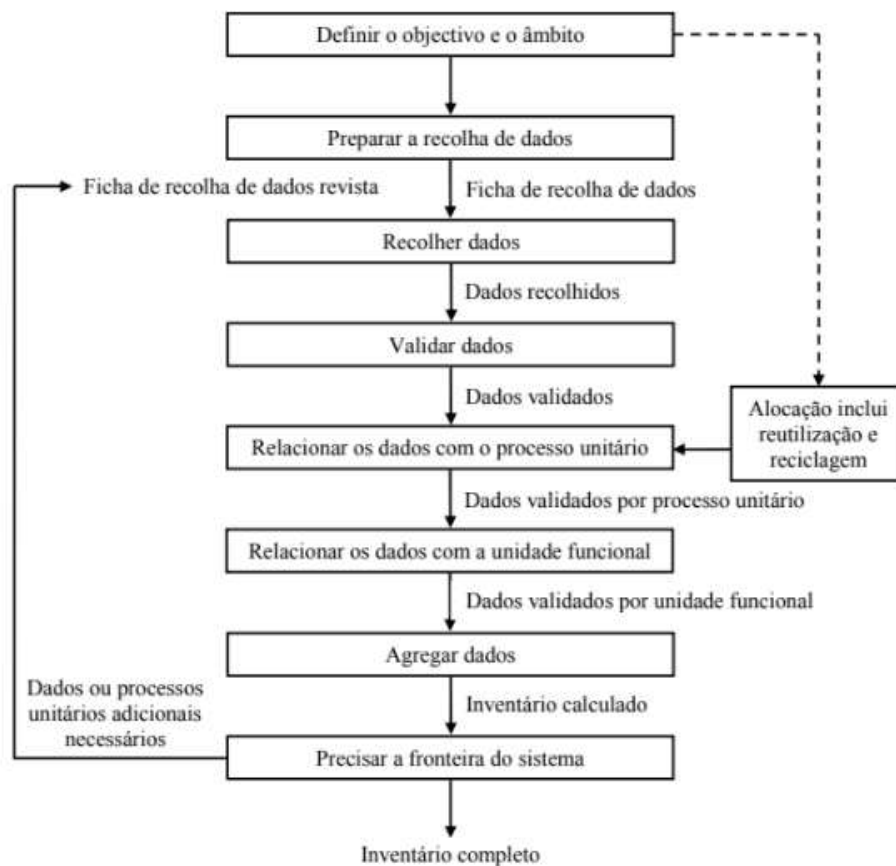


Figura 2 - Procedimentos para o inventário

Fonte: NP EN ISO 14040:2008.

2.4.3. Avaliação de Impacto

A fase da avaliação de impacto da ACV tem como objetivo avaliar a significância dos potenciais impacto ambientais e na saúde humana, identificados durante o inventário de ciclo de vida, e deve abordar os efeitos ecológicos, de saúde humana e esgotamento de recursos. A avaliação do impacto do ciclo de vida deve estabelecer uma ligação com o produto e as questões ambientais especificadas no objetivo e âmbito e são divididas em três etapas, representada na Figura 3.

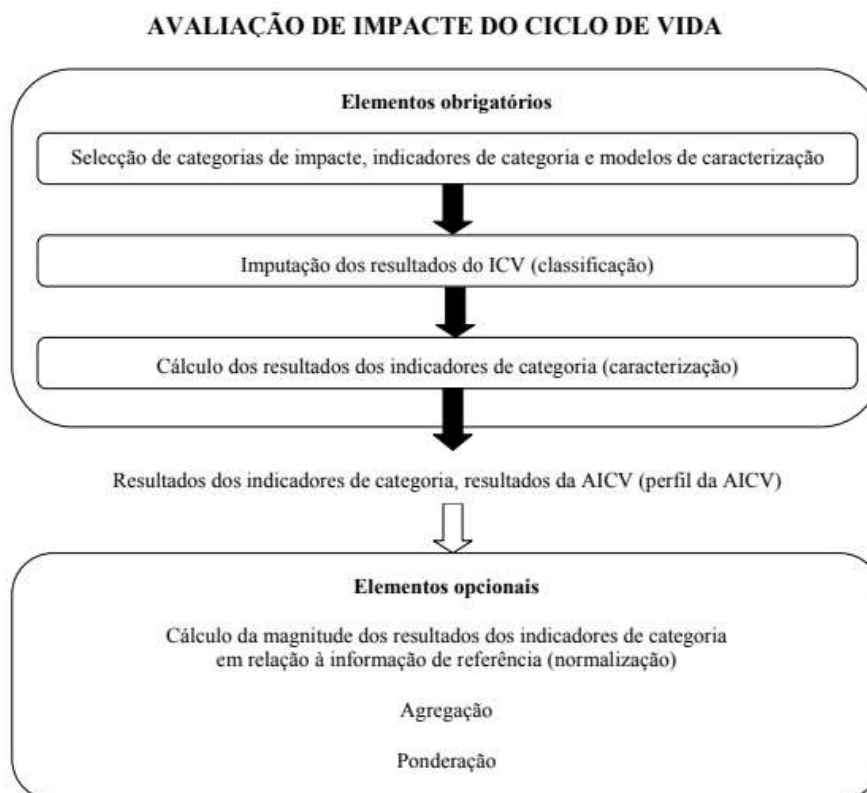


Figura 3 - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Fonte: NP EN ISO 14040:2008.

Na primeira etapa, deve seleccionar as categorias de impacto que serão considerados na ACV, de acordo com o objetivo e âmbito do estudo, sendo eles as consequências causadas pelos fluxos de entrada e saída do sistema. Geralmente, as categorias de impactos ambientais mais comuns nos estudos de ACV são o aumento do teor de acidez do solo, água e ar (acidificação); aumento dos agentes tóxicos que podem causar danos à biosfera (eco toxicidade) ou à saúde humana (toxicidade humana); esgotamento de recursos naturais não renováveis e o aumento dos buracos na camada de ozônio (IBICT, 2020).

Sequencialmente é necessário realizar a caracterização, que envolve a aplicação de fatores de conversão para unificar as informações das categorias de impacto, como por exemplo os dados que contribuem para o aquecimento global são convertidos em quilogramas de CO₂ equivalente. Podem ainda serem caracterizados em *midpoint* (impacto) e *endpoint* (dano), como apresentado na Figura 4. O método de *midpoint* faz a caracterização com indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental, como mudanças climáticas ou acidificação, antes de chegar ao ponto final da categoria. O *endpoint* se refere a um dano específico relacionado com a área mais ampla de proteção, como saúde humana ou recursos naturais, ou

seja, voltado para caracterizar a intensidade ou aplicações dos impactos de *midpoint* (Mendes, 2013).

Na etapa de normalização, os fatores de caracterização serão convertidos e combinados com os resultados do ICV em indicadores representativos de impactos na saúde humana e ecológica, na Figura 4 é possível observar as categorias de impacto associadas aos *midpoint*, como acidificação, acidentes, mudanças climáticas, entre outros, e os *endpoint*, que são os danos causados pelos *midpoint*, podendo ser na saúde humana, ambiente natural biótico, entre outros. Na etapa de agrupamento e ponderação, os dados serão classificados nas categorias de impactos com base nos resultados do indicador e convertidos em uma pontuação agregada de acordo com os fatores de ponderação de seu valor.

2.4.3.1. Métodos de Avaliação de Impacto para ACV

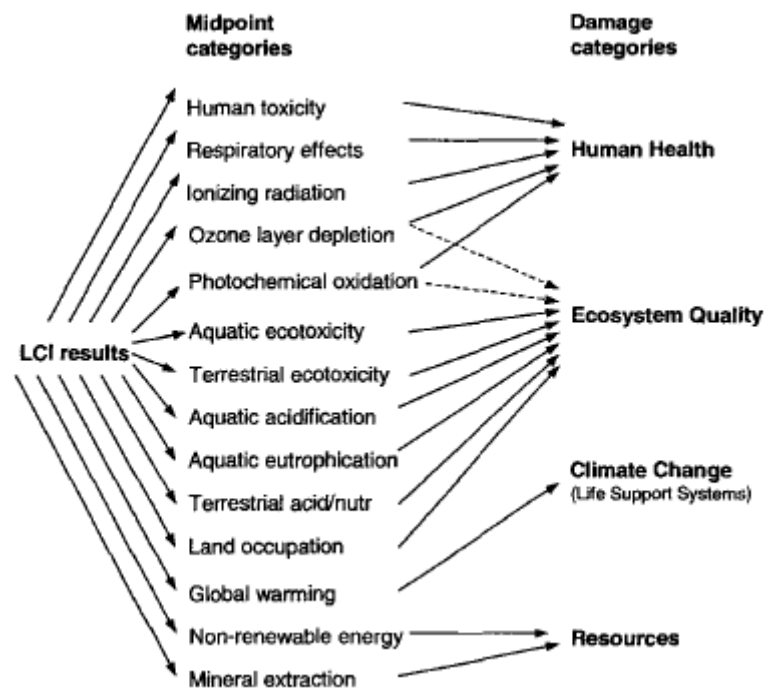


Figura 4 - Midpoint e Endpoint relacionados

Fonte: Jolliet, 2003

2.4.4. Interpretação da ACV

De acordo com a NP EN ISO 14044, a interpretação do ciclo de vida é a última fase do processo da ACV e irá identificar, quantificar, verificar e validar as informações dos resultados do inventário e da avaliação do ciclo de vida, a fim de chegar a conclusões, explicar limitações,

fornecer as recomendações e divulgar as informações completas, compreensíveis e com transparência, de acordo com o objetivo e âmbito do estudo. A forma em que a fase de interpretação interage com as outras fases são representadas na Figura 5.

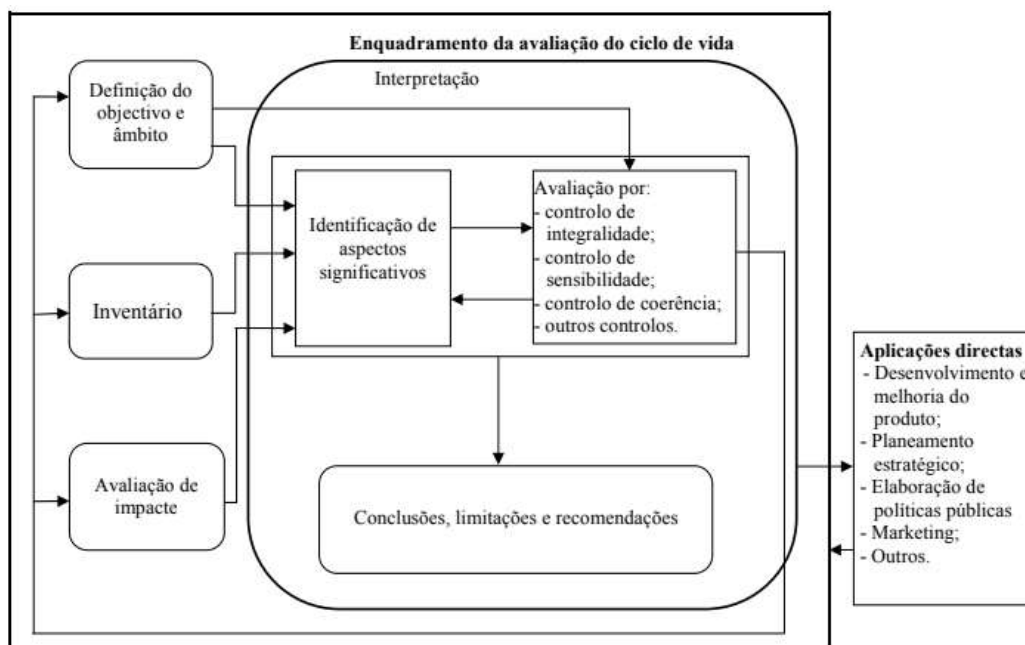


Figura 5 - Enquadramento da ACV

Fonte: NP EN ISO 14044:2010

2.4.5. ACV da Produção Florestal

A demanda mundial por produtos que substituam combustíveis fósseis está aumentando e junto questões relacionadas as consequências do uso de produtos de origem florestal estão sendo cada vez mais discutidas, portanto, estudos da ACV são importantes para entender e quantificar os impactos ambientais e evitar possíveis efeitos negativos do aumento do uso de madeira como fonte de energia (Klein et al, 2015). Programas de certificação florestal estão sendo implementados em vários países com métodos e ferramentas voltados para avaliar sistemas produtivos a partir de critérios e indicadores que se assemelham ao ACV (Holvoet, e Muys, 2004).

