

RAQUEL ÁLVARES LEÃO

AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRAÇAMENTO DE MADEIRA TROPICAL:
ESTUDO DE CASO NO ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce
Co-orientador: Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck da Silva

CURITIBA
2012

À memória de Breno Silva Faria.

Nosso encontro nessa vida, ainda que fugaz, será eternamente a minha melhor lembrança deste mestrado.

AGRADECIMENTOS

Ao INPA, na pessoa do Dr. Niro Higuchi, pela oportunidade de participar do projeto INCT Madeiras da Amazônia, pelo apoio logístico durante a coleta de dados e pela bolsa de estudos através da CAPES.

À Precious Woods Amazon Mil Madeireira, por permitir realizar a pesquisa em suas áreas, pelo apoio e infra-estrutura durante a coleta de dados e pela colaboração com informações durante todo o mestrado. À equipe de exploração florestal que nos ajudou diretamente na coleta de dados, pelo cuidado com nossa segurança e pela inestimável cooperação com o nosso trabalho.

Aos guerreiros Marilu Ramos, grande companheira durante toda a coleta de dados, e Fabiano Emmert, pela parceria e pela garra, sem as quais não teria sido possível realizar a etapa de campo, fundamental para este.

Ao estimado Prof. Julio Eduardo Arce, por ter sido sempre solícito quando precisei, pela calma, pelo exemplo, pelas oportunidades e pelas lições para a vida inteira.

Ao Prof. Carlos Arinei Lindbeck da Silva, pelas contribuições com este trabalho, agregando uma abordagem não somente florestal.

A toda a equipe do Laboratório de Melhoramento Genético (LAMEF-UFPR), nas pessoas do Prof. Antonio Higa e da Dona Carmem, pelo acolhimento e pela oportunidade do convívio multidisciplinar.

Aos secretários do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR, Reinaldo Mendes de Souza e David Teixeira de Araújo, pela paciência e pelo empenho nos trâmites administrativos corriqueiros na vida do pós-graduando.

Às flores mais belas do meu jardim curitibano, Ana Carolina Cunha Arantes, Andressa Ribeiro e Danuza Stall, companheiras de república, de mestrado, de vida. Pelo companheirismo, pela alegria, pela força, pelo amor.

Ao meu amigo Rafael Küster de Oliveira, pela amizade verdadeira e grande apoio intelectual nesse trabalho.

Ao meu querido Breno (*in memoriam*), pelos melhores momentos deste mestrado, por ter me colocado em contato com o melhor de mim, pela música, pelos passeios de bicicleta, pelos sonhos compartilhados, pelo amor verdadeiro.

À minha família, meus pais, Moema e Clayrton, e minhas irmãs, Mônica e Raísa, pelo apoio sincero em todas as minhas decisões e pelo imenso amor, sempre maior que qualquer distância.

RESUMO

A conversão de uma árvore em toras é uma etapa importante na cadeia produtiva de madeira, pois é a primeira de uma série de etapas que resultarão por fim em produtos como lâminas, madeira serrada, celulose e outros. As decisões tomadas no traçamento afetarão, portanto, toda a sequência de etapas seguintes no processamento. Muitas técnicas de otimização vêm sendo aplicadas às operações de traçamento, especialmente para madeiras de coníferas. Alguns trabalhos foram desenvolvidos para madeiras duras de florestas temperadas, mas muito pouco ainda para madeira tropical, em especial no Brasil. O objetivo do presente trabalho foi caracterizar as operações de traçamento num estudo de caso numa empresa florestal de manejo de florestas nativas, no estado do Amazonas, Brasil. As operações de traçamento da empresa foram descritas identificando as variáveis de decisão e o aproveitamento efetivo da operação. O aproveitamento do traçamento de 141 toras foi medido em 6 lotes de espécies distintas. Para as mesmas toras, foi simulado o traçamento otimizado por meio do software *Trozador*[®], que utiliza basicamente dois algoritmos: 1) algoritmo gerador de números úteis, que identifica os cortes potenciais (números úteis) a serem avaliados ao longo da tora; e 2) algoritmo de programação dinâmica, que determina a combinação ótima de produtos a serem obtidos que maximize o aproveitamento da tora. O programa executa a otimização para cada tora. O aproveitamento e os tipos de produtos resultantes do traçamento real e traçamento otimizado foram comparados. A diferença do aproveitamento em metros foi convertida em volume e em preço para estimar quanto a empresa poderia deixar de perder ao otimizar o traçamento. O aproveitamento no traçamento real foi superior a 95% e no traçamento otimizado foi de cerca de 100%. Com o ganho de aproveitamento no traçamento otimizado nos lotes avaliados a empresa deixaria de perder cerca de 4 milhões de euros em resíduos. O aproveitamento das toras no traçamento real é prejudicado pelas altas taxas de não conformidade dos produtos em relação às dimensões estabelecidas pela empresa. As toras das menores classes de comprimento têm um ganho maior de aproveitamento no traçamento otimizado, já que toras menores exigem combinações de produtos de menores comprimentos, tornando o processo decisório mais complexo para o traçador, pois tem de ser feito rápida e mentalmente, sem auxílio de ferramenta computacional. Outra evidência para esta dificuldade é o maior número de produtos de maiores comprimentos resultante do traçamento real, sendo os de menores comprimentos por vezes até negligenciados. Ainda assim, o traçamento no cenário real apresenta alta taxa de aproveitamento, indicando que aliando a habilidade do traçador ao auxílio de ferramentas matemáticas e computacionais, pode-se atingir um melhor aproveitamento da matéria-prima.

Palavras-chave: Traçamento otimizado; floresta amazônica; programação dinâmica; manejo de florestas nativas.

ABSTRACT

The conversion of a tree into logs is an important step in the production chain of wood: it is the first of a series of steps that eventually result in products such as veneer, lumber, pulp etc. The bucking decisions will affect all the following sequence of steps in the wood processing. Many optimization techniques have been applied to bucking operations, especially for softwoods. Some studies were carried out for temperate hardwood forests, but yet very few for tropical timber, particularly in Brazil. The aim of this study was to characterize the bucking operations in a case study at a forest enterprise management of native species in the state of Amazonas, Brazil. The bucking operations were described, by identifying the decision variables and the effective utilization of the logs. The bucking effective utilization was measured for 141 logs from 6 different species lots. For the same logs, the optimized bucking was simulated using the software *Trozador*®, which basically holds two algorithms: 1) a heuristic algorithm which identifies the potential cuts (useful numbers) to be evaluated along the stem, and 2) a Dynamic Programming based algorithm to determine the optimum combination of products to be obtained which maximize the stem profit. The program performs the optimization for each log. The effective utilization and the types of products resulting from real and optimal bucking were compared. The difference of effective utilization in meters was converted in volume and then in price, in order to estimate how much could the enterprise save by optimizing the bucking. The effective utilization in the real bucking was above 95% and in the optimized bucking it was about 100%. Due to this gain in effective utilization in the evaluated lots, the enterprise could be avoiding the loss of about 4 million euros in residues. The effective utilization of logs in the real bucking is hampered due to the high rates of non-conformity of the products in relation to the dimensions set by the company. The logs of the lower length classes have gained a higher effective utilization, from the real to the optimized bucking, since smaller logs require combinations of products of smaller lengths, making the decision process more complex for the bucking, as it has to be mentally and quickly done, without aid of computational tool. Further evidence for this difficulty is the largest number of products of larger length than of smaller ones in real bucking, the last being sometimes even neglected. Nevertheless, the cutting in real scenario has a high effective utilization rate, indicating that by combining the bucking's ability with the aid of mathematical and computational tools, tropical wood can more effectively be utilized.

Keywords: Optimal bucking; Amazon forest; dynamic programming, native forest management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

QUADRO 1	– FRONTEIRAS MADEIREIRAS DA AMAZÔNIA LEGAL EM 2009. ...	14
FIGURA 1	– MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE ITACOATIARA, ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL.	19
FIGURA 2	– SEQUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DAS TORAS PARA O TRAÇAMENTO	22
QUADRO 2	– EXEMPLO DO CÁLCULO DO APROVEITAMENTO REAL.....	28
QUADRO 3	– PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO GERADOR DE NÚMEROS ÚTEIS.....	31
FIGURA 3	– TELA DE ENTRADA DE DADOS DO TROZADOR® ADAPTADA PARA A PESQUISA.....	33
FIGURA 4	– DISTRIBUIÇÃO DA VARIÁVEL COMPRIMENTO PARA CADA LOTE DE ESPÉCIE EM GRÁFICO TIPO BOXPLOT.....	37
FIGURA 5	– DISTRIBUIÇÃO DA VARIÁVEL VOLUME PARA CADA LOTE DE ESPÉCIE EM GRÁFICO TIPO BOXPLOT	38
FIGURA 6	– DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA ABSOLUTA E CUMULATIVA (%) DO COMPRIMENTO TOTAL (M) DAS TORAS ANTES DO TRAÇAMENTO	38
FIGURA 7	– DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA ABSOLUTA E CUMULATIVA (%) DO COMPRIMENTO TOTAL (M) DAS TORAS EM CADA LOTE, ANTES DO TRAÇAMENTO.....	40
FIGURA 8	– APROVEITAMENTO REAL NOS LOTES APÓS O TRAÇAMENTO	41
FIGURA 9	– APROVEITAMENTO DAS TORAS APÓS O TRAÇAMENTO, EM VALOR ABSOLUTO E RELATIVO.....	42
FIGURA 10	– QUANTIDADES DOS TIPOS DE PRODUTO GERADAS NOS TRAÇAMENTOS REAL E OTIMIZADO EM CADA LOTE.....	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – LOTES DE TORAS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DO TRAÇAMENTO	23
TABELA 2 – TIPOS DE PRODUTOS DO TRAÇAMENTO PARA CADA LOTE DE ESPÉCIES NA EMPRESA EM ESTUDO.....	26
TABELA 3 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS COMPRIMENTO E VOLUME DAS TORAS ANTES DO TRAÇAMENTO	35
TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DO DIÂMETRO MÉDIO E AFILAMENTO MÉDIO DAS TORAS ANTES DO TRAÇAMENTO.....	36
TABELA 5 – PROPORÇÃO ENTRE TORAS INTEIRAS E NÃO INTEIRAS NOS LOTES ANTES DO TRAÇAMENTO	39
TABELA 6 – PROPORÇÃO DE TORETES EM CONFORMIDADE COM AS DIMENSÕES DOS PRODUTOS ESTABELECIDOS	41
TABELA 7 – DIFERENÇAS ENTRE TRAÇAMENTO REAL E OTIMIZADO, EM TERMOS DE APROVEITAMENTO, QUANTIDADE DE TORETES E RESÍDUO TOTAL POR LOTE	43
TABELA 8 – APROVEITAMENTO PROPORCIONAL NO TRAÇAMENTO REAL E NO TRAÇAMENTO OTIMIZADO, POR CADA CLASSE DE COMPRIMENTO DAS TORAS.	43
TABELA 9 – ESTIMATIVA DO VALOR DE GANHO POTENCIAL, EM EUROS, COM A OTIMIZAÇÃO DO TRAÇAMENTO.....	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 PRODUÇÃO MADEIREIRA NA AMAZÔNIA	12
2.1.1 Mercado mundial de madeira tropical	12
2.1.2 Recursos Madeireiros da Amazônia	13
2.2 TRAÇAMENTO DE MADEIRA (TROPICAL)	15
2.3 OTIMIZAÇÃO DO TRAÇAMENTO ATRAVÉS DE ALGORITMOS MATEMÁTICOS	17
3 MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1 LOCALIZAÇÃO	19
3.2 OPERAÇÕES DE TRAÇAMENTO	20
3.3 COLETA DE DADOS	23
3.4 ANÁLISE DOS DADOS	25
3.4.1 Conformidade das dimensões dos produtos	26
3.4.2 Aproveitamento Real	27
3.4.3 Simulação pelo Trozador®	29
<i>Algoritmo 1 – Gerador de números úteis</i>	30
<i>Algoritmo 2 – Programação Dinâmica</i>	31
<i>Entradas e Saídas (Inputs e Outputs)</i>	32
3.4.4 Comparação dos cenários	33
4 RESULTADOS	35
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS TORAS	35
4.2 ANÁLISE DE CONFORMIDADE DOS PRODUTOS	39
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS	42
5 DISCUSSÃO	46
6 SUMÁRIO E CONCLUSÕES	49
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE	54

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é ainda a maior área reserva de floresta tropical do mundo e um dos ambientes com maior biodiversidade do planeta. Por esta razão, esse bioma é uma importante fonte de recursos naturais e de serviços ecossistêmicos nas escalas local, regional e global. Em consequência, a Floresta Amazônica está sempre no foco das discussões internacionais sobre desenvolvimento sustentável e construção dos novos paradigmas de desenvolvimento da sociedade mundial.