O desenvolvimento de uma ACV florestal requer compreensão acerca da utilidade da floresta e de seus recursos, uma vez que ambos podem ser considerados como produtos, seja por seu valor ambiental ou social, contribuição para a paisagem, conservação de recursos naturais, produtos madeireiros ou não madeireiros. Os principais desafios para a elaboração de estudos em ACV florestal estão na identificação e definição dos objetivos, fronteiras do sistema,

Capítulo II: Bibliografia

unidade funcional, categorias de impacto e os processos envolvidos. Além disso, é importante destacar que a maioria dos estudos está concentrada na análise do potencial de aquecimento global (GWP), e os resultados obtidos apresentam níveis de incerteza (Klein et al., 2015).

A ACV na produção florestal segue as etapas padrão da metodologia. Para a definição do objetivo e escopo é necessário identificar claramente o produto ou sistema em análise, como uma floresta, uma plantação florestal ou um produto específico. Também é necessário definir as fronteiras do sistema, que podem incluir atividades desde o plantio e manejo florestal até o processamento, transporte e distribuição dos produtos. A coleta de dados envolve a obtenção de informação sobre cada etapa do ciclo de vida do produto florestal.

Para uma ACV sobre a silvicultura deve incluir dados como o tipo de árvore, método de plantio, uso de fertilizantes e pesticidas, a etapa de colheita e extração da madeira e seu transporte e processamento subsequente. Além disso é necessário considerar os insumos energéticos, como os combustíveis utilizados nos equipamentos e máquinas, e as emissões de poluentes atmosféricos.

As informações obtidas através de uma ACV florestal fornecem informações valiosas para tomadas de decisão em relação à produção florestal sustentável. Os resultados podem ser utilizados para identificar oportunidades de melhoria em termos de eficiência energética, redução de emissões de gases de efeito estufa, uso sustentável dos recursos naturais e mitigação de impactos ambientais negativos (Cambria e Pierangeli, 2012)

Vale ressaltar que no setor florestal ainda há uma falta significativa de informações detalhadas sobre o ciclo de vida dos produtos florestais na aplicação da ACV. São escassos os estudos que fornecem dados precisos sobre as cadeiras de produção e de valor dos produtos florestais madeireiros e não madeireiros.

3. Metodologia

A metodologia foi baseada na NP EN ISO 14040 e NP EM ISO 14044 e visa a avaliação do ciclo de vida de três diferentes tipos de manejo florestal em um povoamento de Pinheiro-Bravo (*Pinus pinaster*), sendo um cenário totalmente mecanizado, um cenário com tração animal e um cenário misto com mecanização e tração animal.

3.1.Recolha de dados primários

A recolha de dados primários foi feita junto a uma atividade prática realizada pela Associação Portuguesa de Tração Animal (APTRAN) por meio do Laboratório Rural, que visa introduzir o conceito de tração animal moderna em uma estratégia de desenvolvimento rural e incorporar a ideia de sua utilização como parte de uma abordagem estratégica para o interesse crescente nessa tecnologia como uma fonte de energia renovável, de baixo impacto e economicamente viável.

A atividade foi realizada na Paisagem Protegida do Corno do Bico em Paredes de Coura – PT, com o manejo de uma área, previamente determinada, a partir da eliminação de árvores do tipo Castanheiras (*Castânea sativa*) que apresentavam risco de queda ou que estavam mortas, com a utilização da tração animal.

A operação realizada foi dividida em três etapas: Etapa 1: desbaste e desrama da madeira realizado com motosserra (Figura 6); Etapa 2: remoção da madeira caída até o ponto de recolha dentro da área por meio da tração animal (Figura 7); Etapa 3: transporte da madeira até o destino final com caminhão.



Figura 6 - Etapa 1: desbaste da árvore

Fonte: Autor (2023)



Figura 7 - Etapa 2 : carregamento da madeira pelo animal

Fonte: Autor (2023)

Os dados coletados estão representados na Tabela 3 e abrange os itens utilizados e suas informações específicas como marca, tipo de combustível utilizado, quantidade de combustível, distância percorrida e potência ou consumo médio. No caso dos animais, foram contabilizados

o alimento e a quantidade, a distância do deslocamento que o automóvel precisou realizar para leva-lo até a área, a quantidade de estreme e de gás metano liberada.

Tabela 3 - Dados primários coletados

Itens	Tipo de Maquinário	Tipo de Combustível/Energia	Quantidade de combustível	Potência ou Consumo médio	Distância percorrida (Km)
Motosserra	Stihl MS 261	Gasolina de mistura	0,9375 kg	3/4,1kW/CV	Não se aplica
		Óleo lubrificante	0,021 kg		
Transporte animais e trabalhadores	Hilux	Diesel	6,23 L	9,3 km/L	58
Cavalo	Lola (900kg) e Sabor (750kg)	Feno	20 kg	Não se aplica	58
		Água	20 L		
Transporte final	Caminhão	Diesel	4 km/L	15 L	58

3.2.Dados Florestais

Os dados utilizados para os cenários florestais foram obtidos através do FlorNExT®, uma plataforma de simulação de desbastes a partir de um cálculo específico, utilizando as variáveis do povoamento como idade, altura dominante, densidade, área basal e a projeção de crescimento. A simulação foi realizada para um povoamento de 16 anos, com altura dominante de 9,2 m, densidade de 150 árvores.m⁻¹, uma área basal de 21,9 m².ha⁻¹ e uma projeção de crescimento de 34 anos. Para maiores detalhes, foi adotada uma de 2,18 ha de plantação de *Pinus pinaster*, localizada na Lomba de Vinhais, em Portugal. Com base nos dados fornecidos, foi possível obter a avaliação precisa e o manejo recomendado para a área, que inclui o primeiro desbaste no ano 30 para a remoção de 40,57 m³, o segundo desbaste no ano 40 com a remoção de 66,6 m³ e por último o corte final, extraindo 418,06 m³ de madeira com casca. O resultado da simulação está explícito na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados obtidos através de simulação do FlorNEXt®

Resultados da simulação											
t	N	H ₀	G	VCC	Wa	C	CM	CC	Ne	Ve	info
16	1530	9.2	21.9	91.96	51.4	24.62	5.75	--	-	0	0
17	1530	9.72	23.85	104.58	58.87	28.2	6.15	12.62	0	0	0
18	1530	10.23	25.73	117.48	66.58	31.89	6.53	12.9	0	0	0
19	1530	10.72	27.54	130.31	74.47	35.67	6.86	12.84	0	0	0
20	1530	11.19	29.28	143.01	82.52	39.52	7.15	12.7	0	0	0
21	1530	11.65	30.94	156.4	90.69	43.44	7.45	13.39	0	0	0
22	1530	12.09	32.54	169.37	98.95	47.4	7.7	12.97	0	0	0
23	1530	12.53	34.06	182.23	107.29	51.39	7.92	12.86	0	0	0
24	1530	12.95	35.53	195.22	115.68	55.41	8.13	12.99	0	0	0
25	1530	13.35	36.93	207.82	124.1	59.44	8.31	12.6	0	0	0
26	1530	13.75	38.27	219.8	132.54	63.49	8.45	11.99	0	0	0
27	1530	14.14	39.56	232.75	140.98	67.53	8.62	12.95	0	0	0
28	1530	14.51	40.8	244.92	149.42	71.57	8.75	12.16	0	0	0
29	1530	14.88	41.98	256.28	157.83	75.6	8.84	11.37	0	0	0
30	1530	15.23	43.12	269.08	166.22	79.62	8.97	12.8	453	40.57	Desbaste recomendado
31	1077	15.58	37.92	243.05	153.52	73.53	7.84	--	0	0	0
32	1077	15.92	39.29	256.82	162.09	77.64	8.03	13.77	0	0	0
33	1077	16.25	40.63	269.41	170.66	81.75	8.16	12.59	0	0	0
34	1077	16.57	41.93	282.75	179.22	85.85	8.32	13.34	0	0	0
35	1077	16.89	43.19	296.36	187.78	89.94	8.47	13.61	0	0	0
36	1077	17.19	44.41	308.53	196.31	94.03	8.57	12.17	0	0	0
37	1077	17.49	45.61	322	204.81	98.1	8.7	13.47	0	0	0
38	1077	17.79	46.77	333.91	213.28	102.16	8.79	11.92	0	0	0
39	1077	18.08	47.89	346.01	221.71	106.2	8.87	12.1	0	0	0
40	1077	18.36	48.99	359.2	230.11	110.22	8.98	13.19	335	66.6	Desbaste recomendado
41	742	18.63	41	307.99	203.18	97.32	7.51	--	0	0	0
42	742	18.9	42.17	319.74	211.29	101.21	7.61	11.75	0	0	0
43	742	19.17	43.31	331.88	219.38	105.08	7.72	12.14	0	0	0
44	742	19.43	44.44	345.97	227.44	108.94	7.86	14.09	0	0	0
45	742	19.68	45.54	357.26	235.48	112.8	7.94	11.3	0	0	0
46	742	19.93	46.62	368.58	243.49	116.63	8.01	11.32	0	0	0
47	742	20.17	47.67	383.05	251.47	120.45	8.15	14.47	0	0	0
48	742	20.41	48.71	394.9	259.41	124.26	8.23	11.85	0	0	0
49	742	20.65	49.72	406.27	267.31	128.04	8.29	11.37	0	0	0
50	742	20.88	50.72	418.06	275.17	131.81	8.36	11.8	0	0	Corte final

t = Idade (anos); *N* = Densidade (nº de árvores/ha); *H₀* = Altura dominante (m); *Wa* = Biomassa aérea em peso seco (t/ha); *C* = Carbono total (t/ha); *VCC* = Volume com casca (m³/ha), *CM* = Crescimento médio (m³/ha/ano); *CC* = Crescimento Corrente (m³/ha/ano); *Ne* = Número de árvores extraídas no desbaste; *Ve* = Volume extraído no desbaste

3.3.Cenários

Para melhor entendimento do uso da tração animal, foram criados três diferentes cenários com tipos de manejos distintos, a fim de se avaliar a dinâmica e os impactos ambientais que cada um envolvem. A aplicação do cenário visa responder à questão sobre a vantagem ou desvantagem de se utilizar a tração animal em processos florestais.

A abordagem do cenário mecanizado foi implementada em dois diferentes modelos de manejo florestal, conforme descrito na metodologia a seguir. O primeiro manejo ocorrerá no ano 30, envolvendo a remoção de 41m³ de madeira, enquanto o segundo manejo aconteceu no ano 40, com a remoção de 67m³ de madeira. Cada um desses manejos teve duração de um dia e compreendeu as seguintes etapas:

1. **Transporte Inicial:** Os trabalhadores foram transportados até a área de manejo por meio de um veículo adequado.
2. **Desbaste e Desgalhe:** Utilizando motosserras, foi realizada a etapa de desbaste e desgalhe das árvores selecionadas para remoção.
3. **Remoção do Tronco:** Um trator foi empregado para efetuar a remoção dos troncos das árvores cortadas até o ponto de coleta designado.
4. **Transporte Final da Madeira:** Após a coleta, a madeira foi transportada até a cidade ou o local de destino final.