O Brasil, por ser o país detentor da maior área do bioma, é cobrado como o maior responsável na gestão dos recursos naturais da Amazônia. Os principais responsáveis por esta pressão são, em geral, os países europeus, que, ao mesmo tempo, são também os principais compradores de madeira tropical no mundo. Isso significa que na verdade a sociedade deseja ter acesso aos bens e serviços da Floresta Amazônica, *i. e.* madeira tropical, mas com garantias de sustentabilidade do uso destas florestas, para que não sejam co-responsabilizados pela degradação desses ambientes.

A oferta de madeira tropical do Brasil ainda encontra-se menor que a de alguns países asiáticos e africanos, tradicionais fornecedores desta matéria-prima. Entretanto, relatórios periódicos da Organização Internacional de Madeira Tropical (*International Tropical Timber Organization – ITTO*) revelam a tendência de queda da oferta de madeira por parte desses países, consequência de um longo período de utilização dos recursos florestais sem planejamento e sem uma gestão adequada (ITTO, 2010; ITTO, 2011). Naturalmente, esta conjuntura cria uma grande oportunidade para que o Brasil se torne o maior fornecedor mundial de madeira tropical (CLEMENT e HIGUCHI, 2006), mas com a responsabilidade de não cometer os mesmo erros dos outros países produtores.

Muitas lições foram aprendidas durante anos de avaliação do manejo de florestas tropicais no mundo, mas ao mesmo tempo os efeitos dos ciclos de manejo ao longo do tempo sobre a dinâmica florestal não foram completamente desvendados. No Brasil, os dois principais experimentos com exploração florestal estão localizados (1) no Pará, conduzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA – Amazônia Oriental) desde 1975, e (2) no Amazonas, conduzido pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) desde 1987. O

primeiro já completou o primeiro ciclo de rotação, que é de 35 anos, enquanto para o segundo ainda faltam 10 anos. Durante todo esse período foram geradas muitas informações sobre os efeitos do manejo sobre a floresta, mas os efeitos de longo prazo, após sucessivas rotações, além dos efeitos de mudança do mercado de madeira, tornam difícil a tarefa de determinar um modelo de manejo adequado para a floresta amazônica.

Enquanto essa lacuna vem sendo preenchida, esforços têm sido feitos na difusão de técnicas de manejo com o menor impacto possível à floresta e a máxima redução de desperdícios de matéria prima, especialmente na fase de exploração. Entretanto a maior parte do desperdício ocorre na fase de processamento da madeira, com níveis de apenas 30% de aproveitamento (GERWING *et al.*, 2000). Dessa forma, ainda que o aproveitamento seja máximo na fase de exploração, o manejo não será sustentável com tais níveis de aproveitamento na fase de processamento da madeira.

O traçamento é uma etapa intermediária entre a exploração (floresta) e o processamento da madeira (serraria), que consiste em transformar uma árvore derrubada em toras. Na literatura internacional, vários autores ressaltam a importância do traçamento na otimização do aproveitamento e do valor da madeira e, conseqüentemente, da floresta. No Brasil, praticamente não existem trabalhos publicados sobre o assunto e tampouco algum manual com técnicas específicas para otimização do traçamento em floresta tropical. Empresas florestais na Amazônia, por exemplo, divergem quanto ao momento do traçamento: algumas traçam as toras ainda na floresta, antes do transporte até a indústria, enquanto outras transportam as toras inteiras para serem traçadas no pátio da serraria.

No sentido de validar a importância do traçamento no manejo florestal na Amazônia, a presente dissertação teve por objetivo avaliar o processo de traçamento numa empresa de manejo de floresta nativa na Amazônia brasileira, de forma a caracterizar as operações, identificar as variáveis importantes no processo e apontar oportunidades de melhoria através de ferramentas de pesquisa operacional já aplicadas em outros países e também no Brasil para florestas plantadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO MADEIREIRA NA AMAZÔNIA

2.1.1 Mercado mundial de madeira tropical

A ITTO (2011) estimou a área global de florestas tropicais no mundo em cerca de 1,6 bilhões de hectares, dos quais 53% são florestas primárias. Em seu relatório de 2010, essa instituição estimou a produção de madeira tropical em 134,2 milhões de m³ em toras e 55 milhões de m³ em produtos processados de madeira, como madeira serrada, laminados e compensados. Apesar de não ser um dos principais exportadores de madeira tropical, o Brasil é um dos principais produtores, sendo o 1º no ranking dos produtores de madeira serrada (15,5 milhões de m³) e o 2º do ranking dos produtores de toras (24 milhões), atrás apenas da Indonésia (ITTO, 2010). Brasil e Indonésia foram os países com as maiores taxas de desmatamento em 1990 e, apesar de terem reduzido essas taxas desde então, continuam sendo os países com maiores taxas de perda de floresta (FAO, 2010).

Entre os anos de 2008 e 2010 foi observada uma redução na produção de toras de madeira tropical em todas as regiões do mundo. A maior redução ocorreu nos países asiáticos e na região do pacífico. Segundo a ITTO (2010), uma das razões para esse declínio contínuo, além do mercado deprimido após a crise econômica mundial de 2009 foi a redução de oferta de madeira não manejada ou ilegal devido aos progressos em direção ao Manejo Florestal Sustentável nos países produtores.

Além disso, o relatório da ITTO mais recente sobre o status das florestas no mundo (ITTO, 2011) revela que o mercado mundial de madeira tropical está mudando devido à substituição da madeira tropical por madeira não-tropical (produzida em florestas plantadas ou não-tropicais) e outros materiais como alumínio, plástico e aço. Por parte dos mercados de exportação também houve aumento da demanda por garantias que as madeiras importadas sejam de origem

legal e de florestas bem manejadas. Tal fato, apesar de reduzir a oferta de madeira, abre espaço no mercado para a certificação florestal.

As exigências quanto à “origem sustentável” da madeira tropical refletem positivamente em alguns países, em especial no continente africano, no sentido de fomentar a prática do manejo florestal sustentável. Mas, enquanto a demanda dos países importadores, como Europa, Japão e América do Norte, está reduzindo, cresce a demanda do mercado interno nos países produtores, que por sua vez são mercados menos exigentes em relação à certificação e à origem legal da madeira. Por outro lado, o aumento desse mercado pode aumentar sua competitividade e a certificação passaria a ser um diferencial (ITTO, 2011).

2.1.2 Recursos Madeireiros da Amazônia

A cobertura florestal do Brasil é a segunda maior do mundo, ficando atrás apenas da Rússia. Em 2010, a área total de florestas no Brasil era de 519 milhões de hectares, o que corresponde a 61% do território nacional. Deste total, cerca de 354 milhões de hectares encontram-se na Amazônia. A maior parte das áreas de floresta do país, cerca de 316,65 milhões de hectares, é considerada como “patrimônio florestal permanente” (termo criado pela ITTO), que são florestas públicas ou privadas cuja manutenção da cobertura vegetal natural está assegurada por lei. Deste total, 45% são florestas de produção – 135 milhões ha de florestas naturais e 6,65 milhões ha de plantadas, e 55% são florestas de proteção (FAO, 2010; ITTO, 2011).

A Amazônia legal possui uma área de 500 milhões de hectares, dos quais 62,7% são florestas, 22,5% formações não florestais (Cerrados e Campos Gerais) e 14,8% áreas já desmatadas. Cerca de 218 milhões de hectares encontram-se sob áreas protegidas Terras Indígenas e Unidades de Conservação. Estima-se que a produção de madeira da Amazônia Legal em 2009 tenha sido de 14,2 milhões de metros cúbicos em toras, dos quais 91% foram produzidos nos estados do Pará e do Mato Grosso. A receita gerada pelo setor foi de US\$ 2,5 bilhões (PEREIRA *et al.*, 2010).

A produção de madeira na Amazônia encontra-se distribuída em diversos pólos madeireiros. Pereira *et al.* (2010) estabeleceram 4 fronteiras madeireiras na Amazônia legal, com base na classificação de zonas madeireiras do estado do Pará feita por Veríssimo *et al.* (2002). A classificação considera o histórico de colonização, a tipologia vegetal e as condições de acesso a esses pólos. As fronteiras madeireiras encontram-se resumidamente descritas no QUADRO 1.

FRONTEIRA MADEIREIRA	IDADE DA FRONTEIRA (ANOS)	TIPOLOGIA VEGETAL*	PRINCIPAIS PÓLOS
Antiga	> 30	Aberta, de transição (sul) e densa (norte)	Sinop e Feliz Natal (Mato Grosso), Paragominas e Tailândia (Pará)
Intermediária	10 - 30	Aberta (sul) e densa (norte)	Cláudia e Marcelândia (Mato Grosso), Cujubim e Machadinho do Oeste (Rondônia), Rio Branco (Acre)
Nova	< 10	Densa	Castelo de Sonho (Pará), Aripuanã e Colniza (Mato Grosso).
Estuarina	> 300	Floresta de Várzea	Belém, Breves e Portel (Pará)

QUADRO 1 – FRONTEIRAS MADEIREIRAS DA AMAZÔNIA LEGAL EM 2009.

FONTE: PEREIRA *et al.*, 2010.

* Classificação adotada pelo IBGE no Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 1992).

As zonas estuárias são exploradas desde as colonizações pioneiras na região, porém em volumes muito pequenos de produção. No entanto, desde a década de 1960, a exploração madeireira se intensificou na região com a instalação de grandes indústrias (PEREIRA *et al.*, 2010).

A partir de dados recentes (PEREIRA *et al.*, 2010) foram identificados 3 pólos madeireiros principais no estado do Amazonas: Humaitá, Itacoatiara e Manaus, com produção 168 mil m³/ano, 143 mil m³/ano e 51 mil m³/ano em toras, respectivamente. Outros pólos menores também foram identificados no estado somando um consumo de 5 mil m³/ano. Em trabalho conjunto do Serviço Florestal Brasileiro e o Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (SFB e IMAZON, 2009) esses pólos foram considerados pertencentes à fronteira madeireira intermediária.

Com base no consumo de toras e produção de madeira serrada dos pólos madeireiros identificados, Pereira *et al.* (2010) estimaram a produção madeireira da Amazônia Legal no ano de 2009 em cerca de 14,2 milhões de metros cúbicos de madeira em tora, com rendimento médio de 41% no processamento. Essa produção emprega direta e indiretamente 203,7 mil pessoas, porém apresentando tendência de decréscimo na última década, associada à redução do número de indústrias.

As principais causas da evidente tendência de queda da produção de madeira tropical na Amazônia são: 1) a substituição do produto por outros materiais, como PVC, ferro ou até mesmo madeiras de florestas plantadas, como MDF e outros tipos de chapas de madeira reconstituída, na produção de móveis e na construção civil; 2) aumento da fiscalização por parte do governo, coibindo a extração ilegal e irracional de madeira que historicamente era responsável pela oferta de madeira nesse mercado; e, especialmente nos últimos anos, 3) a crise econômica mundial de 2009 que desvalorizou o dólar e desaqueceu o mercado de exportações, entretanto favorecendo de alguma forma o mercado interno (SFB e IMAZON, 2009). Assim, observa-se que os mesmos fatores que influenciam negativamente o mercado mundial de madeira tropical, também estão atingindo o Brasil.

2.2 TRAÇAMENTO DE MADEIRA (TROPICAL)

A conversão de uma árvore em toras consiste em 2 etapas: corte e traçamento. O corte é o ato de derrubar uma árvore e o traçamento é o ato de converter essa árvore, após a derrubada, em toras. No Brasil, diversas técnicas de corte de árvores nativas da Amazônia foram desenvolvidas para melhorar o aproveitamento da árvore e garantir uma maior segurança dos trabalhadores florestais. Tais técnicas foram compiladas e publicadas em manuais de manejo florestal difundidos entre as grandes empresas florestais e comunidades da região Amazônica (NOGUEIRA *et al.*, 2011; VIDAL *et al.*, 1997). O traçamento, por sua vez, é sempre citado como uma etapa importante das atividades de exploração florestal. Recomendações técnicas geralmente são feitas para o primeiro tipo de traçamento que é feito numa árvore logo após o corte, que consiste em separar a tora comercial da copa da árvore e da base do tronco, quando existem deformidades que

comprometem o uso comercial da tora (ex.: sapopema). No entanto, para o traçamento posterior que consiste na etapa de seccionamento da tora comercial em toras menores, não existem manuais ou técnicas mais específicas desenvolvidas para seu melhor aproveitamento ou otimização.