Para mitigar as preocupações relacionadas à utilização de combustíveis fósseis, a opção considerada foi a adoção de tração animal, envolvendo dois equinos, como alternativa para executar atividades similares às realizadas por um trator. Essa abordagem, embora mantendo a eficácia da operação, visa minimizar o impacto na saúde e bem-estar dos animais. No contexto deste cenário, a estratégia para reduzir o impacto na saúde dos cavalos envolveu a divisão da primeira etapa de desbaste em dois dias e a segunda etapa de desbaste em três dias. Isso foi feito para assegurar que os cavalos fossem utilizados de maneira mais cuidadosa e que o trabalho fosse distribuído ao longo do tempo. Além disso, as etapas do cenário mecanizado foram replicadas, mas com a adição do transporte da madeira até o ponto de recolha realizado por dois cavalos.

O terceiro cenário considerou que, em produções florestais de grande porte, o uso de animais para o manejo pode não ser economicamente viável, devido à maior produtividade

alcançada por maquinário pesado. Além disso, questões relacionadas à saúde e ao bem-estar dos animais, bem como a falta de treinamento para operar com tração animal, também foram fatores levados em consideração. Diante desse contexto, foi desenvolvido um cenário misto que busca equilibrar a produtividade e a redução do impacto ambiental total do manejo florestal. Esse cenário foi projetado com a intenção de encontrar um compromisso entre a eficiência do maquinário e as preocupações ambientais e com o bem-estar dos animais, reconhecendo que em algumas situações a produtividade do maquinário é superior, mas que ainda é possível otimizar as práticas, usando a combinação de métodos de trabalho, para minimizar os impactos ambientais.

A metodologia será a mesma, porém 58% da área de operação será designada para o uso do trator, enquanto os cavalos serão responsáveis por operar em 42% da área restante. A decisão de dividir a área dessa maneira foi fundamentada na topografia do terreno (Figura 8), levando em consideração que a porção de maior elevação será operada pelos equinos. Essa divisão visa otimizar a eficiência da operação, aproveitando as vantagens do maquinário e dos cavalos de acordo com as características do terreno e as capacidades de cada recurso.



Figura 8 - Área adotada como base para o manejo florestal

Fonte: Google Earth (2023).

3.4.ACV Aplicada à gestão florestal

3.4.1. Definição de objetivo e âmbito

O principal objetivo desta ACV é avaliar os impactos ambientais causados por três diferentes cenários de manejo florestal, a fim de obter uma perspectiva sobre a utilização da

tração animal. A análise será realizada desde as operações básicas de manejo até o transporte de madeira para o destino final, caracterizada como uma ACV do tipo “*cradle-to-gate*” (berço ao portão).

3.4.2. Unidade Funcional

A unidade funcional deve ser definida pois fornecerá o fluxo de referência ao qual todas as entradas e saídas do sistema de produção florestal serão referidas. Para todos os cenários, a unidade funcional (UF) foi definida como 1 m³ de madeira com casca, e foi escolhida por estar presente na maioria dos estudos florestais também avaliados por meio da ACV. A densidade do pinheiro bravo está entre 364kg.m⁻³ e 469kg.m⁻³ (Lousada et al., 2008), dessa forma, foi adotado um valor médio de 415kg.m⁻³

3.4.3. Limites do Sistema

Os processos contabilizados será a ida até a área, o corte das árvores, a recolha da madeira e o transporte até o destino final. As fronteiras do sistema são representadas pela Figura 9 e são separadas em: Transporte até o local; Motosserra; Transporte dentro da área; e Transporte final. Processos auxiliares, como a produção de combustíveis fósseis de forragem para a alimentação dos animais, foram contabilizados no processo.

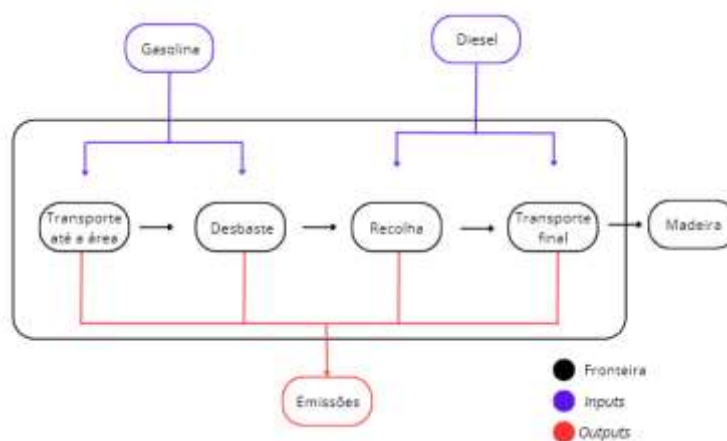


Figura 9 - Fronteiras do Sistema da ACV

Fonte: Autor (2023)

3.4.4. Inventário do Ciclo de Vida

Para a etapa de ICV, os dados foram organizados por meio de um inventário. Os dados primários apresentados na seção 3.2. foram ponderados e levados em consideração, uma vez que serviram como base para a criação de cada cenário. Informações adicionais não conhecidas

previamente (dados secundários) foram obtidos por meio de referências bibliográficas e na base de dados disponíveis no software.

3.4.5. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida é uma etapa crucial da ACV, em que são identificados, quantificados e avaliados os impactos ambientais potenciais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de seu ciclo de vida. Durante essa fase, são consideradas várias categorias de impacto ambiental, como mudanças climáticas, esgotamento de recursos naturais, acidificação, eutrofização, entre outras.

O processo de caracterização do modelo envolve o cálculo de fatores de caracterização para substâncias específicas, que representam o potencial de impacto de cada fluxo elementar em uma unidade comum. Esses fatores são então multiplicados pelos dados do inventário para obter os resultados da categoria de indicadores. Esses resultados são expressos em uma unidade comum para todas as contribuições dentro da categoria de impacto, como quilogramas equivalentes de CO₂ para a categoria de mudanças climáticas (Kellens et al., 2012).

Para realizar a AICV, são utilizadas diferentes metodologias para a caracterização das categorias de impactos, como o ReCipe e Eco-Indicator 99, que fazem o uso de “*endpoint*”, ou seja, se concentram nos resultados ambientais globais e nas categorias de impacto final, como mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, entre outros que podem impactar diretamente o meio ambiente e a saúde humana (Goedkoop, 2007; Goedkoop et al., 2009).

O método CML 2001 será utilizado neste trabalho, pois faz uma avaliação por meio dos “*midpoints*”, sendo as categorias de impacto intermediárias, geralmente associadas a atividades específicas, como a emissão de gases poluentes, consumo de energia, geração de resíduos, entre outros. Este método foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, na Holanda, com o objetivo de fornecer orientações para conduzir estudos de ACV (Guinée, 2002).

3.4.6. Categorias de Impacto

O guia do CML (Guinée, 2002) apresenta uma lista de categorias de avaliação de impacto que podem ser agrupadas da seguinte forma:

a) Categorias obrigatórias de impacto: São indicadores de categoria amplamente utilizados na maioria das Avaliações do Ciclo de Vida (ACV).

b) Categorias de impacto adicionais: Referem-se a indicadores operacionais que não são frequentemente incluídos em ACVs, mas podem ser relevantes em casos específicos.

c) Outras categorias de impacto: São categorias em que não há indicadores operacionais disponíveis, impossibilitando a inclusão quantitativa em estudos de ACV.

As categorias de impacto obrigatórias estão presentes em vários métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e permitem a comparação de resultados entre diferentes métodos. No caso do CML 2001, as principais categorias de impacto incluem Acidificação, Depleção da Camada de Ozônio, Depleção de Recursos Abióticos, Ecotoxicidade, Eutrofização, Formação Fotoquímica de Ozônio Troposférico, Potencial de Aquecimento Global, Oxidação Fotoquímica, Radiação Ionizante, Toxicidade Humana e Uso do Solo (Guinée, 2001a).

3.4.6.1. Potencial de Acidificação

A categoria de acidificação reflete o efeito das emissões de gases ácidos ao longo do ciclo de vida estudado. Os principais poluentes acidificantes são óxidos sulfúricos (SO_x), óxidos nitrosos (NO_x), ácidos nitrogenados (HNO₃), ácido clorídrico (HCl), ácido fluorídrico (HF) e amônia (NH₃), que causam impactos negativos no solo, águas subterrâneas, águas superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e materiais. Esses compostos reagem com a umidade, formando ácidos como o ácido sulfúrico e o ácido nítrico, que prejudicam ecossistemas terrestres, corpos de água doce e oceânicos, afetando a vegetação e outros organismos.

O potencial de acidificação é calculado em termos de dióxido de enxofre equivalente (kg SO₂ equivalentes), como representado pela Equação 1. Essa acidificação é causada principalmente pela emissão de compostos de enxofre e nitrogênio na atmosfera, resultantes de atividades humanas como queima de combustíveis fósseis, processos industriais e agricultura intensiva.

$$PA = \sum_i (PA_i * m_i)$$

Onde:

m é a massa em quilogramas da substância *i* liberada;

PA é o Potencial de Acidificação da substância.

3.4.6.2. Eutrofização

A eutrofização é um fenômeno ambiental que ocorre quando há um enriquecimento excessivo de nutrientes, principalmente nitrogênio (N) e fósforo (P), em corpos de água, como rios, lagos, lagoas e oceanos. Esse enriquecimento de nutrientes é geralmente causado por atividades humanas, como a agricultura intensiva, o uso de fertilizantes, o lançamento de esgotos não tratados e o despejo de resíduos industriais, e resulta na proliferação de algas. Essa proliferação bloqueia a luz solar e reduz a disponibilidade de oxigênio dissolvido na água, levando a um ambiente aquático desequilibrado, com redução de qualidade e perda da biodiversidade.

Essa categoria é avaliada em termos de fosfato equivalente (kg PO₄-equivalente) e pode ser calculado usando a equação 2:

$$PE = \sum_i (PA_i * m_i)$$

Onde:

m é a massa em quilogramas da substância i liberada;

PA_i é o Potencial de Eutrofização da substância.

3.4.6.3. Potencial de Aquecimento Global

O Potencial de Aquecimento Global está relacionado aos gases de efeito estufa que contribuem para o aumento da temperatura da superfície do planeta Terra, atuando como “cobertores” que retêm o calor na atmosfera. Este indicador é utilizado para comparar o potencial de aquecimento de cada gás em relação ao CO₂, que é o padrão de referência com um PAG de 1. O metano (CH₄), emitido por atividades agrícolas e de decomposição orgânica, e o óxido nitroso (N₂O), emitido pela agricultura e processos industriais, possuem um PAG significativamente maior do que o CO₂, indicando seu impacto mais potente na intensificação do efeito estufa. Além disso existem gases sintéticos como HFCs, PFCs e SF₆, usados em aplicações industriais específicas.

Seu cálculo é realizado a partir do CO₂ equivalente obtido pela multiplicação das emissões de gases de efeito estufa com seu potencial de aquecimento global para um determinado período, como mostrado na equação 3.

$$PAG = \sum_i (PA_{ia} * m_i)$$

Onde:

m é a massa em quilogramas da substância i liberada;

PA_i é o fator de conversão da emissão ao longo de um ano a , da categoria de aquecimento global

3.4.6.4.- Formação de ozônio fotoquímico

A formação de ozônio fotoquímico ocorre na atmosfera inferior, conhecida como troposfera, como resultado de reações químicas entre poluentes atmosféricos na presença de luz solar. Essas reações levam à formação de ozônio (O_3), que é um componente importante da poluição do ar. Algumas substâncias relacionadas a essa formação são os compostos orgânicos voláteis (COV), como o tolueno, formaldeído e compostos de hidrocarbonetos, emitidos por diversas fontes, como a queima de combustíveis fósseis, os óxidos de nitrogênio (NOx), formados principalmente durante a combustão de combustíveis fósseis em veículos, e os compostos orgânicos nitrogenados (NCOV), incluindo a amônia e outros compostos liberados por atividades agrícolas, como na aplicação de fertilizantes nitrogenados.