O traçamento é uma etapa extremamente importante nas operações florestais, pois é a primeira de uma série de etapas de processamento da madeira que resultará num produto, que pode ser tora para lâmina, madeira serrada, celulose e papel entre outros. O bom aproveitamento em cada uma das etapas depende das decisões tomadas nas etapas anteriores (BRIGGS, 1980). O traçamento das árvores derrubadas nas operações de colheita florestal pode ser considerado como um processo de tomada de decisões de curto prazo (ARCE *et al.*, 2004). O traçador deve determinar a posição dos cortes de traçamento após a derrubada da árvore na floresta ou então no pátio da serraria, fazendo mentalmente diversas combinações dos comprimentos dos produtos de modo a maximizar o aproveitamento da tora comercial. Nessas combinações mentais é que por vezes as toras de maiores dimensões são priorizadas em detrimento do aproveitamento máximo do fuste comercial.

Holmes *et al.* (2002), num estudo comparativo sobre a rentabilidade dos sistemas de exploração convencional (EC) e de exploração de impacto reduzido (EIR) na Amazônia brasileira, verificaram que em ambos os sistemas o maior volume de desperdício ocorre devido ao traçamento inadequado dessas toras. Considerando a produção média de 25,36 m³/ha para ambos os sistemas, o traçamento foi responsável por 1,97 m³/ha do total de 6,05 m³/ha de desperdício de madeira na EC, enquanto que na EIR o traçamento foi responsável por 0,85 m³/ha do total de 1,92 m³/ha de desperdício. Em valores absolutos, o desperdício na exploração convencional é maior, mas, quando analisado em termos relativos, observa-se que na exploração florestal planejada, *i.e.* exploração de impacto reduzido, o desperdício de madeira na etapa de traçamento representa uma proporção ainda maior em todo o processo.

Briggs (1980) apontou como principais razões de perda de volume durante o traçamento as seguintes: a) medição imprecisa do comprimento, resultando em toras menores ou maiores do que as demandadas; b) cortes excessivos ou insuficientes para remover partes defeituosas; c) falta de aproveitamento eficiente das porções úteis da ponta da tora por negligência ou pela combinação de produtos escolhida

pelos traçadores; d) produção de toras com excessiva tortuosidade ou curvatura; e, e) remoção inadequada de bifurcações.

Ainda segundo Briggs (1980) em seu estudo sobre traçamento em floresta de coníferas (*softwoods*), apesar de influenciar diretamente o valor de uma tora (uma vez que, quando os produtos não são cortados dentro das especificações, eles perdem seu valor), o traçamento comumente não é considerado como um gerador direto de lucro. O autor destacou evidências de que muitas vezes os funcionários menos hábeis são indicados para a atividade de traçamento. As empresas florestais muitas vezes desconhecem a importância das operações de traçamento e sua influência nos resultados de aproveitamento e de valoração do produto final na cadeia produtiva de madeira.

2.3 OTIMIZAÇÃO DO TRAÇAMENTO POR MEIO DE ALGORITMOS MATEMÁTICOS

A tomada de decisão ótima no traçamento é uma tarefa muito complexa para o traçador, pois ele precisa considerar diversas variáveis, como as características das toras e as dimensões dos produtos, e ao mesmo tempo fazer diversas combinações de comprimentos para decidir qual é a melhor e mais rápida maneira de fazer o traçamento de modo a não comprometer a produtividade do trabalho. Neste sentido, ferramentas de pesquisa operacional começaram a ser utilizadas para apoiar o processo decisório do traçamento.

A primeira ferramenta empregada foi a Programação Linear (PL), entretanto, sem muito sucesso, pois ela supõe que todas as relações sejam lineares e contínuas, violando algumas características do problema de traçamento, que envolvem funções descontínuas (BRIGGS, 1980). Por causa das suas limitações, a aplicação de PL acabou não sendo utilizada na prática. Posteriormente, Pnevmticos e Mann (1972) propuseram pela primeira vez um modelo de Programação Dinâmica (PD) aplicado ao problema de traçamento de toras de madeira. Entretanto, as premissas para tornar o modelo utilizável também eram bastante restritivas e não contemplavam todas as restrições do problema. Desde então diversos autores (FAALAND & BRIGGS, 1984; SESSIONS *et al.*, 1989;

CARNIERI *et al.*, 1994; GRONDIN, 1998) desenvolveram adaptações aos modelos de programação dinâmica para aprimorar a ferramenta e torná-la mais completa.

Segundo Pnevmticos e Mann (1972), a PD é adequada porque permite trabalhar com funções lineares e não lineares, incorporando elementos determinísticos e probabilísticos. Entretanto sua formulação é muito mais complexa e não existe um método padrão para resolução de problemas, tal como existe, por exemplo, o algoritmo SIMPLEX para resolução de problemas de PL. Cada problema de PD exige uma formulação específica, existindo em comum entre todos os modelos as equações recursivas (PNEVMATICOS e MANN, 1972). Segundo Briggs (1980), a PD não é propriamente um “procedimento matemático detalhado”, mas um tipo de abordagem a um problema a ser resolvido em várias etapas.

Com o avanço da tecnologia computacional foi possível aprimorar consideravelmente os modelos de PD aplicados ao traçamento, como, por exemplo, a incorporação de modelos de afilamento e restrições de demanda de produto. A princípio os modelos foram desenvolvidos basicamente para madeiras de coníferas - *softwoods* – (ARCE, 2000; MARSHALL *et al.*, 2006; NYBAKK *et al.*, 2007). Para os problemas de traçamento de madeiras duras – *hardwoods* – de florestas temperadas, Wang *et al.* (2004) e Wang *et al.*, (2009) utilizaram o algoritmo de Análise em Redes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO

A pesquisa foi conduzida numa empresa florestal de manejo de florestas nativas, localizada no município de Itacoatiara, estado do Amazonas, a 227 km a leste de Manaus (FIGURA 1). Os dados foram coletados em novembro de 2010.



FIGURA 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE ITACOATIARA, ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL.

A vegetação no local é classificada como Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas (IBGE, 2004) e desenvolve-se sob clima Tropical Úmido, segundo classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK *et al.*, 2006), com precipitação anual de 1.900 mm, com menor volume de chuvas entre os meses de agosto a dezembro e temperatura média anual de 26°C (EMPRAPA, 2003). As espécies emergentes características são *Dinizia excelsa* (Angeim pedra) e *Manilkara cavalcantei* (Maçaranduba) e as dominantes no estrato superior do dossel são *Manilkara* spp. (Maçaranduba, Maparajuba etc.), *Protium* spp. (Breu) e *Pouteria* spp. (Abiu) (MENDONÇA, 2003).

A área total da empresa é de 506.736,6 ha, dos quais 29,5% são destinados às atividades de manejo florestal por exploração seletiva de 86 espécies comerciais. Em 2010, cerca de 135.000 m³ de toras foram produzidos na floresta, transportadas até à serraria da própria empresa, onde todas as toras são processadas. A empresa vende madeira serrada, madeira aplainada, pilares de construção, produtos acabados e energia, que é produzida a partir da queima dos resíduos gerados em toda a linha de produção da indústria. O principal mercado da empresa é o de exportação, mas também atende ao mercado interno com as peças que foram desclassificadas para a exportação. Apesar de o faturamento com vendas para o mercado interno ser menor, este muitas vezes representa um volume maior que o de exportação.

3.2 OPERAÇÕES DE TRAÇAMENTO

As operações de traçamento basicamente consistem em converter as toras que chegam da floresta em dimensões apropriadas para o processamento na serraria, dividindo-as em toras menores, denominadas neste estudo como “toretas”. O traçamento foi executado por uma equipe composta por quatro pessoas: um líder ou traçador, que mede as toras e determina os pontos de traçamento; um ajudante, que anota os números de identificação das toras, os comprimentos dos toretas resultantes do traçamento e cria uma nova identificação para cada um deles, vinculada à da tora original para fins de rastreamento da cadeia de custódia da

madeira; e dois motosserristas para efetuar o traçamento nos pontos indicados pelo líder.

A serraria trabalha segundo um cronograma organizado para atender aos pedidos dos compradores. As operações de traçamento se organizam de acordo com a demanda diária da serraria por toras ou toretes. A equipe de traçamento recebe no início de cada período uma lista com a quantidade de toras ou toretes de cada espécie que devem ser processados no dia. Além disso, a equipe de traçamento possui uma lista com os tipos de produtos para cada espécie: todos os comprimentos possíveis para os toretes produzidos. Os comprimentos dos produtos são calculados considerando o comprimento do produto final mais uma folga de geralmente 20 cm, permitindo uma flexibilidade para ajustes das dimensões durante o processamento.

Assim que chegam da floresta, as toras são armazenadas em pilhas a céu aberto, separadas em lotes por espécie (FIGURA 2.1). Quando toras de determinada espécie são demandadas pela serraria, tratores equipados com garras as buscam nos seus respectivos lotes e as dispõem alinhadas paralelamente e afastadas umas das outras no pátio, de forma a permitir que a equipe de traçamento trabalhasse entre elas (FIGURA 2.2). Assim que todo o lote está preparado, o líder da equipe de traçamento começa a medir os comprimentos de todas as toras usando uma trena, que possui acoplada em sua ponta um peso metálico. A função deste peso é fixar a fita em uma das pontas da tora, permitindo que o traçador consiga esticá-la e então fazer as medições sozinho (FIGURA 2.3).

Após medir o comprimento da tora, o líder mede as toras e decide os pontos de traçamento. A decisão do traçamento fica totalmente centralizada no líder e é feita sem auxílio de qualquer ferramenta de cálculo. Ele executa os cálculos e as combinações mentalmente, contando apenas com habilidade adquirida pela sua experiência prática. Além do comprimento da tora original e dos comprimentos dos produtos para cada espécie, o líder (ou o “traçador”) considera os defeitos como tortuosidades e rachaduras para o melhor aproveitamento das toras.

Terminadas as medições e as marcações das toras, dois motosserristas iniciam os cortes de traçamento. Logo em seguida, os toretes produzidos são carregados pelos tratores até a serraria e então se reinicia no pátio a mesma operação para um novo lote. Após o traçamento de cada lote, praticamente não se vê resíduo, somente nos casos em que alguma parte da tora esteja muito

comprometida e só tenha utilidade como lenha para a caldeira (tortuosidade extrema, broca ou podridão). A operação aparentemente consegue aproveitar quase 100% revelando que o líder da equipe é bastante eficiente na combinação de comprimentos de toretes para cada tora.



FIGURA 2 – SEQUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DAS TORAS PARA O TRAÇAMENTO

FONTE: Arquivo pessoal de Marilu Ramos (2010).

NOTA: 1) toras separadas por espécies em lotes distintos; 2) toras distribuídas paralelamente antes do início do traçamento; 3) marcação dos pontos de traçamento sobre a tora.

Como pode ser observado pela descrição das operações de traçamento, não existe sortimento de produtos. Toda a madeira é convertida em produtos serrados e todo o resíduo do processo é destinado à caldeira para geração de energia, que também é vendida pela empresa. Não existindo sortimentos, não existe diferenciação do valor dos toretes e, portanto, o diâmetro da tora não influencia na decisão do traçamento. Todas as toras que vêm da floresta obedecem ao critério de diâmetro mínimo (DAP) da árvore de 50 cm, estabelecido em legislação, e

separadas da copa, não existindo ponta fina. Associa-se a isso o fato de que as árvores derrubadas passam por longo período de crescimento, tornando a taxa de afilamento baixa. Sendo assim, o diâmetro da ponta mais fina de uma tora não é relevante no traçamento e no processamento da madeira.

3.3 COLETA DE DADOS

Não houve seleção prévia dos lotes de espécies a serem avaliadas. A coleta de dados teve de seguir o ritmo das operações normais da empresa; portanto, foram medidos os lotes de toras disponíveis no período de coleta. Ao todo foram medidos lotes de 6 espécies, cada lote com diferentes números de toras (TABELA 1). Como as espécies estão separadas em lotes distintos, neste trabalho os termos *lote* e *espécie* são usados como sinônimos. As espécies com maior número de toras medidas foram Maçaranduba, Louro Gamela e Louro Preto e estão entre as principais espécies comercializadas pela empresa.

TABELA 1 – LOTES DE TORAS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DO TRAÇAMENTO

Lote	Espécie			Nº de toras
	Nome comum	Nome Científico	Família	
FAAM	Fava Amargosa	<i>Vatairea</i> sp.	Fabaceae	11
JACA	Jacareúba	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	Calophyllaceae	13
LOGA	Louro Gamela	<i>Sextonia rubra</i> (Mez) van der Werff	Lauraceae	31
LOIT	Louro Itaúba	<i>Mezilaurus</i> sp.	Lauraceae	15
LOPR	Louro Preto	<i>Ocotea</i> sp.	Lauraceae	31
MASS	Maçaranduba	<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Standl.	Sapotaceae	40

NOTA: Os nomes dos lotes correspondem às siglas usadas pela empresa para identificar as espécies por nome comum. Os nomes científicos das espécies foram consultados em <www.tropicos.org> - Tropicos®, Missouri Botanical Garden.

As toras comerciais não são traçadas na floresta. Apesar disso, muitas vezes elas não chegam inteiras na indústria por terem sofrido algum traçamento

prévio, devido às dificuldades surgidas nas operações de arraste e transporte devido às grandes dimensões de algumas delas. Por esta razão, as toras utilizadas na coleta de dados foram classificadas como inteiras ou não-inteiras para fins de cubagem.

Antes do traçamento, foram medidos o comprimento total (L) de cada tora com uma trena de precisão de 0,01 m e os diâmetros das pontas, d_1 e d_2 , através de duas medidas perpendiculares em cada ponta com uma suta de precisão de 0,5 cm. A partir dos diâmetros de ponta, foi calculado o diâmetro médio (\bar{d}) para cada tora.

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

O afilamento médio de cada tora foi calculado pela relação entre a diferença dos diâmetros de ponta e o comprimento da tora (adaptado de FERREIRA e SILVA, 2002).

$$T = \frac{|d_1 - d_2|}{L} \quad (2)$$

Em que:

T = afilamento médio (cm/m)

$|d_1 - d_2|$ = módulo da diferença entre os diâmetros de ponta (cm).

L = comprimento total da tora (m);

As toras inteiras foram cubadas rigorosamente tomando-se medidas de diâmetro em comprimentos relativos, de 0 a 100% do comprimento total, em intervalos de 10%, resultando em 11 diâmetros medidos por tora. O volume foi calculado pela fórmula de Smalian, tanto para as toras inteiras quanto para as não-inteiras.

$$V_{INTEIRA} = L \frac{\pi}{40000} \left[\frac{(d_{0\%}^2 + d_{100\%}^2)}{2} + d_{10\%}^2 + d_{20\%}^2 + d_{30\%}^2 + d_{40\%}^2 + d_{50\%}^2 + d_{60\%}^2 + d_{70\%}^2 + d_{80\%}^2 + d_{90\%}^2 \right] \quad (3)$$

$$V_{N\tilde{A}O\ INTEIRA} = L \frac{\pi}{40000} \left[\frac{d_1^2 + d_2^2}{2} \right] \quad (4)$$

Em que:

$V_{INTEIRA}$ = volume de tora inteira (m³);

$V_{N\tilde{A}O\ INTEIRA}$ = volume de tora não inteira (m³);

L = comprimento da tora (m);

$d_{0\%}, d_{10\%}, \dots, d_{100\%}$ = diâmetro nos comprimentos relativos de 0 a 100% do comprimento total (cm);

d_1, d_2 = diâmetros de ponta (cm).

Após o traçamento, foi contado o número de toretes produzidos a partir de cada tora. As medições do comprimento e dos diâmetros de ponta de cada torete foram feitas de forma igual às medições da tora.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados teve como objetivo avaliar o rendimento das operações de traçamento em dois cenários distintos: 1) traçamento real, com os rendimentos medidos durante a coleta de dados, e 2) traçamento otimizado, com os rendimentos simulados para as mesmas toras através de algoritmos matemáticos implementados em um *software*. O rendimento das operações de traçamento foi medido em termos de comprimento ao invés de volume ou valor financeiro, pois a otimização do traçamento empregada neste trabalho considera apenas a variável comprimento. Isso se justifica pela não influência do diâmetro na decisão de traçamento na serraria, além de todos os produtos do traçamento terem o mesmo preço por unidade de volume, como esclarecido em tópico anterior (3.2, p.22). Vale ressaltar que os produtos finais da serraria, ou seja, as peças serradas, podemos sim ter preços diferenciados, mas isso não foi avaliado na presente pesquisa.

3.4.1 Conformidade das dimensões dos produtos

Para melhor caracterizar o rendimento das operações de traçamento, além da medição dos toretes, foi incorporada a análise de conformidade dos mesmos feita antes mesmo do cálculo do rendimento. Esta análise consistiu em verificar se os toretes produzidos estavam dentro dos padrões dimensionais estabelecidos pela empresa para os produtos de cada espécie. Para tanto, foi considerada uma tolerância de 5 cm da seguinte forma: mesmo que um torete não apresentasse o comprimento exato de um dos produtos, seria considerado em conformidade caso a discrepância fosse de até 5 cm para mais ou para menos. Os tipos de produtos para cada lote de espécie medido estão descritos na TABELA 2.

TABELA 2 – TIPOS DE PRODUTOS DO TRAÇAMENTO PARA CADA LOTE DE ESPÉCIES NA EMPRESA EM ESTUDO

LOTE	PRODUTOS l_k (m)															
		l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	l_{10}	l_{11}	l_{12}	l_{13}	l_{14}	l_{15}	l_{16}
FAAM	PT	5,70	5,40	5,10	4,80	4,50	4,20	3,90	3,60	3,30	3,00	2,70	4,50*			
	PS	5,45	5,15	4,85	4,55	4,25	3,95	3,65	3,35	3,05	2,75	2,45	2,15			
JACA	PT	4,20	3,80	3,50	3,20											
	PS	4,00	3,60	3,40	3,00											
LOGA	PT	5,65	5,35	5,05	4,75	4,45	4,15	3,85	3,55	3,25	2,95	2,65	4,50*	4,40*	4,10*	3,90*
	PS	5,45	5,15	4,85	4,55	4,25	3,95	3,65	3,35	3,05	2,75	2,45	2,15	2,10	1,95	1,85
LOPR	PT	4,70	4,20	3,70	3,20	2,70	2,35	2,20	3,80*	3,20*						
	PS	4,50	4,00	3,50	3,00	2,50	2,15	2,00	1,80	1,50						
LOIT	PT	5,40	4,70	4,50	4,00	3,85	3,70	3,50	3,30	3,05	2,70	2,60	4,50*	4,20*		
	PS	5,20	4,50	4,30	3,80	3,65	3,50	3,30	3,10	2,85	2,50	2,40	2,15	2,00		
MASS	PT	5,65	5,35	5,05	4,75	4,45	4,15	3,85	3,55	3,25	2,95	2,70	4,50*			
	PS	5,45	5,15	4,85	4,55	4,25	3,95	3,65	3,35	3,05	2,75	2,45	2,15			

NOTA: Para cada espécie, a primeira linha contém os comprimentos dos produtos do traçamento (PT) e a segunda linha, os respectivos comprimentos do produto na serraria (PS), a partir dos quais são calculados os PT, acrescentando uma folga de 20 cm, com exceção do lote FAAM e de um produto do lote MASS (2,70), em que a folga foi de 25 cm. Quando um PS tem comprimento menor que 2,20 m, para determinar o PT, considerou-se o dobro do comprimento do PS mais a folga de 20 cm. Estes últimos foram chamados de múltiplos, assinalados com um asterisco (*).

3.4.2 Aproveitamento Real

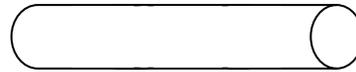
A primeira abordagem de quantificação do rendimento consistiu em simplesmente somar para cada tora original os comprimentos dos seus respectivos toretes produzidos no traçamento. O valor da soma consiste no aproveitamento absoluto da tora (Ap), em metros, enquanto que este mesmo valor dividido pelo comprimento original da tora é o aproveitamento proporcional da tora ($Ap\%$), dado em porcentagem.

Após as operações de traçamento praticamente não há “resíduo visível”; somente em casos que a madeira esteja inutilizável para a serraria. O líder da equipe distribui os comprimentos dos toretes de forma a não deixar resíduo nesta etapa; entretanto, não há garantias de que essas combinações de comprimentos estejam em conformidade com os tipos de produto e, portanto, faz-se necessária uma segunda abordagem do traçamento real.

Considerou-se que os toretes em não conformidade com os padrões de corte tinham “resíduo incorporado”. A tolerância de 20 a 25 cm no padrão de corte em relação ao comprimento do produto final é importante para permitir aparos e acabamentos nas peças até o final da linha de produção, o que significa que essa folga converte-se em resíduo ao longo do processo. Portanto, toras em não conformidade com as dimensões dos produtos de cada espécie apresentam uma diferença ainda maior em relação ao comprimento do produto final e, em consequência, aumentam a quantidade de resíduo gerado. Desta maneira empregou-se o termo “resíduo incorporado” como sendo o comprimento do torete que sobra com relação ao maior produto possível. Por fim, o denominado “resíduo real” é a soma do resíduo visível e do resíduo incorporado. Um exemplo didático do cálculo de resíduo real está descrito no QUADRO 2.

CÁLCULO DO APROVEITAMENTO REAL, CONSIDERANDO RESÍDUO VISÍVEL E RESÍDUO INCORPORADO.

Seja uma tora no pátio com 10 m de comprimento, de determinada espécie, e três tipos de produtos (l_k) com 2,50 m, 3,50 m e 4,50 m, respectivamente.



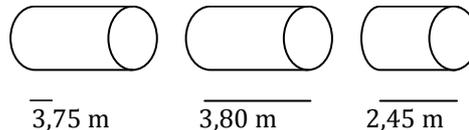
$$L = 10\text{m}$$

$$l_1 = 2,50\text{ m}$$

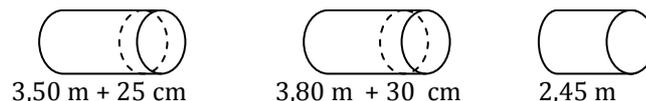
$$l_2 = 3,50\text{ m}$$

$$l_3 = 4,50\text{ m}$$

Após o traçamento, a tora é convertida em três toretes sem apresentar nenhum resíduo visível (Resíduo Visível = 0). Entretanto, ao verificar suas medidas, constata-se que os toretes não atendem aos comprimentos dos produtos l_k . O primeiro mede 3,75m, o segundo 3,80 m e o terceiro 2,45 m.



Neste exemplo, o primeiro e o segundo toretes extrapolam a tolerância de 5 cm em relação aos l_k ; logo, são toretes em não conformidade. Seu aproveitamento é calculado considerando que a partir deles pode ser retirado um produto, o maior possível, que é de 3,50 m para ambos (indicado por um círculo tracejado na figura abaixo). O aproveitamento real destes toretes é, portanto, de 3,50 m cada, com um Resíduo Incorporado de 25 cm no primeiro e de 30 cm no segundo. O terceiro torete atende ao critério de conformidade, pois sua diferença em relação à dimensão do produto é igual a 5 cm. Este torete não gera nenhum resíduo incorporado e seu aproveitamento é igual ao seu próprio comprimento.



Por fim, o resíduo visível da tora é igual a zero, mas o resíduo gerado pela não conformidade, denominado de resíduo incorporado, é de 55 cm. O aproveitamento da tora de 10 m é de 9,45 m (3,50 + 3,50 + 2,45) em valor absoluto e de 94,5% em valor relativo.

QUADRO 2 – EXEMPLO DO CÁLCULO DO APROVEITAMENTO REAL.

Para análise do cenário real em comparação com o cenário otimizado, considerou-se como aproveitamento real, para cada tora, a soma do resíduo visível e do resíduo incorporado, subtraídos do comprimento total da tora original, em valor absoluto (m) e relativo (%).

$$Ap = L - \text{Residuo real} \quad (5)$$

ou

$$Ap = \sum_{j=0}^n l_j \quad (6)$$

$$Ap\% = \frac{Ap}{L} \quad (7)$$

Em que:

Ap = aproveitamento absoluto da tora (m);

$Ap\%$ = aproveitamento relativo da tora (%);

L = comprimento original da tora (m);

j = posição do torete (1º, 2º, 3º, etc.);

l_j = comprimento do j -ésimo torete (m);

n = número total de toretes produzido por tora.

3.4.3 Simulação pelo Trozador®

A simulação do traçamento otimizado foi feita por meio do software Trozador® desenvolvido por Arce (2001) para resolver problemas de otimização do traçamento de toras considerando apenas o comprimento da tora ou problema de corte unidimensional. Como o diâmetro de ponta fina não influencia na tomada de decisão do traçamento neste caso, como descrito em tópico anterior, o programa apresentou-se potencialmente adequado para a aplicação neste estudo.