Quando expostos à luz solar, esses precursores de ozônio passam por reações químicas complexas que resultam na formação de ozônio Troposférico, sendo prejudicial à saúde humana, podendo causar problemas respiratórios, no meio ambiente com impactos negativos na agricultura e ecossistemas, além de contribuir para a poluição do ar e o aquecimento global, pois é um potente gás de efeito estufa. A unidade utilizada para medir o POFP é o quilograma de eteno equivalente (kg Ethene eq.)

3.4.6.5.- Depleção Abiótica

O Potencial de Depleção Abiótica refere-se ao esgotamento ou uso excessivo de recursos naturais não renováveis durante o ciclo de vida de um produto. São associados com o uso de recursos fósseis como carvão, petróleo e gás natural, utilizados como fonte de energia no setor de transporte, eletricidade, aquecimento e alguns processos industriais, e recursos minerais/metálicos como ferro, alumínio, cobre, zinco, chumbo e ouro, que são extraídos para uso na indústria de construção, eletrônicos, transporte e energia. Além do esgotamento de recursos, a extração desses materiais causa impactos significativos no meio ambiente, incluindo a degradação de ecossistemas, poluição do ar e da água e a perda de biodiversidade. Seu cálculo é realizado pelo kg de antimônio (Sb) equivalente, como mostrado na equação 5.

$$ADP = \sum_i (PA_{ia} * m_i)$$

Onde:

m é a massa em quilogramas do recurso i extraído;

PA_i é o Fator de caracterização do recurso extraído.

3.4.7. Software

O software utilizado será o GaBi, desenvolvido pela empresa Sphera. Esta é uma ferramenta de extrema relevância para a condução deste estudo, uma vez que desempenha um papel fundamental na análise do ciclo de vida e na avaliação do impacto ambiental de produtos. O software oferece um extenso banco de dados relevantes sobre custos, consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa, uso de recursos naturais e outros impactos ambientais. Essas informações são essenciais para uma avaliação precisa e abrangente de aspectos de sustentabilidade dos produtos, permitindo a identificação de áreas de melhoria e a de tomada de decisões informadas para promover a sustentabilidade (Thinkstep, 2019).

4. Resultados e Discussão

4.1. Modelo do Sistema

Com base nos dados do inventário, o modelo de sistema foi elaborado no software GaBi, tendo como base os processos primários coletados de acordo com o item 3.2. e os dados secundários, relacionados com a produção dos insumos necessários para o funcionamento das máquinas e dos transportes.

Na Figura 10, estão representados os processos pertencentes ao primeiro cenário, que é totalmente mecanizado. Foram considerados o transporte de pessoas e da recolha final da madeira, o processo de desbaste da madeira, que é representado pelo “*Power Sawing*”, o transporte da madeira dentro da área até o ponto de recolha final, representado pelo “*Transport*”, além dos insumos necessários para cada etapa, como a gasolina e o diesel.



Figura 10 - Modelagem do cenário mecanizado no Gabi

No cenário misto, o software não possibilitou a inserção dos dois tipos de remoção de madeira no mesmo plano, dessa forma os sistemas mecanizado e animal foram feitos separadamente, proporcional à sua área de operação. E por fim, para o cenário animal, a Figura 11 representa os processos utilizados, semelhante ao cenário mecanizado, apenas diferenciando a etapa de transporte da madeira dentro da área, representada pelo Animal (horse)”, e seu insumo utilizado, que no caso é o feno, representado pelo “*Winter wheat straw*”, considerado como um processo secundário.



Figura 11 - Modelagem do cenário animal no Gabi

4.2. Categorias de impacto

Após a obtenção dos resultados dos impactos ambientais para cada categoria, realizou-se a manipulação desses valores no software Microsoft Excel. Os valores absolutos para cada cenário são destacados pela Tabela 5, e posteriormente serviu de base para gerar os gráficos que representam a contribuição proporcional para o impacto em porcentagem (%). Essa abordagem foi adotada devido à diversidade das unidades de medida dos impactos em diferentes categorias. A representação percentual proporciona uma visualização mais clara e comparativa da influência de cada processo em relação a cada categoria de impacto ambiental, facilitando a interpretação dos resultados.

Tabela 5 - Valores absolutos da ACV

Categoria de impactos	Mecanizado	Misto	Animal	Unidade
ADP	5.3140 10 ⁻⁵	4.743 10 ⁻⁵	4,447 10 ⁻⁵	Kg Sb eq.
AP	2.1783	1.49	0.612	kg SO ₂ eq.
EP	0.5476	0.7962	1.1572	kg PO ₄ eq.
GWP	467.49	338.82	207.98	kg CO ₂ eq.
GWPE	473.33	415.29	381.12	kg CO ₂ eq.
POCP	0.1322	0.0799	0.02148	Kg Ethene eq.

ADP = Potencial de depleção abiótica; AP = Potencial de Acidificação; EP = Potencial de Eutrofização; GWP = Potencial de Aquecimento Global; GWPE = Potencial de Aquecimento Global excluindo carbono biogênico; POCP = Potencial de Formação de Foto-oxidantes.

4.3. Cenário mecanizado

A Figura 12 destaca a contribuição de emissões de cada etapa para as respectivas categorias: Potencial de Depleção Abiótica (ADP), Potencial de Acidificação (AP), Potencial de Eutrofização (EP), Potencial de Aquecimento Global (GWP), Potencial de Aquecimento Global excluindo o carbono biogênico (GWPE) e por fim, o Potencial de Formação de Foto-oxidantes (POCP).

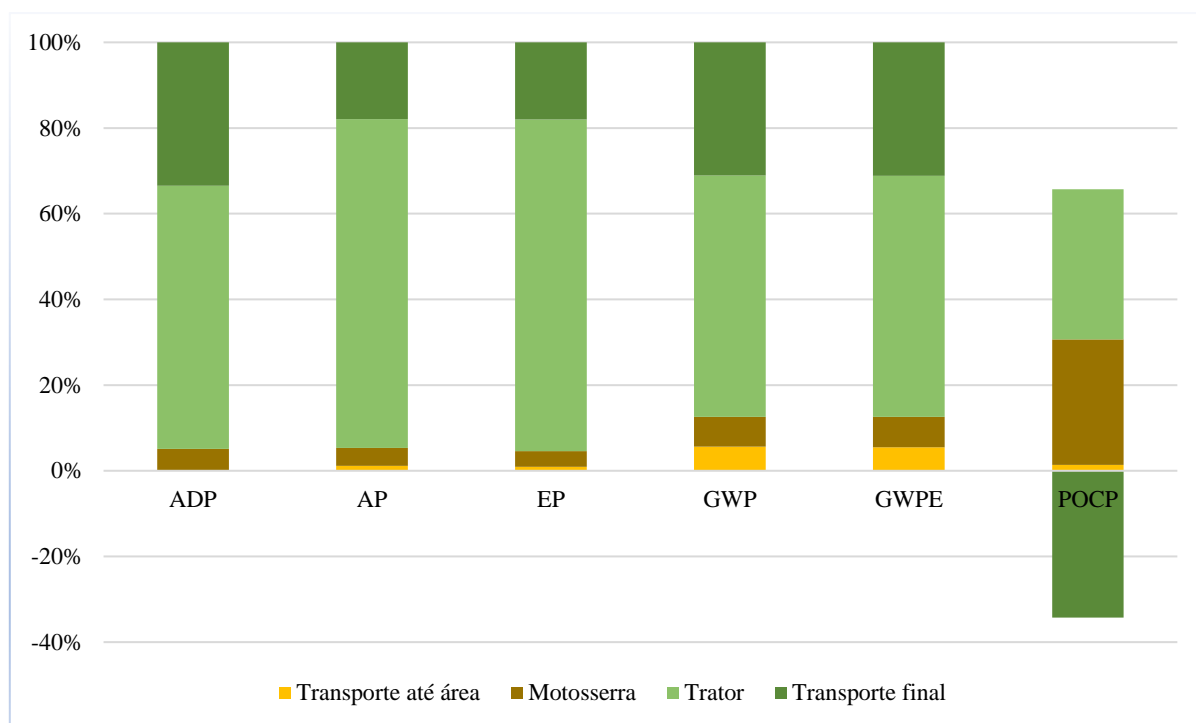


Figura 12 – Contribuição dos processos no cenário mecanizado

Fonte: ADP = Potencial de depleção abiótica; AP = Potencial de Acidificação; EP = Potencial de Eutrofização; GWP = Potencial de Aquecimento Global; GWPE = Potencial de Aquecimento Global excluindo carbono biogênico; POCP = Potencial de Formação de Foto-oxidantes.

Na categoria de depleção abiótica, o transporte até à área de exploração contribuiu com 5%, a utilização da motosserra no processo de desbaste também contribuiu com 5% das emissões e as etapas que mais emitiram kg de antimônio (Sb) foram a utilização do trator no processo de remoção da madeira até o ponto de recolha, com 58% das emissões, e o processo de transporte final da madeira, com 32%. Esse resultado está diretamente ligado com a quantidade de combustíveis fósseis utilizados, uma vez que o potencial de ADP é uma métrica que avalia o impacto ambiental da extração e do uso de recursos minerais, como a gasolina e o diesel, ambos derivados do petróleo.

O uso de diesel também está relacionado ao potencial de acidificação, porém neste caso mais associado às emissões de compostos ácidos que ocorrem durante sua queima nos motores dos veículos, como o SO₂, um composto altamente ácido que, quando liberado na atmosfera, pode reagir com outros poluentes e formar o H₂SO₄, outro contribuinte para a acidificação da atmosfera e da água. Nessa categoria o uso do trator foi responsável por 76% das emissões, já que utiliza de mais quantidades de diesel que o transporte final, que emitiu 18%. Além disso, a motosserra participou com 4% das emissões, impulsionada pela utilização da gasolina e do óleo

lubrificante, e a etapa do transporte até a área com o carro, responsável por apenas com 1% das emissões.

A porcentagem de contribuição para a categoria de eutrofização segue a mesma ordem que a de acidificação. Esse valor pode ser explicado, uma vez que a emissão de SO₂ na atmosfera e sua subsequente deposição ácida podem afetar o ambiente aquático, alterando o pH da água. Essa mudança no pH pode, por sua vez, influenciar a solubilidade e a disponibilidade de íons fosfato, o que pode ser um fator que contribui indiretamente para a eutrofização de corpos d'água, além disso pode estar associado com o consumo de alumínio para a fabricação do maquinário.

Seguindo a ordem, as categorias de potencial de aquecimento global e potencial de aquecimento excluindo o carbono biogênica também possuem valores expressíveis quando se trata da utilização de veículos, ambos com uma contribuição de 56% na utilização do trator, 31% de emissões provenientes do transporte final, 7% de emissões com o uso da motosserra e 5% para o transporte até a área, que é realizado pelo carro. Essa categoria é altamente influenciada pelas emissões decorrentes da combustão do combustível para produção de energia mecânica das máquinas (Koslowski et al., 2014).

Na classificação relacionada à formação de foto-oxidantes, é observado um impacto negativo significativo na etapa do transporte final, representando uma redução de -34%. O processo que realiza a queima do diesel nos motores a combustão envolve altas temperaturas e possui a capacidade de eliminar aproximadamente 99% dos Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) relevantes para os cálculos nesta categoria, conforme relata o estudo de Koslowski et al. (2014). Entretanto, o valor negativo indicado está associado ao método de cálculo do CML. Isso ocorre devido aos fatores atribuídos aos óxidos de nitrogênio (NO_x) no CML, onde o fator para NO é significativamente negativo e para NO₂ é ligeiramente positivo. Essa característica pode levar a conclusões distorcidas, sugerindo que as emissões de NO_x têm um efeito redutor sobre o ozônio (Johnson, 2017).

4.4.Cenário tração animal

A Figura 13 foi elaborada para ilustrar a contribuição percentual de cada etapa do manejo florestal, que faz uso da tração animal, em relação a cada categoria de impacto ambiental. Em relação a depleção abiótica, a etapa que mais contribuiu foi a do uso do animal, com 45%, e está associada aos impactos da produção agrícola de sua forragem, como a utilização do solo e

extração dos nutrientes, utilização de água para irrigação e aplicação de fertilizantes. Em relação aos transportes e uso de combustíveis, o transporte final emitiu 38% das emissões de Sb, acompanhado do transporte até a área com 11% e o uso da motosserra com 6%.