O programa utiliza basicamente dois algoritmos. O primeiro é o *algoritmo gerador de número úteis* que, considerando o comprimento de cada tora e seus respectivos tipos de produtos, gera todas as possíveis combinações de pontos sobre a tora onde será possível executar os cortes. Desta forma, há uma redução do espaço de busca da solução ótima a ser explorado pelo segundo algoritmo se comparado, por exemplo, com os métodos exaustivos de busca a cada centímetro

da tora. O segundo algoritmo, por sua vez, é um *algoritmo de programação dinâmica* para geração do padrão de traçamento ótimo para cada tora, cujo objetivo é obter o máximo aproveitamento da tora ou a geração de resíduo mínimo.

Os algoritmos encontram-se aqui descritos como no trabalho de Arce e Friedl (2001), com algumas adaptações.

Algoritmo 1 – Gerador de números úteis

Inicialmente, obtém-se o menor dos comprimentos a partir da lista de produtos a serem obtidos de cada espécie; é definido também o primeiro número útil como sendo o início do comprimento (Passo 1). Logo, a partir de cada número útil já encontrado devem ser calculados os pontos de corte ao longo da tora para cada novo produto k extraído do mesmo j toretes ($j = 1, 2, \dots$), desde que a porção remanescente da tora seja suficientemente comprida para retirar da mesma pelo menos um torete do produto de menor comprimento l (Passo 2). Os números úteis encontrados desta forma – $F(k)$ – são agregados à lista já existente – $U(k + 1)$ – removendo qualquer número repetido ou equivalente (Passo 3). Finalmente, o procedimento é repetido até contemplar o último produto ($k=1$), concluindo a geração dos números úteis (Passo 4), os quais são armazenados no vetor $U(1)$. O pseudocódigo do algoritmo encontra-se no Quadro 2.

Durante a geração dos números úteis não é estabelecida a ordem em que as diferentes toras podem ser obtidas do fuste; este ordenamento é avaliado posteriormente na geração dos padrões de corte gerados pelo segundo algoritmo. Portanto, os diâmetros mínimos de ponta fina não são considerados nesta geração de números úteis, sendo possível e até provável que alguns destes números sejam inviáveis em função dos diâmetros.

Passo 1. Calcule $\beta = \min \{l_i, i = 1, 2, \dots, m\}$. Defina $U^{(m+1)} = F^{(m+1)} = \{0\}$, faça $k = m$.

Passo 2. Calcule $F^{(k)} = \{u + j * l_k; u \in U^{(k+1)}, j = 1, 2, \dots, y L - (u + j * l_k) \geq \beta\}$

Passo 3. Faça $U^{(k)} = F^{(k)} \cup U^{(k+1)}$. Elimine todos os números equivalentes de $U^{(k)}$.

Passo 4. Se $k > 1$, faça $k \leftarrow k - 1$ e vá para o *Passo 2*. Caso contrário, pare.

$U^{(1)}$ contém a lista de números úteis.

onde: L = comprimento da tora;

m = número de produtos considerados;

l_1, l_2, \dots, l_m = comprimentos individuais de cada um dos produtos;

β = menor dos comprimentos dos m produtos considerados;

$F; U$ = vetores que contêm os números úteis gerados em cada

etapa.

QUADRO 3 – PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO GERADOR DE NÚMEROS ÚTEIS
 FONTE: Arce e Friedl (2001)

Algoritmo 2 – Programação Dinâmica

A Programação Dinâmica (PD) se caracteriza pela avaliação sucessiva da evolução da otimização em etapas, por meio de uma equação recursiva. Em cada uma das etapas são comparadas várias alternativas ou estados, e é guardado o valor – *label* – somente do melhor dos estados. Dessa maneira, os diferentes produtos que são considerados na otimização de uma determinada tora representam as etapas ou estágios dos problemas de PD, e os números úteis gerados pelo algoritmo constituem os estados. A seguinte equação recursiva tem por função maximizar o valor do fuste.

$$\max F_s(x) = \max \{P_s + F_s(x - l_s), F_{s-1}(x)\} \quad s = 2, 3, \dots, m \quad (8)$$

Em que:

x = ponto da tora no qual é realizada a avaliação (m);

l_s = comprimento do produto s (m);

P_s = valor do torete do produto s que está sendo avaliado (R\$);

$F_s(x - l_s)$ = valor da melhor combinação dos produtos obtida até o comprimento $(x - l_s)$, utilizando somente os primeiros s produtos (R\$);

$F_s(x)$ = valor da melhor combinação de produtos obtida até o comprimento x utilizando somente os s primeiros produtos (R\$).

Além do valor acumulado em cada um dos números úteis, são armazenados outros *labels* com a finalidade de controlar o comprimento útil remanescente e o diâmetro de fuste correspondente ao comprimento indicado pelo estado. Desta madeira, em função dos valores dos *labels*, vão sendo eliminadas as opções de corte não factíveis na evolução da equação recursiva.

Entradas e Saídas (Inputs e Outputs)

As variáveis de entrada no programa Trozador® são os comprimentos de todos os tipos de produtos possíveis para cada espécie (l_k) – “*longitud de las trozas*” - e o comprimento da tora (L) – “*longitud útil de los fustes*”. As variáveis de saída são o número de toras para cada l_k – “*nº de trozas*” e o resíduo – “*resíduo*”. As FIGURAS 3 e 4 ilustram a *interface* do programa para a entrada e saída dos dados.

A partir do resíduo foi calculado o aproveitamento otimizado das toras, da mesma forma como foi calculado o aproveitamento real: subtraindo do comprimento total da tora o resíduo do traçamento simulado.

Para adaptar o programa ao problema em estudo, o software Trozador® foi customizado no que diz respeito à entrada e à saída de dados, permitindo inserir os comprimentos, em metros, de todos os produtos possíveis para cada espécie, como pode ser observado na FIGURA 3. A otimização foi rodada tora por tora. Inicialmente foram inseridos e armazenados os tipos de produtos, e então o comprimento total de uma tora. Em seguida foi feita a simulação tendo como saída de dados as quantidades de cada tipo de produto e o resíduo. Os resultados foram digitados em planilha Excel® e o comprimento de uma nova tora foi inserido no lugar da anterior e

novamente rodado o programa. Isso foi feito para todas as toras de uma mesma espécie. Ao iniciar a simulação para um novo lote de espécie foram cadastrados os novos tipos de produtos correspondentes no lugar dos anteriores. Todo o processo foi repetido até concluir com todos os lotes de toras.

Nº de trozas	5,65 m	5,35 m	5,05 m	4,75 m	4,45 m	4,15 m	3,85 m	3,55 m	3,25 m	2,95 m	2,65 m	4,50 m	3,90 m	4,10 m	4,40 m	Residuo
L = 13,70 m	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0,00

FIGURA 3 – TELA DE ENTRADA DE DADOS DO TROZADOR[®] ADAPTADA PARA A PESQUISA

3.4.4 Comparação dos cenários

As variáveis analisadas em ambos os cenários foram: a) aproveitamento, absoluto (Ap) e relativo ($Ap\%$); e b) quantidade de toretes produzidos para cada tipo de produto em cada lote de espécie.

O volume (m^3) da diferença entre aproveitamento absoluto real e otimizado, foi estimado a partir do diâmetro médio (\bar{d}) de cada lote. Em seguida estimou-se o valor em euros deste volume, utilizando o preço médio (P) por espécie/lote, fornecido pela empresa.

$$E = \frac{\pi \bar{d}^2}{40000} (Ap_{otimizado} - Ap_{real}) * P \quad (9)$$

Em que:

E = valor em euros correspondente ao volume de toras que a empresa deixa de desperdiçar no traçamento otimizado em relação ao traçamento real (€);

$Ap_{otimizado}$ = aproveitamento absoluto no traçamento otimizado (m);

Ap_{real} = aproveitamento absoluto no traçamento real (m);

P = preço médio por m³, em euros, dado por espécie (€/m³).

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS TORAS

Os lotes variaram quanto ao número de toras, diâmetro médio, comprimento total e volume total das toras. Os maiores números de toras foram encontrados nos lotes de Maçaranduba (MASS), Louro gamela (LOGA) e Louro preto (LOPR), com 40, 31 e 31 toras respectivamente. Estas espécies estão entre as principais em termos de volume de produção e de valor de vendas da empresa. Em função do maior número de toras, o comprimento total e volume total foram maiores nestes mesmos lotes (TABELA 3).

TABELA 3 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS COMPRIMENTO E VOLUME DAS TORAS ANTES DO TRAÇAMENTO

Espécie	N	Comprimento (m)						Volume (m ³)					
		Mín	Média	Máx	DP	CV	Total	Mín	Média	Máx	DP	CV	Total
FAAM	11	7,68	11,38	16,43	3,29	29%	125,16	1,83	3,54	6,00	1,31	37%	38,97
JACA	13	8,80	13,59	18,32	3,19	24%	176,63	1,62	3,89	6,84	1,36	35%	50,61
LOGA	31	7,10	12,89	21,00	3,79	29%	399,69	1,46	4,54	10,82	2,43	53%	140,64
LOIT	15	10,69	16,21	19,87	3,16	19%	243,08	2,13	3,44	5,04	0,75	22%	51,59
LOPR	31	9,10	15,50	19,75	2,98	19%	480,37	1,73	3,28	5,36	0,90	27%	101,71
MASS	40	6,23	13,60	21,36	4,12	30%	543,82	0,92	3,11	6,45	1,28	41%	124,47
TODAS	141	6,23	13,96	21,36	3,78	27%	1968,75	0,92	3,60	10,82	1,59	44%	484,97

NOTA: N = número de toras; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

A média de comprimento para o conjunto de todas as toras foi de 13,96 m com desvio padrão de 3,78 m. O coeficiente de variação foi de 27% para uma amplitude de 6,23 a 21,36 m. A média de volume para o conjunto total de toras foi de 3,60 m³ com desvio padrão de 1,59 m³. O coeficiente de variação foi de 44% para

um amplitude de 0,92 a 12,82 m³. A alta variabilidade dos dados reflete a heterogeneidade da madeira proveniente de floresta primária em primeiro ciclo de exploração. O lote de Louro itaúba (LOIT) apresentou a maior média de comprimento, com 16,21 m, enquanto o lote de Louro gamela (LOGA) apresentou a maior média de volume, com 4,54 m³.

O diâmetro médio para o conjunto de todas as toras foi de 66,2 cm com desvio padrão de 1,3 cm (TABELA 4). O coeficiente de variação foi de 23% para uma amplitude de 31,6 a 103,5 cm. O afilamento médio foi de 1,0 cm/m. O lote de Louro gamela (LOGA) apresentou o maior diâmetro médio de 66,2 cm e o maior afilamento médio de 1,3 cm/m. Os menores valores de diâmetro médio e afilamento foram encontrados no lote de Louro Preto (LOPR), com 51,6 cm e 0,8 cm/m, respectivamente.

TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DO DIÂMETRO MÉDIO E AFILAMENTO MÉDIO DAS TORAS ANTES DO TRAÇAMENTO

Espécie	N	Diâmetro médio (cm)					T (cm/m)
		Mín	Média	Máx	DP	CV	
FAAM	11	46,8	62,7	93,1	17,8	28%	1,1
JACA	13	45,5	60,4	73,0	9,0	15%	1,0
LOGA	31	35,5	66,2	103,5	17,4	26%	1,3
LOIT	15	42,0	54,9	66,9	7,0	13%	1,1
LOPR	31	39,1	51,6	65,0	6,7	13%	0,8
MASS	40	31,6	54,6	74,3	10,2	19%	0,9
TODAS	141	31,6	57,7	103,5	13,0	23%	1,0

NOTA: N = número de toras; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; T = afilamento médio (média de cada lote).

A heterogeneidade de comprimento e volume entre os lotes foi observada nos gráficos tipo *boxplot* gerados pelo *software* SPSS[®] versão 11.0 (FIGURAS 4 e 5). A distribuição para ambas as variáveis apresentou assimetria em todos os lotes. Observou-se uma maior concentração de toras de menor comprimento em alguns lotes como, por exemplo, Fava amargosa (FAAM). Outros lotes, como LOIT e LOPR, apresentaram, ao contrário, maior concentração de toras nos maiores comprimentos.

Para o comprimento não houve valores discrepantes, apenas para volume nos lotes LOGA e MASS.

A distribuição das toras em classes de comprimento caracterizou-se como uma distribuição unimodal (FIGURA 6). As duas primeiras classes compreenderam pouco mais da metade das toras (52%), sugerindo que boa parte das toras não chegou inteira no pátio da indústria. Ao observar a porcentagem de toras inteiras e não-inteiras em cada lote (TABELA 5), constatou-se que em geral a proporção de toras não-inteiras é maior que a de inteiras, com exceção dos lotes LOPR e LOIT.