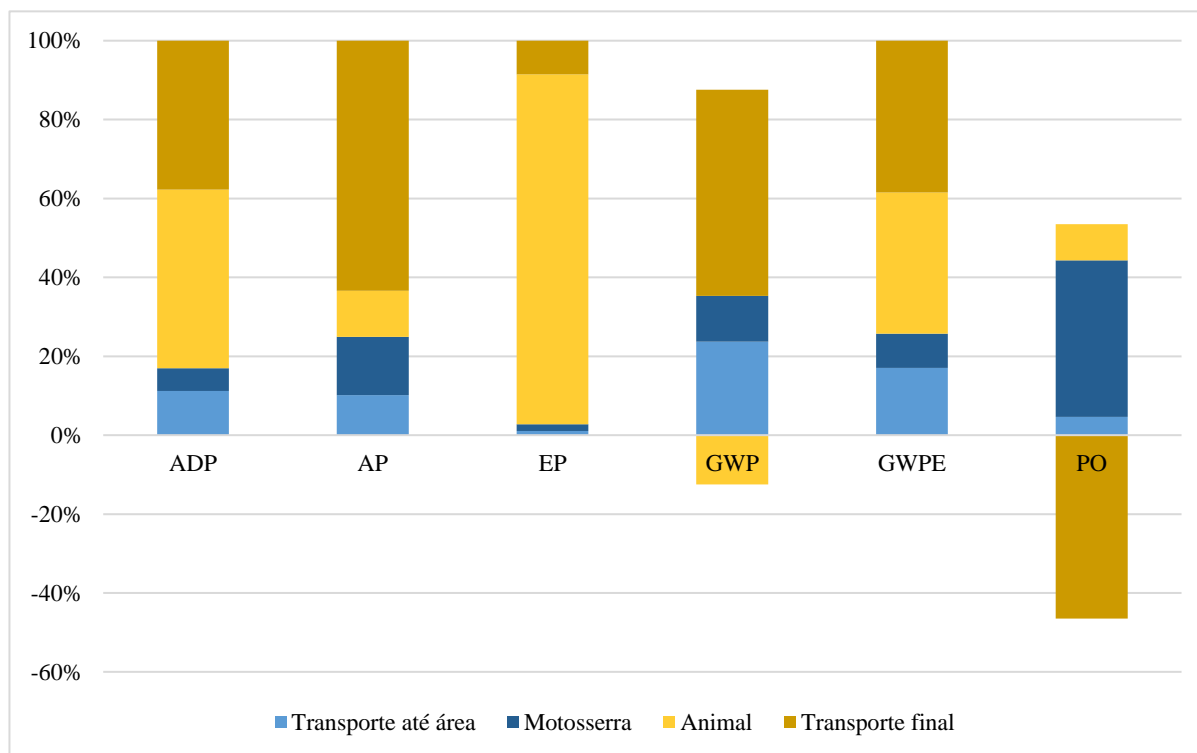


Figura 13 - Contribuição dos processos no cenário animal

Fonte: ADP = Potencial de depleção abiótica; AP = Potencial de Acidificação; EP = Potencial de Eutrofização; GWP = Potencial de Aquecimento Global; GWPE = Potencial de Aquecimento Global excluindo carbono biogênico; POCP = Potencial de Formação de Foto-oxidantes.

Na categoria de acidificação, a utilização e combustão do diesel continua sendo o maior problema, com 63% das emissões de SO₂, seguido da motosserra com 15%, com a combustão da gasolina. O uso do cavalo representou 12% das emissões, também relacionadas com a produção de forragem, uma vez que se utiliza maquinários agrícolas no plantio, além do uso de fertilizantes. Já na categoria de eutrofização, o uso do cavalo contribui com 89% dos impactos, e esse valor está associado principalmente com os dejetos dos animais, que contêm nutrientes, incluindo nitrogênio e fósforo (Silveira et al., 2012).

A categoria de potencial de aquecimento global é fortemente influenciada pelo uso de combustíveis e veículos a combustão. No entanto, é importante destacar a contribuição significativa da etapa relacionada ao uso de animais, que registrou um impacto negativo de 17%

nessa categoria. Esta contribuição está relacionada ao seu alimento, ou seja, à fixação de carbono realizada pelo processo de fotossíntese enquanto a planta estava em crescimento.

Porém, ao considerar o potencial de aquecimento global excluindo o componente de carbono biológico, a contribuição do uso dos cavalos para as emissões chega a 36%, principalmente com a emissão direta de CO₂ durante sua respiração, e aos gases de efeito estufa, como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), que são produzidos durante a fermentação anaeróbica no ceco e cólon do sistema digestivo dos cavalos. Além disso, a decomposição anaeróbica de fezes, quando expostas ao ambiente, também contribui para essas emissões (Wartell, 2009). Na década de 70, estudos apontavam que a fermentação entérica era o principal processo que contribuía para a pegada de carbono do animal, porém, estudos mais recentes mostram que essas emissões foram ultrapassadas pelas do processo de produção do alimento do animal, com a constante utilização de máquinas agrícolas, ocupação do solo, aplicação de fertilizantes, entre outros processos que contribuem para esse aumento (Spugnoli e Dainelli, 2012).

De modo semelhante ao cenário mecanizado, o transporte final apresentou emissões negativas devido ao método de cálculo do CML, e a etapa da motosserra foi a mais significativa, com 40%, devido aos VOC's emitidos durante a combustão, no qual o motor não é capaz de eliminar.

4.5.Cenário misto

Os resultados do cenário misto estão representados na Figura 14. No âmbito desta análise, é possível observar que a etapa de transporte até à área de exploração e da utilização de motosserra possuem a mesma contribuição que os resultados anteriores, uma vez que a quantidades de insumos para a utilização não foi alterada de um cenário para o outro.

Em relação às categorias de depleção abiótica, potencial de acidificação e eutrofização, a etapa que mais contribuiu para o impacto foi a de remoção de madeira, que é o conjunto das atividades realizadas pelo maquinário e pelo animal. Vale ressaltar que o gráfico apresenta o valor de todas as etapas que englobam os processos com o intuito de facilitar o entendimento e visualizar a diferença entre eles.

Sobre a depleção abiótica, dentro dos 55% de emissões causadas pela etapa de remoção, 68% foi pela produção do diesel e 32% pela produção do alimento do cavalo. No potencial de acidificação é possível observar que a etapa utilizando o cavalo não é tão significativa, sendo

responsável apenas por 2% das emissões da categoria. Porém, na categoria de eutrofização os impactos gerados pelos cavalos são superiores aos do trator, contribuindo com 54% das emissões, uma vez que os compostos utilizados para o cálculo, como nitrogênio, fósforo e potássio, estão mais presentes no ciclo biológico do animal do que no diesel.

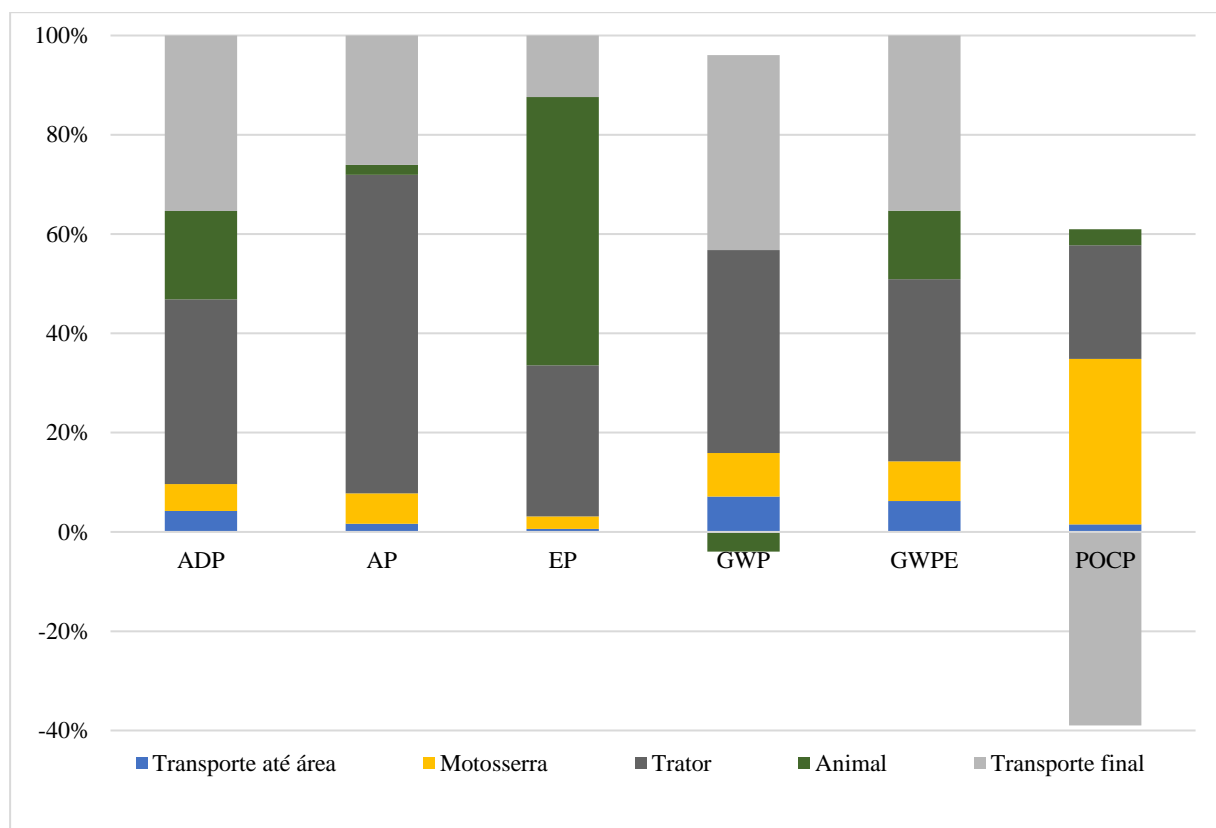


Figura 14 - Contribuição dos processos no cenário misto

Fonte: ADP = Potencial de depleção abiótica; AP = Potencial de Acidificação; EP = Potencial de Eutrofização; GWP = Potencial de Aquecimento Global; GWPE = Potencial de Aquecimento Global excluindo carbono biogênico; POCP = Potencial de Formação de Foto-oxidantes.

Na categoria de potencial de aquecimento global, mais uma vez a produção de forragem contribuiu para o resultado negativo, e mesmo no GPWE, as emissões provenientes do trator foram mais acentuadas, sendo responsáveis por 73% do total de impacto na categoria. Por fim, no POCP, a etapa que mais contribuiu para as emissões foi a da motosserra, com 33%, como dito anteriormente, o resultado está altamente associado pela forma em que o método do CML calcula o fator de emissão para ozônio.

4.6. Comparação de cenários

Após analisar cada cenário separadamente e entender a contribuição de cada etapa do manejo florestal para as categorias de impacto, foi elaborado um novo gráfico no modelo radar para melhor visualização dos resultados de cada cenário, quando comparados.

A Figura 15 representa a contribuição deles em porcentagem. O cenário mecanizado foi escolhido como base para representar o máximo de contribuições de cada categoria (100%), pois é considerado como um manejo florestal comum, mostrando a influência de cada cenário quando comparado. Os resultados estimam-se que o cenário com a tração animal e o cenário misto mecanizado-animal, contribuíram em menor quantidade para cinco, das seis categorias analisadas.