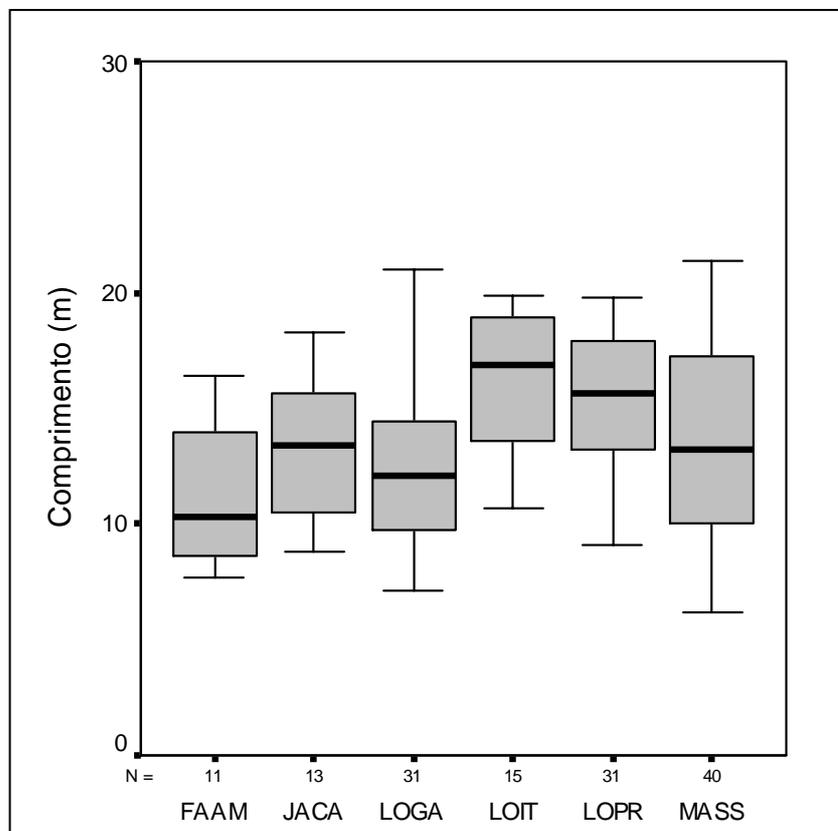


FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO DA VARIÁVEL COMPRIMENTO PARA CADA LOTE DE ESPÉCIE EM GRÁFICO TIPO BOXPLOT

NOTA: A linha espessa dentro das caixas indica a posição da mediana ou 2º quartil. As caixas preenchidas em cinza compreendem 50% dos dados, iniciando-se no 1º quartil e estendendo-se até o 3º quartil. As linhas que se estendem a partir da caixa conectam os valores máximo e mínimo. Foram considerados como *outliers* valores maiores de 1,5 vezes o tamanho na caixa, contados a partir do 1º ou do 3º quartil e estão representados, quando ocorrem, como pequenos círculos. O número de toras (N) está indicado no eixo horizontal.

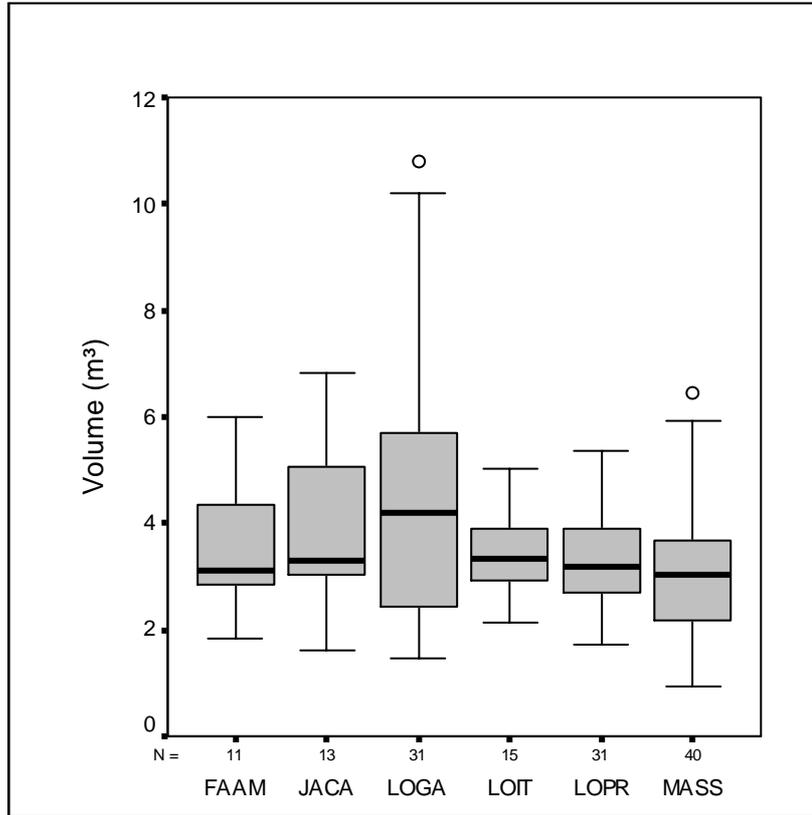


FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO DA VARIÁVEL VOLUME PARA CADA LOTE DE ESPÉCIE EM GRÁFICO TIPO BOXPLOT

NOTA: A linha espessa dentro das caixas indica a posição da mediana ou 2º quartil. As caixas preenchidas em cinza compreendem 50% dos dados, iniciando-se no 1º quartil e estendendo-se até o 3º quartil. As linhas que se estendem a partir da caixa conectam os valores máximo e mínimos. Foram considerados como *outliers* valores maiores de 1,5 vezes o tamanho na caixa, contados a partir do 1º ou do 3º quartil e estão representados, quando ocorrem, como pequenos círculos. O número de toras (N) está indicado no eixo horizontal.

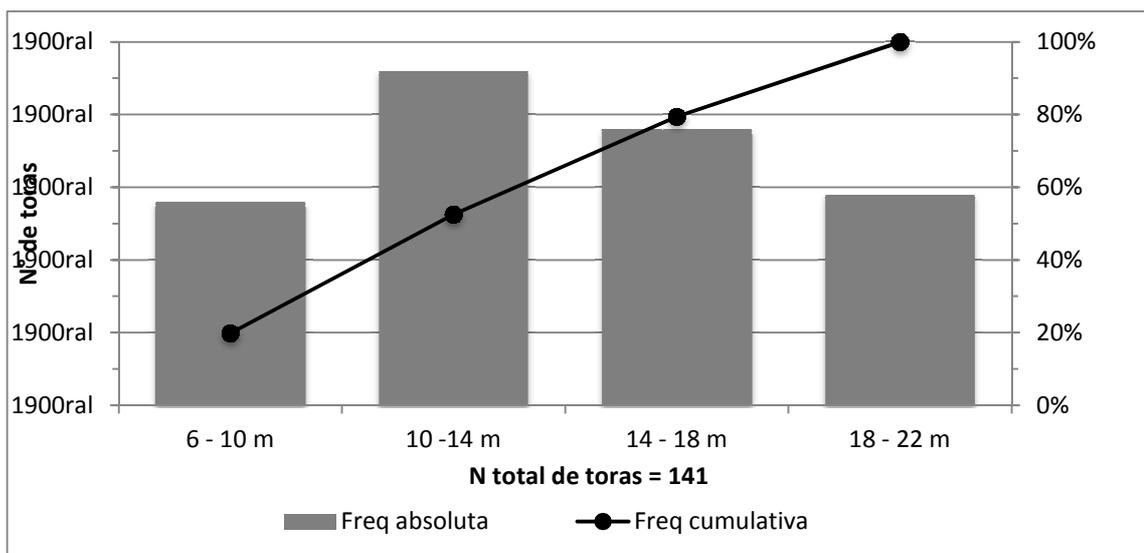


FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA ABSOLUTA E CUMULATIVA (%) DO COMPRIMENTO TOTAL (M) DAS TORAS ANTES DO TRAÇAMENTO

TABELA 5 – PROPORÇÃO ENTRE TORAS INTEIRAS E NÃO INTEIRAS NOS LOTES ANTES DO TRAÇAMENTO

Lote/Espécie	Inteira	Não-inteira	Total
FAAM	27%	73%	11
JACA	31%	69%	13
LOGA	23%	77%	31
LOIT	67%	33%	15
LOPR	65%	35%	31
MASS	30%	70%	40
TOTAL	40%	60%	141

Quando observadas separadamente por lote, as distribuições apresentaram padrões distintos (FIGURA 7). O lote de Fava amargosa (FAAM) apresentou distribuição decrescente e não ocorreram toras na última classe. O lote de Louro preto (LOPR) apresentou uma distribuição crescente sem ocorrência de toras na primeira classe. No lote de Louro itaúba (LOIT) ocorreu apenas uma tora na primeira classe. Com exceção dos lotes FAAM e LOPR, as distribuições apresentaram a moda na segunda ou na terceira classe, com 12 e 16 m de centro de classe, respectivamente. O lote de Maçaranduba apresentou uma distribuição bimodal, com a primeira moda na segunda classe e a segunda na última classe, com 12 e 16 m de centro de classe, respectivamente.

4.2 ANÁLISE DE CONFORMIDADE DOS PRODUTOS

Ao verificar o comprimento dos toretes produzidos, observou-se que a maior parte deles estava fora do padrão dimensional dos produtos estabelecidos pela empresa. Os lotes de Jacareúba (JACA) e de Maçaranduba (MASS) apresentaram uma proporção de conformidade de 55,6% e 50,0% dos toretes, respectivamente. Os demais apresentaram uma proporção inferior a 50% (TABELA 6).

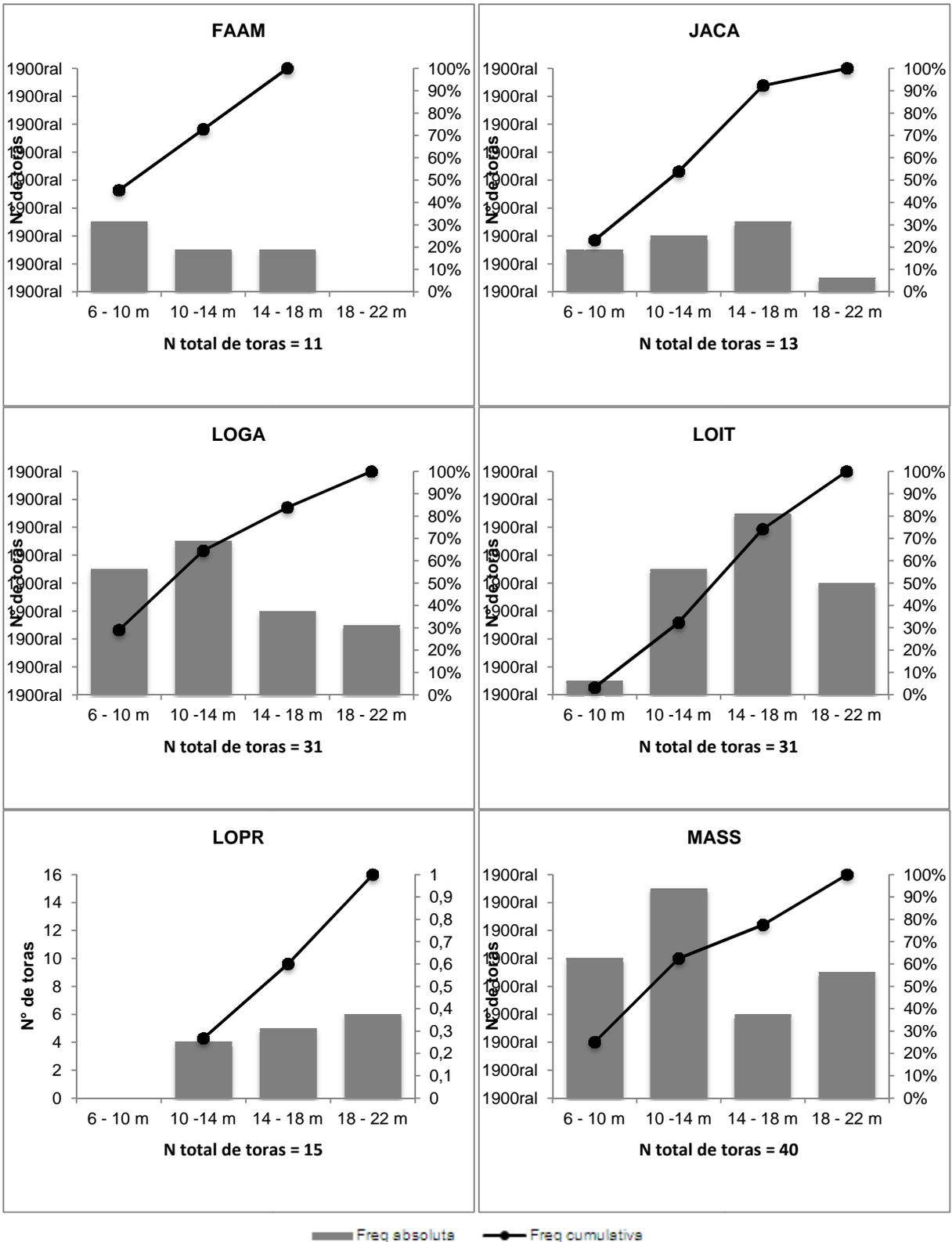


FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA ABSOLUTA E CUMULATIVA (%) DO COMPRIMENTO TOTAL (M) DAS TORAS EM CADA LOTE, ANTES DO TRAÇAMENTO

NOTA: FAAM = Fava amargosa; JACA = Jacareúba; LOGA = Louro gamela; LOPR = Louro preto; LOIT = Louro itaúba; MASS = Maçaranduba.

TABELA 6 – PROPORÇÃO DE TORETES EM CONFORMIDADE COM AS DIMENSÕES DOS PRODUTOS ESTABELECIDOS

Lote	N	n	Toretos em conformidade
FAAM	11	23	39,1%
JACA	13	45	55,6%
LOGA	31	87	41,4%
LOIT	15	55	43,6%
LOPR	31	118	6,8%
MASS	40	114	50,0%

NOTA: N = número total de toras em cada lote; n = número total de toretes produzidos em cada lote.

O resíduo incorporado, resultante da não conformidade dos toretes, foi responsável pela maior proporção do resíduo em todos os lotes (FIGURA 8). A maior proporção do resíduo incorporado ocorreu no lote de Fava amargosa (FAAM), no qual o resíduo visível foi igual a zero e o resíduo incorporado igual a 25,4 m (cerca de 20% do comprimento total das toras), representando o maior resíduo absoluto de todos os lotes. Nos lotes LOIT e FAAM o resíduo visível também foi igual a zero e nos lotes JACA e LOGA foi menor que 1 m. O lote de Louro preto (LOPR) apresentou o segundo maior resíduo total, de 23,7 m. O lote de Maçaranduba apresentou a menor proporção de resíduo total, ou seja, a soma dos resíduos visível (0,5 %) e incorporado (1,8%), equivalente a 2,3%.

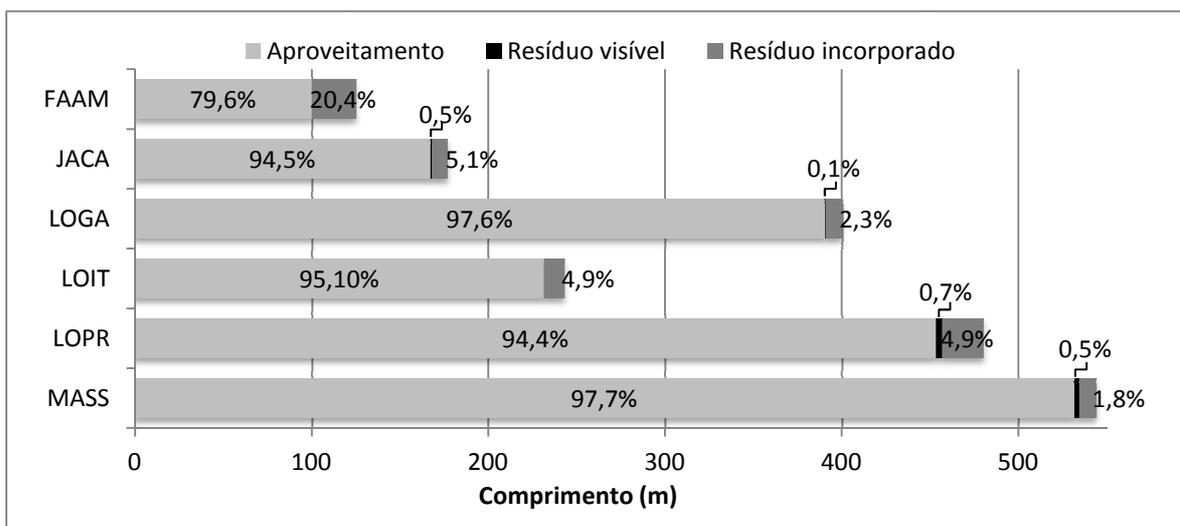


FIGURA 8 – APROVEITAMENTO REAL NOS LOTES APÓS O TRAÇAMENTO

NOTA: O resíduo total é composto pela soma dos resíduos visível e incorporado, este último sendo responsável pela maior proporção de perda no aproveitamento das toras.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS

Analisando o conjunto total de toras, equivalente a 1.968,75 m de comprimento (FIGURA 9), o aproveitamento real foi de 95,1%, indicando que, apesar das altas taxas de não conformidade dos produtos, o traçamento real é eficiente. No traçamento otimizado, o aproveitamento foi de 99,7%, representando um aumento em 4,6% em relação ao real.

Na análise separada por lotes, apresentada na TABELA 7, observam-se taxas de aproveitamento maiores que 94%, com exceção do lote FAAM, que apresentou taxa de 79,6%. No traçamento otimizado, todos os lotes apresentaram taxas de aproveitamento muito próximas de 100%. A menor taxa ficou novamente com o lote de FAAM, com 98,8%, e as maiores com os lotes LOIT e LOPR. As altas taxas de aproveitamento do traçamento otimizado resultaram num comprimento cumulativo de resíduo menor que 2 m em cada lote. O número de toretes produzidos no traçamento real foi maior que no traçamento real para todos os lotes, tendo sido maior, em termos relativos, no lote FAAM, em que o número de toretes quase dobrou (19 toretes a mais), e maior no lote JACA, com aumento em 1,08 vezes (3 toretes a mais).

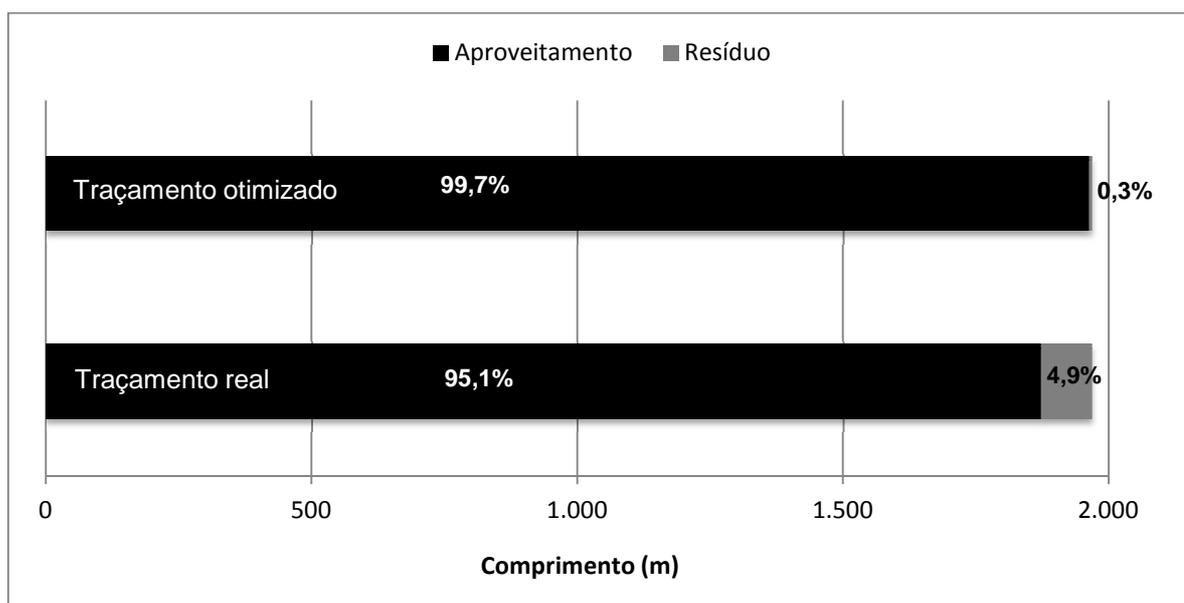


FIGURA 9 – APROVEITAMENTO DAS TORAS APÓS O TRAÇAMENTO, EM VALOR ABSOLUTO E RELATIVO.

TABELA 7 – DIFERENÇAS ENTRE TRAÇAMENTO REAL E OTIMIZADO, EM TERMOS DE APROVEITAMENTO, QUANTIDADE DE TORETES E RESÍDUO TOTAL POR LOTE

Lote	Traçamento Real			Traçamento Otimizado		
	Aproveitamento	Nº toretes	Resíduo (m)	Aproveitamento	Nº toretes	Resíduo (m)
FAAM	79,6%	23	25,48	98,8%	42	1,56
JACA	94,5%	45	9,76	99,1%	49	1,63
LOGA	97,6%	87	9,50	99,8%	96	0,84
LOIT	95,1%	55	11,79	99,9%	65	0,13
LOPR	94,4%	118	27,08	99,9%	166	0,42
MASS	97,7%	114	12,46	99,8%	146	1,22

Quando analisado o aproveitamento por classe de comprimento das toras, observa-se que no cenário real o aproveitamento proporcional é maior à medida que aumentam os comprimentos das toras (TABELA 8). No cenário otimizado o aproveitamento é similar, mas também se observa uma tendência de menor taxa de aproveitamento nas classes inferiores

TABELA 8 – APROVEITAMENTO PROPORCIONAL NO TRAÇAMENTO REAL E NO TRAÇAMENTO OTIMIZADO, POR CLASSE DE COMPRIMENTO DAS TORAS.

Classe de Comprimento	Traçamento Real	Traçamento Otimizado
6 – 10 m	91,23%	99,09%
10 – 14 m	94,53%	99,67%
14 – 16 m	95,58%	99,74%
16 – 20 m	96,87%	99,96%

Além do aumento quantitativo de toretes, houve também mudança quanto aos tipos de produtos resultantes do traçamento otimizado. Enquanto no traçamento real foi observada a tendência de maior quantidade de produtos de maiores dimensões, em todos os lotes, no traçamento otimizado esta tendência foi invertida, tendo sido produzida uma maior quantidade dos produtos de menores dimensões (FIGURA 10, p. 45). Entretanto, assim como no traçamento real, no traçamento

otimizado, com exceção do lote JACA, pelo menos um tipo de produto não foi produzido nos demais lotes. Os padrões de corte dos traçamentos real e otimizado para cada tora, bem como as quantidades e os tipos de produto, são apresentados no Apêndice (p. 55).

No traçamento otimizado dos lotes avaliados a empresa aproveitaria 23,66 m³ a mais, se comparado ao traçamento real (TABELA 9). Este valor corresponde a aproximadamente 5% do volume total de toras avaliadas, equivalentes a cerca de € 16.000,00 que a empresa potencialmente deixaria de perder ou incorporaria à sua receita. Se fosse considerada a produção anual de 2010, que foi de 135.000 m³, e um preço médio de € 700,00/m³, esse valor de receita adicional seria de € 4.725.000,00.

TABELA 9 – ESTIMATIVA DO VALOR DE GANHO POTENCIAL, EM EUROS, COM A OTIMIZAÇÃO DO TRAÇAMENTO

Lote	\bar{d} (cm)	Preço (€/m ³)	Ap_{real} (m)	$Ap_{otimizado}$ (m)	Volume (m ³)	E
FAAM	62,7	555	99,68	123,60	7,38	€ 4.096,63
JACA	60,4	700*	166,87	175,00	2,33	€ 1.631,35
LOGA	66,2	715	390,19	398,85	2,98	€ 2.133,41
LOIT	54,9	780	231,29	242,95	2,76	€ 2.149,00
LOPR	51,6	650	453,29	479,95	5,58	€ 3.626,17
MASS	54,6	910	531,36	542,60	2,63	€ 2.391,31
TOTAL			1.872,68	1.962,95	23,66	€ 16.027,87

* Espécie vendida apenas no mercado interno, preço em euros estimado pelo média dos preços das outras espécies.

** Valores em parênteses desconsideram o lote JACA.

NOTA: E = ganho (euros); Ap_{real} = aproveitamento real (m); $Ap_{otimizado}$ = aproveitamento otimizado (m); \bar{d} = diâmetro médio de cada lote.