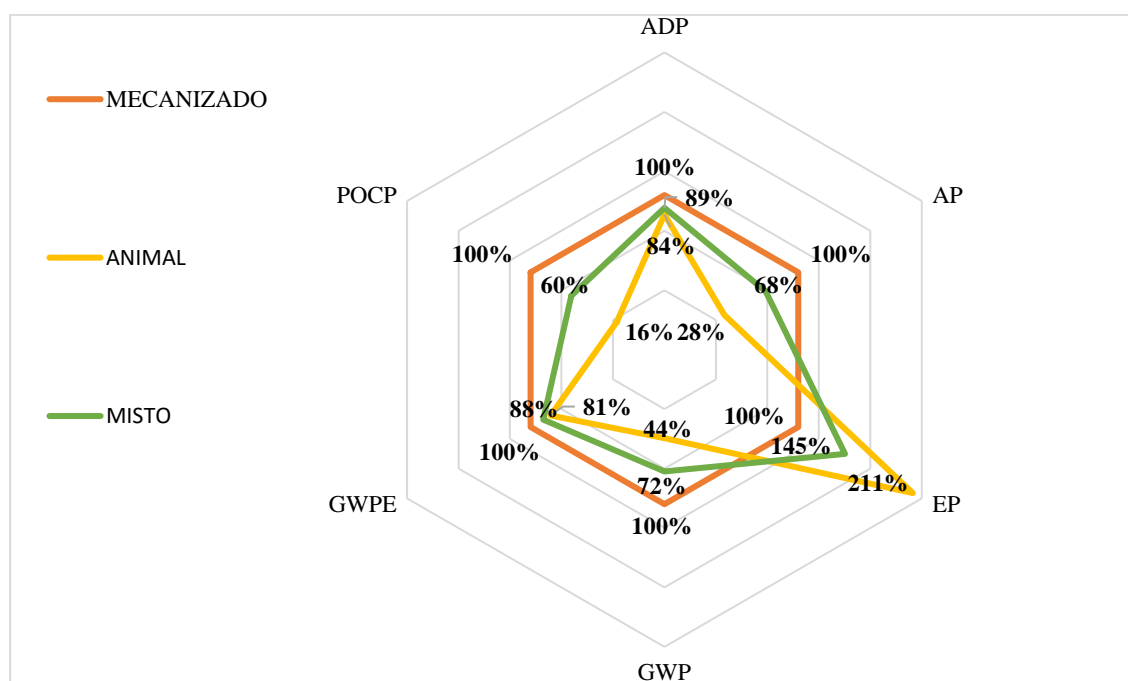


Figura 15 - Contribuição dos cenários nos impactos da ACV

Fonte: ADP = Potencial de depleção abiótica; AP = Potencial de Acidificação; EP = Potencial de Eutrofização; GWP = Potencial de Aquecimento Global; GWPE = Potencial de Aquecimento Global excluindo carbono biogênico; POCP = Potencial de Formação de Foto-oxidantes.

O cenário que apresentou o melhor desempenho ambiental dentro do manejo florestal foi o de tração animal. Em relação ao GWP, a diferença entre o cenário mecanizado e de tração animal foi de 56%, ou seja, uma redução de 259,51 kg CO₂ eq., resultado esse que é consistente quando comparado a estudos anteriores e até mesmo em relação as outras categorias. Em Cerutti et al. (2014) é visto a redução de 75% do potencial de impacto no cenário da tração animal

quando comparado a tração mecânica, o que auxilia na validação do resultado obtido nesse estudo.

A categoria de GWPE teve uma menor diferença entre os cenários, com redução de 92,21 kg de CO₂ eq. em todo o manejo florestal. Este valor é, sobretudo, devido aos gases que a categoria utiliza para realizar o cálculo, que são os gases de efeito estufa sem origem biogênica, como o CH₄ e N₂O, liberados principalmente pela fermentação anaeróbia do animal, como explicado anteriormente no item 4.4., e esses gases apresentam o potencial muito mais elevado quando se compara ao CO₂. O CH₄, por exemplo, tem um PAG cerca de 25 vezes maior, enquanto o do N₂O é de 298 vezes, comparado em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2007), além disso o cálculo também inclui os impactos causados na produção de forragem do animal, com uma possível utilização de fertilizantes nitrogenados. Estimativas percentuais relatadas de emissões de gases de efeito estufa de plantações de madeira para fins industriais indicam que atividades como adubação contribuem com 15% das emissões totais, empilhamento e queima de resíduos com 32% e que a colheita florestal, desbaste comercial e o transporte contribuem com mais de 51% das emissões de GEE (González-García et al. 2014).

Para as categorias de acidificação de formação de foto-oxidantes, os resultados se assemelham devido também à semelhança entre os cálculos de impacto, que incluem as emissões causadas pela queima de combustíveis fósseis em máquinas florestais e caminhões de transporte, além da utilização de energia ou seja, como no cenário com a utilização animal tiveram menos usos desses maquinários, o valor de impacto foi reduzido. Para a acidificação estima-se uma redução de 1,56 kg SO₂ eq., e para formação de foto-oxidantes de 0,11 kg eteno eq.

Em paralelo, para a categoria de EP, o cenário com tração animal foi o que obteve o maior resultado. A eutrofização é um processo pelo qual os corpos d'água, como rios, lagos e lagoas, recebem um excedente de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, resultando em um rápido crescimento de algas e plantas aquáticas. Isso pode ter sérias consequências ambientais, incluindo a diminuição dos níveis de oxigênio na água, a morte de peixes e a deterioração geral da qualidade da água. O esterco liberado pelo animal e a utilização de fertilizantes na produção de seu alimento foram destacados como os principais responsáveis por esse aumento, além dos demais processos, totalizando 1,16 kg PO₄ eq. Embora tenha sido contabilizado como impacto, o esterco, quando bem manejado, pode servir como fertilizante para a área de produção, sem contabilizar suas emissões dentro da ACV, inclusive, alguns

estudos mostram que o esterco de equídeos é um dos melhores fertilizantes orgânicos (Nemecek et al., 2011).

O cenário misto serviu nesse estudo para servir como um meio termo entre a utilização de um sistema totalmente mecanizado e um totalmente feito pela tração animal. Os resultados mostram que é possível obter um sistema com impactos reduzidos, que apresentou uma emissão de 338,82 kg CO₂ eq. para o GWP, uma diferença de 32% entre o cenário mecanizado. Além de ser um cenário para o qual se estimam menores impactos ambientais, também é considerado uma opção para áreas com maiores declives ou até mesmo de difícil acesso, já que o animal possui a capacidade de acessar algumas partes em que para a máquina é dificultoso e, em alguns cenários demanda de mais combustível para conseguir realizar uma força maior.

Além da utilização da tração animal junto com o maquinário, opções que auxiliam a redução do impacto ambiental de manejos florestais é a troca dos combustíveis fósseis para biocombustíveis. A utilização do biodiesel, por exemplo, reduz em mil vezes a emissão de SO₂, em relação ao diesel, reduz o material particulado em 50% e contribui para a redução dos GEE em até 48,8% (Comissão Europeia, 2010). Estudos referente ao uso de biodiesel em tratores agrícolas relataram uma redução de 36% nas emissões de poluentes, diminuição da opacidade da fumaça e que se evitaram em média 30kg de CO₂ eq. por hora de utilização (da Penha Simon *et. al.*, 2018 ; Pinto, 2020). Outro destaque para uma possível redução é em relação as emissões presentes no ciclo de vida da motosserra, que ao substituir o óleo lubrificante por biocombustíveis também apresentam uma redução de 83% nas emissões (Roiz e Paquot, 2013).

Um dos detalhes principais que influencia positivamente a utilização da tração animal é a diferença dos insumos de energias, uma vez que os animais obtêm 60% com fontes de energia renováveis e o sistema de tração mecânica apenas 9%. Além disso, contribui para a redução de compactação do solo florestal, pois exerce uma pressão em pontos específicos do terreno, enquanto os tratores causam faixas de pressão, e os efeitos de compressão das máquinas agrícolas penetram em zonas muito mais profundas, causando a compactação do subsolo (Arvidsson et al., 2003). Estudos relatam ainda a redução de 30% das perdas das culturas ao trocar as máquinas por animais de trabalho, e da contribuição com 15 toneladas anuais de adubo orgânico para a cultura (Ralisch *et. al.*, 2010).

Em termos de eficiência, o animal apresenta algumas particularidades que requerem maiores atenção e cuidados, como os intervalos de descansos entre as atividades, a possibilidade de se machucarem pela má distribuição da força de tração pelo seu corpo ou até mesmo por

Capítulo IV: Resultados e Discussão

serem forçados a carregarem mais peso que o ideal. Dessa forma, uma atividade intensiva não é recomendada, devendo sempre ser acompanhado por um veterinário para prezar pela saúde e bem estar do animal. Em contrapartida as máquinas apresentam uma vantagem em muitos aspectos, pois não precisam de intervalos de descanso, aguentando maiores jornadas de trabalho e podendo manusear cargas superiores ao mesmo tempo.

No viés social, a utilização da tração animal auxilia no desenvolvimento de pequenos agricultores que não possuem recurso para a compra de máquinas, proporcionando melhoria na qualidade da produção e na qualidade de vida, ressalta também a importância do animal como patrimônio cultural e organismo que respeita o meio ambiente. Suas vantagens econômicas também são relevantes, um estudo na França em que abordava a economia do cavalo na floresta, identificaram que o animal segue sendo uma ferramenta eficiente em algumas operações de silvicultura, e que ele é consideravelmente mais econômico que o maquinário para transportar madeira de volume médio, entre 0,25 e 0,5 m³ (Paul *et. al.*, 2006).

5. Conclusões

Com base nas análises realizadas, estima-se que a utilização da tração animal promova uma redução relevante de 56% nas emissões de CO₂ equivalente em comparação com o cenário mecanizado. Esse resultado se deve a várias razões. Primeiramente, a tração animal não requer o uso de combustíveis fósseis, que são fontes significativas de emissões de CO₂. Além disso, os animais usados na tração, como cavalos ou bois, produzem menos emissões diretas de CO₂ durante seu ciclo de vida em comparação com os tratores movidos a diesel, que em seu processo de produção e operação envolve uma pegada de carbono considerável, incluindo a extração e processamento de minerais para fabricação de máquinas, enquanto a tração animal pode ser mais simples e localizada.

Por outro lado, a tração animal apresentou resultados elevados na categoria de eutrofização devido ao aporte significativo, tanto de fertilizantes para produção de forragem, quanto o esterco animal que é depositado no solo. Embora o esterco animal seja rico em nutrientes, podendo ser utilizados como fertilizantes orgânicos, dentro do software foi contabilizado como um impacto ambiental. Para estudos futuros é recomendável que essa etapa seja aprofundada para resultados mais conclusivos.

A integração de um manejo misto que combina a tração animal e tratores agrícolas não pode oferecer uma abordagem equilibrada e eficaz para reduzir os impactos ambientais. Enquanto a tração animal ajuda a minimizar as emissões de gases de efeito estufa e os riscos de compactação do solo, os tratores agrícolas oferecem eficiência e capacidade de carga adicionais. Essa sinergia permite otimizar a produtividade florestal e, ao mesmo tempo, reduzir a pressão sobre os ecossistemas. A combinação de ambos os métodos pode ser adaptada às necessidades específicas de cada situação, contribuindo para um manejo mais sustentável e equitativo dos recursos florestais.

O uso do biodiesel em maquinários de sistemas florestais desempenha um papel fundamental na redução dos impactos ambientais associados às operações florestais. O biodiesel, produzido a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais ou gorduras animais, oferece uma alternativa mais limpa aos combustíveis fósseis e, quando utilizado em tratores e outros equipamentos florestais, reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o CO₂ equivalente, ajudando a mitigar as mudanças climáticas.

Capítulo V: Conclusão

Ainda relativamente ao uso do biodiesel, este desempenha um papel importante na construção de uma nova matriz energética mais sustentável. Ao diversificar as fontes de energia, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis, em Portugal, como em outros países, é possível fortalecer a resiliência energética e reduzir os riscos associados às flutuações nos preços do petróleo e às emissões de GEE, optando por mecanismos de tração animal. Isso não apenas contribui para a proteção do meio ambiente, mas também promove a segurança energética e estimula o desenvolvimento de uma economia mais verde e eficiente em termos de recursos.

A avaliação de ciclo de vida (ACV) emergiu como uma ferramenta confiável e essencial na conclusão da avaliação proposta entre a utilização da tração animal e a tração mecânica em operações de manejo florestal, permitindo uma compreensão abrangente dos impactos ambientais de ambas as abordagens, levando em consideração desde a extração da matéria-prima até o uso final dos recursos. O software GaBi demonstrou-se uma ferramenta valiosa e de fácil entendimento para conduzir essa análise complexa, fornecendo informações confiáveis que respaldam a tomada de decisões informadas e a busca por práticas mais sustentáveis no manejo florestal. Além disso, o método do CML se mostrou capaz de apresentar dados coerentes, porém no que diz respeito a formação de ozônio há um impasse, e é sugerido para que em próximas pesquisas outro método seja utilizado com o intuito de realizar uma comparação.

A utilização da tração animal no manejo florestal, apesar de suas vantagens ambientais, apresenta algumas limitações a serem consideradas. Uma das principais limitações reside na dependência de animais, o que implica cuidados e manutenção constantes, além da limitação em termos de capacidade de carga em comparação com máquinas mecânicas. Em áreas inclinadas, a tração animal pode ser menos eficiente e enfrentar dificuldades adicionais devido à topografia desafiadora.

No entanto, a importância da gestão florestal sustentável permanece como um princípio fundamental. Independentemente da escolha entre tração animal ou mecânica, a gestão sustentável das florestas deve ser priorizada para garantir a preservação da biodiversidade, a proteção dos solos e a minimização dos impactos ambientais negativos. Adaptações às condições locais, especialmente em áreas inclinadas, são essenciais para garantir que as práticas de manejo sejam eficazes e ambientalmente responsáveis.

Capítulo V: Conclusão

Um desafio adicional é a falta de dados detalhados e específicos sobre o uso da tração animal em atividades de silvicultura, o que torna a avaliação precisa dos impactos ambientais mais complexa. A coleta de dados confiáveis e a pesquisa contínua são necessárias para informar de maneira mais sólida as decisões relacionadas à escolha das abordagens de manejo florestal.

Olhando para o futuro, as perspectivas envolvem a busca por inovações que tornem a tração animal mais eficiente e sustentável, bem como o desenvolvimento contínuo de máquinas com menor pegada ambiental. À medida que a conscientização sobre a importância da gestão florestal sustentável cresce, espera-se que novas tecnologias e práticas surjam para atender às necessidades específicas das áreas florestais, considerando a diversidade de contextos e desafios que elas apresentam.

REFERÊNCIAS

- Aggestam, F., & Pülzl, H. (2018). Coordinating the uncoordinated: The EU forest strategy. *Forests*, 9(3), 125.
- Alves, R. R. N. (2018). Chapter 18 - The Ethnozoological Role of Working Animals in Traction and Transport*. In *Ethnozoology* (pp. 339-349): Academic Press.
- Arvidsson, J., Sjöberg, E., & van den Akker, JJ (2003). Compactação do subsolo por colheitadeiras pesadas de beterraba no sul da Suécia: III. Avaliação de risco usando um modelo de água no solo. *Soil and Tillage Research*, 73 (1-2), 77-87.
- Azevedo, J., Cadavez, V., Arrobas, M., & Pires, J. (2016). Sustentabilidade da montanha portuguesa: realidade e desafios.
- Bahls, J. E. (1991). Horsepower logging. *American Forests*, 97(1-2), 49-51.
- Beretta, C. C. (1988). *Tração animal na agricultura*. NBL Editora.
- Bosner, A., Poršinsky, T., & Stankić, I. (2012). *Forestry and life cycle assessment* (pp. 139-160). Rijeka: InTech.
- Bravo, F., & Montero, G. (2001). Site index estimation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the High Ebro Basin (northern Spain) using soil attributes. *Forestry*, 74(4), 395-406.
- Caetano, M. Á. L. (2011). *A certificação florestal como instrumento político* (Doctoral dissertation, Universidade Tecnica de Lisboa (Portugal)).
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest ecology and management*, 338, 124-138.
- Cambria D, Pierangeli D (2012) Application of a life cycle assessment to walnut tree (*Juglans regia* L.) high quality wood production: a case study in southern Italy. *J Cleaner Prod* 23:37-46
- Carvalho, J. P. F. (2019). As Bases e o Desenvolvimento da Silvicultura—Ao Encontro da Sustentabilidade. *História da Ciência e Ensino: construindo interfaces*, 20, 222-237.
- Cerutti, A. K., Calvo, A., & Bruun, S. (2014). Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 64, 396-403
- Curran, M. P., Miller, R. E., Howes, S. W., Maynard, D. G., Terry, T. A., Heninger, R. L., ... & Schoenholtz, S. H. (2005). Progress towards more uniform assessment and reporting of soil disturbance for operations, research, and sustainability protocols. *Forest Ecology and Management*, 220(1-3), 17-30.
- Chen, J., Colombo, S. J., Ter-Mikaelian, M. T., & Heath, L. S. (2014). Carbon profile of the managed forest sector in Canada in the 20th century: sink or source?. *Environmental Science & Technology*, 48(16), 9859-9866.
- Chia, E. (2004). Principes, méthodes de la recherche en partenariat: une proposition pour la traction animale.
- da Penha Simon, C., da Vitória, E. L., das Graça Lacerda, E., & de Jesus Freitas, I. L. (2018). Operating performance of a tractor working with different ratios of castor bean and jatropa biodiesel. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 26(1), 35-42.
- Devlin, G., Klvac, R., & McDonnell, K. (2013). Fuel efficiency and CO2 emissions of biomass based haulage in Ireland—A case study. *Energy*, 54, 55-62.
- Dias, A. C., & Arroja, L. (2012). Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 37, 368-376.
- Dietrich, V. (1941). *Forstliche Betriebswirtschaftslehre*. Bd. III, Erfolgsrechnung, Zielsetzung.
- Direção-Geral das Florestas (1999). Critérios e Indicadores de Gestão Florestal Sustentável ao Nível da Unidade de Gestão. Disponível em: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/ac4885443d4da038>

- EC-European Commission. (2010). How to develop a sustainable energy action plan (SEAP)—guidebook. *Covenant of Mayors, Brussels, Belgium*.
- Eurostat (2017) Agriculture, forestry and fishery statistics. Publications Office of the European Union, Luxembourg. Disponível em: [Eurostat 2017](#)
- Elbakidze, M., Angelstam, P., Yamelnyets, T., Dawson, L., Gebrehiwot, M., Stryamets, N., ... & Manton, M. (2017). A bottom-up approach to map land covers as potential green infrastructure hubs for human well-being in rural settings: A case study from Sweden. *Landscape and Urban Planning*, 168, 72-83.
- ICNF (s.d.). Importância económica das atividades que integram as fileiras florestais. Disponível em: <https://www.icnf.pt/florestas/fileirasflorestais/importanciaeconomica>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
- ENEI (s.d.). Estratégia Nacional de Investigação e Inovação para uma Especialização Inteligente 2014-2020. Eixo Temático 4 – Recursos Naturais e Ambiente: Floresta. [em linha]. Disponível em https://arquivo.pt/wayback/20230310104843mp_/https://former.fct.pt/esp_inteligente/docs/Floresta_ENEI_Aveiro.pdf
- Engel, A.-M., Wegener, J., & Lange, M. (2012). Greenhouse gas emissions of two mechanised wood harvesting methods in comparison with the use of draft horses for logging. *European Journal of Forest Research*, 131(4), 1139-1149.
- FAO (2000). World Watch List for Domestic Animal Diversity. Food and Agriculture Organisation of the United Nations , Roma, Italy (2000)
- FAO. (2004). Reduced Impact Logging in Tropical Forests: Literature Synthesis, Analysis and Prototype Statistical Framework. Forest Harvesting and Engineering Programme. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy (2004)
- FAO. (2010). Draught animal power...an overview, 2010b. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/draught_ap_overview.pdf
- FAO. (2016). Food and Agriculture strategies. Forestry for a low-carbon future. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5857e.pdf>
- FAO. (2020). *FAOSTAT Forestry Data*. Food and Agriculture Organization, Rome. Disponível em <https://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en/>
- Fagundes, M., Nunes, L. F., Azevedo, J., de Castro-Pardo, M., Almeida, E. S., & Pérez-Rodríguez, F. (2019). Avaliação de um sistema de apoio à decisão para melhoria da gestão florestal em ecossistemas Mediterrânicos. Uma aplicação na região do Nordeste de Portugal.
- Forest Europe (1993, junho, 16-17). General Guidelines for the Sustainable Management of Forests in Europe (H1). Segunda Conferência Ministerial para a Proteção das Florestas na Europa, Helsínquia/Finlândia. Disponível em: https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2022/01/MC_helsinki_resolutionH1.pdf
- Freitas, L. C. D. (2004). Avaliação quantitativa de impactos ambientais da colheita florestal em plantios equiâneos de eucalipto.
- FSC (2002). Principles and Criteria for Forest Stewardship. Disponível em: <http://ic.fsc.org/principles-and-criteria.34.htm>
- Gartzia-Bengoetxea, N., Gonzalez-Arias, A., Merino, A., & de Arano, I. M. (2009). Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(8), 1674-1683.

- Goedkoop, M. (2007). The eco-indicator 99 methodology. *Journal of Life Cycle Assessment, Japan*, 3(1), 32-38.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008. *A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1*, 1-126.
- González-García, S., Berg, S., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2009). Environmental impacts of forest production and supply of pulpwood: Spanish and Swedish case studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 340-353.
- González-García, S., Moreira, M. T., Dias, A. C., & Mola-Yudego, B. (2014). Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of forest operations in Europe: Environmental and energy profiles. *Journal of cleaner production*, 66, 188-198.
- Guinée, J. B. et al Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards - Characterisation and Normalisation Factors. Holanda: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), 2001a.
- Guinée, J. B. (Ed.). (2002). Handbook on life cycle assessment - Operational guide to the ISO Standards (Vol. 7). Kluwer Academic.
- Hartanto, H., Prabhu, R., Widayat, A. S., & Asdak, C. (2003). Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *Forest ecology and management*, 180(1-3), 361-374.
- Heinimann, H. R. (2007). Forest operations engineering and management—the ways behind and ahead of a scientific discipline. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 28(1), 107-121.
- Herold, P., Schlechter, P., & Scharnhözl, R. (2009). Modern use of horses in organic farming. *Fédération Européenne Du Cheval de Trait Pour La Promotion de Son Utilisation*.
- Holvoet, B.; Muys, B. Sustainable forest management worldwide: a comparative assessment of standards. *International Forestry Review*. v.6. p. 99-122. 2004.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Jansen, J. (2000). Agriculture, energy and sustainability. Case studies of a local farming community in Sweden. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae-Agraria*, (253).
- Jensen, A. A., Hoffman, L., Møller, B. T., Schmid, A., Christiansen, K., Elkington, J., & van Dijk, F. (1997). Life Cycle Assessment (LCV): A guide to approaches, experiences and information sources.
- Johansson, S., Belfrage, K., & Olsson, M. (2013). Impact on food productivity by fossil fuel independence—A case study of a Swedish small-scale integrated organic farm. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 63(2), 123-135.
- Johnson, E. (2017). Cars and ground-level ozone: how do fuels compare?. *European Transport Research Review*, 9(4), 1-13.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *The international journal of life cycle assessment*, 8, 324-330.
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z., & Duflou, J. R. (2012). Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO 2 PE! initiative (cooperative effort on process emissions in

- manufacturing). Part 1: Methodology description. *The international journal of life cycle assessment*, 17, 69-78.
- Koslowski, L. A. D., Schroeder, T., Jantsch, L. R., Medeiros, S. H. W., & Vaz, C. (2014). Study of combustion gases from diesel S 10 and S 50. In 4^o International Congress of Environmental Technologies. Bento Gonçalves/RS.
- Kovacic, I., Waltenberger, L., & Gourlis, G. (2016). Tool for life cycle analysis of facade-systems for industrial buildings. *Journal of Cleaner Production*, 130, 260-272.
- Klein, D., Wolf, C., Schulz, C., & Weber-Blaschke, G. (2015). 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 556-575.
- Lazdinis, M., Angelstam, P., & Pülzl, H. (2019). Towards sustainable forest management in the European Union through polycentric forest governance and an integrated landscape approach. *Landscape Ecology*, 34, 1737-1749.
- Lousada, J., Noronha, M., Lopes, D., & Silva, M. (2008). Relações entre Peso, Volume e Densidade para a Madeira de Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster* Ait.) Cultivado em Portugal. *Silva Lusitana*, 16(2), 183–196.
- Maestri, R., Sanquetta, C. R., Scolforo, J. R., do Amaral Machado, S., & Dalla Corte, A. P. (2013). Modelagem do crescimento florestal considerando variáveis do ambiente: revisão. *Scientia Agraria*, 14(3).
- Magagnotti, N., & Spinelli, R. (2011). Integrating animal and mechanical operations in protected areas. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 32(2), 489-499.
- Marchi, E., Chung, W., Visser, R., Abbas, D., Nordfjell, T., Mederski, P. S., ... & Laschi, A. (2018). Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of the Total Environment*, 634, 1385-1397.
- Mendes, N. C. (2013). *Métodos e modelos de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Moscardo, A. (2010). Il cavallo da lavoro non va in pensione. *MAD (Macchine Agricole Domani)*, 3, 47-49.
- Muhammed N, Koike M, Sajjaduzzaman M, Sophanarith K. 2005. Reckoning social forestry in Bangladesh: Policy and plan versus implementation. *Forestry*, 78(4): 373–383.
- Mbuvi, D., & Boon, E. (2009). The livelihood potential of non-wood forest products: The case of Mbooni Division in Makueni District, Kenya. *Environment, Development and Sustainability*, 11, 989-1004.
- Nemecek, T., Huguenin-Elie, O., Dubois, D., Gaillard, G., Schaller, B., & Chervet, A. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. *Agricultural systems*, 104(3), 233-245.
- Nunes, L. J., Nogueira, J., Rodrigues, J. B., Azevedo, J. C., Oliveira, E., de Figueiredo, T., & Picos, J. (2023). Modern Animal Traction to Enhance the Supply Chain of Residual Biomass. *AgriEngineering*, 5(2), 1039-1050.
- Paul, M., Lombaerde, F., Jourez, B. (2006). Approche Économique du Cheval en Forêt. *Forêt Wallonne*, 81, pp. 15-25
- Pérez-Rodríguez, F., Nunes, L., & Azevedo, J. C. (2018). Solving multi-objective problems for multifunctional and sustainable management in maritime pine forest landscapes. *Climate*, 6(4), 81.
- Polzl, W. B., dos Santos, A. J., Timofeiczuk Jr, R., & Polzl, P. K. (2003). Cadeia produtiva do processamento mecânico da madeira-segmento da madeira serrada no estado do Paraná. *Floresta*, 33(2).

- Ralisch, R., Almeida, E. D., Silva, A. P. D., Pereira Neto, O. C., & Guimarães, M. D. F. (2010). Morphostructural characterization of soil conventionally tilled with mechanized and animal traction with and without cover crop. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 1795-1802.
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 6-B/2015 Estratégia Nacional para as Florestas. (2015). Diário da República n.º 24, Série I de 2015-02-04
- Riala, M., Athanassiadis, D., la Hera, P., & Rodriguez, J. (2015). Development potential of inventions in forest biomass harvesting.
- Rigby, D., & Cáceres, D. (2001). Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural systems*, 68(1), 21-40.
- Rodrigues, J.B., Schlechter, P., Spychiger, H., Spinelli, R., Oliveira, N. and Figueiredo, T.. "The XXI century mountains: sustainable management of mountainous areas based on animal traction" *Open Agriculture*, vol. 2, no. 1, 2017, pp. 300-307.
- Rož, J., & Paquot, M. (2013). Life cycle assessment of a biobased chainsaw oil made on the farm in Wallonia. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 1485-1501.
- Rydberg, T., & Jansén, J. (2002). Comparison of horse and tractor traction using energy analysis. *Ecological Engineering*, 19(1), 13-28.
- Silveira, E., Dittrich, J., Fugii, K., Borges, M., Moreira, V., Leh, A., & Kluthcovsky, L. (2011). Environmental Impact of Waste from Stables in Two Training Centers in the Region of Curitiba-PR. In *Twenty-Seventh International Conference on Solid Waste Technology and Management. The Journal of Solid Waste Technology and Management*.
- Simpson, M., Pichler, V., Tyrväinen, L., Collins, K., Martin, S., Strange, N., & Vuletic, D. (2008). The economics and social values of forests for recreation and nature tourism: A research overview. Cost Action E33: Forests for Recreation and Nature Tourism (FORREC)(pdf, <http://www.openspace.eca.ac.uk/coste33/outputs.htm>).
- Scientific Applications International Corporation (SAIC), Curran, M. A., National Risk Management Research Laboratory (US), & Office of Research and Development, Environmental Protection Agency, United States. (2006). Life-cycle assessment: principles and practice.
- Scharnhölz, R. (2009). Mit dem Ross im Wingert. *Starke Pferde* (12), 48, 48-49.
- Schweier, J., Magagnotti, N., Labelle, ER et al. Avaliação do Impacto de Sustentabilidade das Operações Florestais: uma Revisão. *Curr Forestry Rep* 5 , 101–113 (2019).
- Spugnoli, P., Dainelli, R., D'Avino, L., Mazzoncini, M., & Lazzeri, L. (2012). Sustainability of sunflower cultivation for biodiesel production in Tuscany within the EU Renewable Energy Directive. *biosystems engineering*, 112(1), 49-55.
- Swann, W. J. (2006). Improving the welfare of working equine animals in developing countries. *Applied Animal Behaviour Science*, 100(1-2), 148-151.
- Tsujimoto, T., Sakurai, H., Hashiguchi, K., & Inoue, E. (2005). Study on the Development of Agricultural Machines for Small-Scale Farmers, Part 2 (Applied Technology to the Improvement of an Animal-Drawn Plow for Morocco and Africa). *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 14-20.
- UNFCCC. 1998. Organización de las Naciones Unidas, Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático, Kyoto, Naciones Unidas. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Vanclay, J. K. (1994). *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. Cab International.
- Wartell, B. A. (2009). *Anaerobic digestion of equine waste* (Doctoral dissertation, Rutgers University-Graduate School-New Brunswick).

Wyss M (1999) Messung und Beurteilung des Bodendrucks beim Einsatz von Zugtieren
Diploma thesis, Institute of Agricultural Engineering, Swiss College of Agriculture, Zollikofen

ANEXOS

Anexo I – Resultado dos valores absolutos de cada impacto para o cenário mecanizado

Categoria de impactos		ADP	AP	EP	GWP	GWPE	POCP
Unidades		kg Sb eq	Kg SO ₂ eq	kg PO ₄ eq	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq	kg etileno eq
Total processo		5,31 10 ⁻⁵	2,1783	0,5476	467,49	473,33	0,1322
Transporte até a área	Total	0,2 10 ⁻⁵	0,02492	0,00489	26,28	25,94	0,00561
	Gasolina	0,2 10 ⁻⁵	0,0169	0,0031	4,73	5,6	0,0045
	Carro	-	0,0079	0,0017	21,8	20,7	0,0011
Motosserra	Total	0,256 10 ⁻⁵	0,0904	0,0201	32,2	33,2	0,1211
	Emissões	-	0,069	0,0162	26,25	26,25	0,1154
	gasolina	9,78 10 ⁻⁷	0,0082	0,0015	2,2964	2,706	0,0022
	Óleo	1,58 10 ⁻⁶	0,0132	0,0024	3,6945	4,354	0,0035
Trator	Total	3,08 10 ⁻⁵	1,6664	0,4226	262,07	264,8	0,1450
	Diesel	3,08 10 ⁻⁵	0,1544	0,0306	23,67	39	0,0225
	Trator	-	1,512	0,392	238,4	225,8	0,1225
Transporte final	Total	1,67 10 ⁻⁵	0,3882	0,09845	144,58	146,59	-0,1417
	Diesel	1,67 10 ⁻⁵	0,0842	0,0167	12,88	21,29	0,0123
	Caminhão	-	0,304	0,0817	131,7	125,3	-0,1541

Anexo II – Resultado dos valores absolutos de cada impacto para o cenário animal

Categoria de impactos		ADP	AP	EP	GWP	GWPE	POCP
Unidades		kg Sb eq	Kg SO ₂ eq	kg PO ₄ eq	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq	kg etileno eq
Total processo		4,44 10 ⁻⁵	0,612	1,1572	207,98	381,12	0,0215
transporte até a área	Total	0,5 10 ⁻⁵	0,0623	0,0122	65,7	64,85	0,0140
	Gasolina	0,5 10 ⁻⁵	0,042	0,0077	11,7	13,85	0,0112
	Carro	-	0,0203	0,0045	54	51	0,0028
motosserra	Total	0,25 10 ⁻⁵	0,0904	0,0201	32,20	33,20	0,1210
	Emissões	-	0,0690	0,0162	26,25	26,25	0,1154
	Gasolina	0,09 10 ⁻⁵	0,0082	0,0015	2,2964	2,7063	0,0022
	Óleo lub	0,15 10 ⁻⁵	0,0132	0,0024	3,6945	4,3545	0,0035
Cavalo	Total	2,01 10 ⁻⁵	0,0711	1,0264	-34,50	136,48	0,0281
	Comida	2,01 10 ⁻⁵	0,0711	0,0804	-174,10	10,58	-0,0018
	Animal	-	-	0,9460	139,60	125,90	0,030
Transporte final	Total	1,67 10 ⁻⁵	0,3882	0,0984	144,58	146,59	-0,141
	Diesel	1,67 10 ⁻⁵	0,0842	0,0167	12,88	21,29	0,0123
	caminhão	-	0,3040	0,0817	131,70	125,30	-0,1541

Anexo II – Resultado dos valores absolutos de cada impacto para o cenário misto

Categoria de impactos		ADP	AP	EP	GWP	GWPE	POCP
Unidades		kg Sb eq	Kg SO ₂ eq	kg PO ₄ eq	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq	kg etileno eq
Total processo		4,74 10 ⁻⁵	1,49	0,7962	338,82	415,29	0,0799
transporte até a área	Total	0,2 10 ⁻⁵	0,0249	0,0049	26,28	25,94	0,0056
	Gasolina	0,2 10 ⁻⁵	0,0168	0,003	4,68	5,54	0,0044
	Carro	0	0,0081	0,0018	21,6	20,4	0,0011
motosserra	Total	0,256 10 ⁻⁵	0,0904	0,0201	32,2	33,2	0,1211
	Emissões	-	0,069	0,0162	26,25	26,25	0,1154
	Gasolina	9,78 10 ⁻⁷	0,0082	0,0015	2,2964	2,7063	0,0022
	Óleo lub	0,158 10 ⁻⁵	0,0132	0,0024	3,6945	4,3545	0,0035
Trator	Total	2,6 10 ⁻⁵	0,9865	0,6727	135,76	209,56	0,0950
	Diesel	1,76 10 ⁻⁵	0,0887	0,0176	13,56	22,42	0,0129
	trator	-	0,868	0,2244	136,7	129,9	0,0703
Cavalo	Comida	0,84 10 ⁻⁵	0,0298	0,0337	-73,1	4,44	-0,0007
	Animal	0	0	0,397	58,6	52,8	0,0125
Transporte final	Total	1,67 10 ⁻⁵	0,3882	0,0984	144,58	146,59	-0,1417
	Diesel	1,67 10 ⁻⁵	0,0842	0,0167	12,88	21,29	0,0123
	Caminhão	0	0,304	0,0817	131,7	12,,3	-0,1541