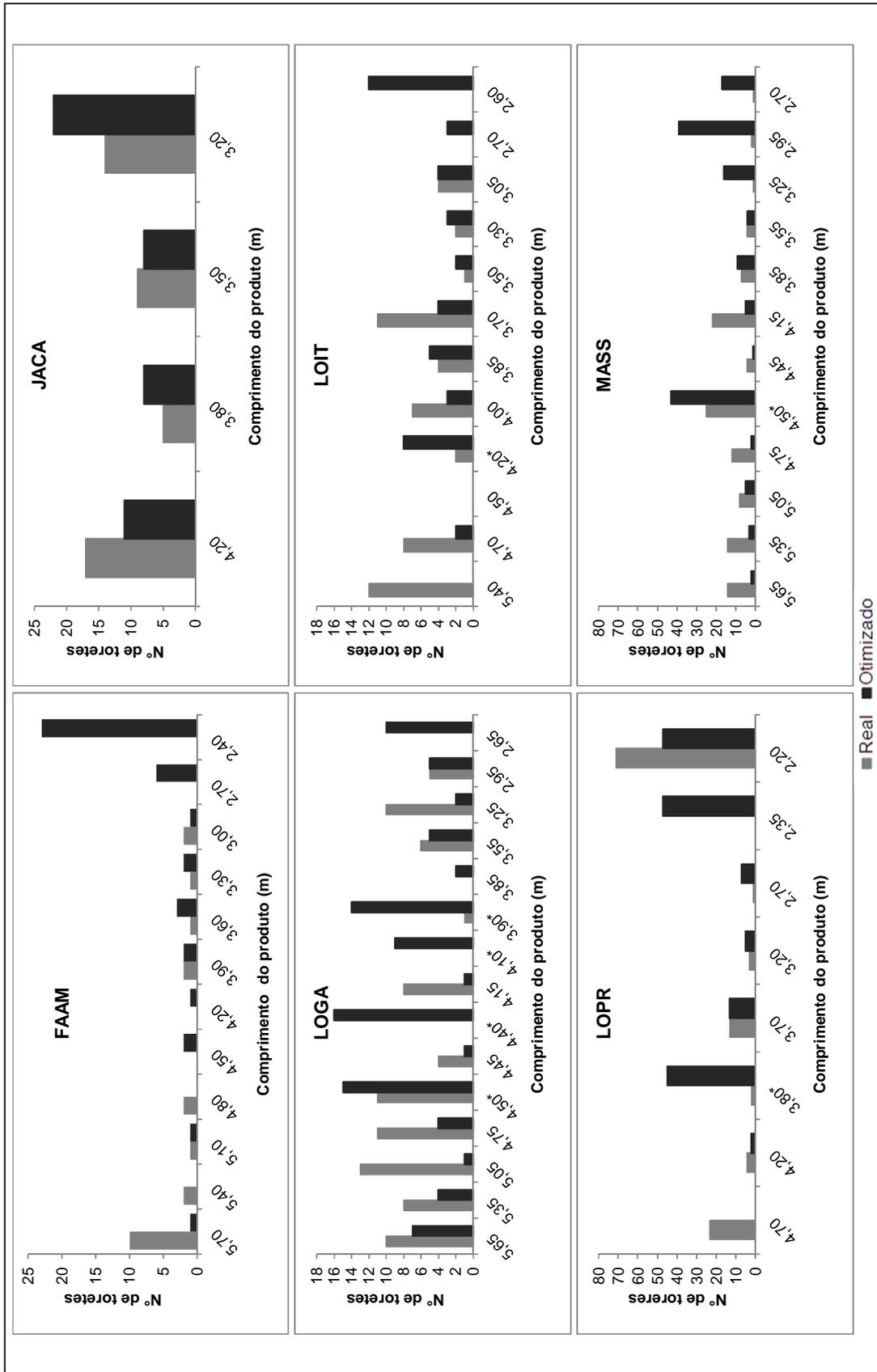


FIGURA 10 – QUANTIDADES DOS TIPOS DE PRODUTO GERADAS NOS TRAÇAMENTOS REAL E OTIMIZADO EM CADA LOTE
 NOTA: Produtos em ordem decrescente de comprimento no eixo horizontal. O asterisco (*) indica os múltiplos dos menores produtos. Os gráficos pareados por linha, apresentam a mesma escala no eixo vertical

5 DISCUSSÃO

O traçamento real caracterizou-se por uma baixa taxa de conformidade dos produtos, que levou a uma redução no aproveitamento. Ainda assim, o aproveitamento real foi maior que 95% considerando todo o conjunto de toras, indicando que, mesmo sem o auxílio de ferramentas de pesquisa operacional, o traçador consegue bons resultados utilizando sua habilidade e experiência. Os resultados do cenário real indicam que é possível melhorar o aproveitamento das toras simplesmente cuidando em produzir os toretes dentro das dimensões especificadas. Entretanto, o resíduo devido à não conformidade dos toretes pressupõe que toda a diferença no comprimento do torete em relação ao comprimento padrão do produto gerará resíduo ao longo da linha de processamento. Um estudo mais aprofundado acompanhando essas toras dentro da serraria poderia revelar se isso de fato ocorre, ou até mesmo indicar se a folga de 20 cm incorporada nos toretes nas operações de traçamento poderia ser menor ou até mesmo maior.

A otimização do traçamento não traz apenas ganhos quantitativos em termos de comprimento, volume e valor econômico, mas também um ganho qualitativo da produção. Como pôde ser observado, no traçamento otimizado uma quantidade maior de tipos de produtos foi produzida em cada lote. O software Trozador® tem uma capacidade maior de fazer combinações complexas considerando todos os tipos de produtos num menor espaço de tempo, quando comparado com a operação manual no pátio de traçamento das toras. Enquanto se observa que no traçamento real existe uma tendência de produção de produtos maiores, mais fáceis de combinar devido à menor quantidade de combinações possíveis, no traçamento otimizado existe um maior equilíbrio e muitas vezes uma tendência de maior produção dos menores produtos. Com produtos menores é possível fazer mais e mais diversas combinações aproveitando melhor as toras de menor comprimento. Esse argumento também pode ser reforçado quando se compara o ganho do aproveitamento proporcional entre o traçamento real e otimizado por classe de comprimento: a otimização resulta em ganhos maiores nas menores classes.

Reunindo as informações de aproveitamento com as de quantidade de produtos, constata-se que as toras menores têm aproveitamento menor, provavelmente porque o traçador faz combinações preferencialmente com os produtos de maiores dimensões, em detrimento dos de menores dimensões, considerando que o grau de complexidade da combinação aumentaria com estes últimos. Em outras palavras, toras mais longas apresentam um número maior de combinações factíveis de toretes a serem retirados e, portanto, maiores taxas de aproveitamento.

Arce *et al.* (2002), Marshall *et al.* (2006) e Nybakk *et al.* (2007) utilizaram a abordagem da otimização do traçamento segundo a demanda de produtos. Em contextos diferentes, estes autores desenvolveram um modelo de otimização direcionado a atender a demanda de madeira, em termos de quantidade e tipo de produtos. Este tipo de abordagem acrescenta um escala de análise ao problema: a otimização em nível do talhão. A aplicação é diferente do caso em estudo com madeira tropical. Nos trabalhos desses autores foram estudados casos ora em florestas plantadas ora em florestas temperadas, com colheita mecanizada e acompanhadas *in loco* pelas operações de traçamento. Apesar de o contexto ser distinto, o mesmo tipo de abordagem poderia ser adaptada à realidade da Amazônia, especificamente ao caso da empresa em estudo. A escala do talhão seria equivalente à escala de lotes de espécies e a demanda seria baseada na agenda, semanal, quinzenal ou mensal, de contratos de compra que a empresa tem que seguir, com quantidades, tipos e dimensões de produtos. Entretanto, o investimento neste tipo de otimização dependeria da infra-estrutura da empresa para agregar tecnologia e controle sobre o seu processo produtivo. Em todo caso, os autores citados afirmaram que este tipo de abordagem pode promover ganhos ainda maiores que a simples abordagem de maximização do valor da tora.

Uma questão que chamou a atenção foi em relação ao momento e local apropriado para o traçamento. Na empresa em estudo, o traçamento é feito na indústria, mas como ficou evidenciado na análise de dados, muitas toras não chegam inteiras no pátio da serraria. Sendo assim, é válido questionar se não seria melhor que o traçamento ocorresse na floresta. Segundo Wang (2007), em pesquisa sobre o traçamento de madeira dura nos Estados Unidos, a organização do local de trabalho reduz o tempo que se leva

para fazer o traçamento, assim como aumenta a acurácia do processo. No caso do manejo florestal na Amazônia, essa decisão é bastante relevante, pois na área de exploração as condições são desfavoráveis e os riscos muito maiores. Nesse sentido, as operações de traçamento propriamente ditas devem ocorrer preferencialmente nos pátios de estocagem na floresta ou na serraria. Entretanto, para chegar à conclusão do local e momento mais apropriados para o traçamento, seria necessário um estudo mais aprofundado dos custos e das operações necessárias, assim como um estudo comparativo de custos e rendimento das operações de traçamento em outras empresas de manejo florestal de nativas.

A vantagem de se ter as operações de traçamento no pátio da indústria é a proximidade com a serraria, facilitando ajustes rápidos na produção, por exemplo, caso haja um contrato de venda com novas dimensões. Manter as atividades de traçamento no pátio da indústria pode também favorecer o trabalho do traçador, pois é um ambiente mais controlado e com menores riscos que na floresta. Esse ambiente também é favorável para se aplicar o modelo de otimização proposto nesse trabalho. O *software* é bastante simples e poderia ser implementado, por exemplo, num dispositivo portátil como um *palm top*, *tablet* ou similar, sendo operado pelo traçador durante a operação de traçamento. Este receberia algum treinamento para aprender a manusear o aparelho, a inserir as variáveis de decisão e a fazer a leitura dos resultados e então aplicá-los ao traçamento. O *software* seria uma ferramenta para facilitar o trabalho do traçador, que teria ainda liberdade para modificar o padrão de corte de cada tora, caso observasse, por exemplo, tortuosidade ou alguma característica da tora não contemplada no modelo de otimização.

6 CONCLUSÕES

A taxa de aproveitamento no traçamento real de madeira tropicais no estudo ora apresentado é de 95,1%, sendo que a maior parte do resíduo ocorre devido à alta taxa de não conformidade dos produtos em relação às dimensões estabelecidas pela empresa.

A utilização de ferramentas matemáticas de pesquisa operacional aumenta o aproveitamento do traçamento em 4,6% quando comparado ao traçamento real, além de produzir uma diversidade maior de tipos de produtos para cada espécie, muitas vezes negligenciados no traçamento real. Entretanto, para garantir quantidades adequadas de cada tipo de produto, pode ser utilizado um *software* aprimorado que contenha também restrições de demanda por tipo e quantidade de cada produto.

Quando convertido em valores monetários, o ganho de aproveitamento no traçamento otimizado é de € 14.396,52 considerando somente o volume de toras avaliadas (21,33 m³). Considerando a produção anual da empresa de 135.000 m³, esse valor poderia ser de mais de € 4 milhões ao ano.

O modelo aqui proposto é simples e sua aplicação é viável do ponto de vista prático. Seria necessário um pequeno computador portátil que possa executar o *software* e investimento no treinamento do(s) traçador(es) para sua utilização como ferramenta de auxílio no seu trabalho. Nenhum *software* de otimização conseguiria fazer o trabalho de traçamento de madeira tropical sozinho, pois a experiência e sensibilidade do traçador em reconhecer características específicas de cada tora e associar essa informação a um padrão de traçamento são fundamentais.

Para fazer análises mais precisas do aproveitamento do traçamento é importante acompanhar o rendimento das operações de processamento da madeira até o final da linha de produção. Dessa forma é possível avaliar se o ganho de aproveitamento de madeira no traçamento influencia de fato no melhor aproveitamento até o fim da cadeia de produção e, em caso afirmativo, em que proporção.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCE, J. E. Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte. **Tese de Doutorado**, UFPR, 2000.

ARCE, J. E.; FRIEDL, R. A. Reglas óptimas de trozado aplicables a la cosecha de *Pinus* spp. con el sistema de fuste completo en el NE Argentino. In: SILVOARGENTINA II - COSECHA Y TRANSPORTE DE PRODUCTOS FORESTALES PROVENIENTES DE BOSQUES DE CULTIVO, Misiones, Argentina. **Actas**. Misiones: AFoA, 2001.

ARCE, J. E., **Trozador**. Curitiba: 2001. 1 CD-ROM.

ARCE; J. E.; CARNIERI, C., SANQUETTA, C.R.; FILHO, A.F. A forest level bucking optimization system that considers customer's demand and transportation costs. **Forest Science** 48(3): 493–50, 2002.

ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Rev. Árvore**. Viçosa, v. 28, n. 2, p. 207-217, 2004.

BRIGGS, D. G. A dynamic programming approach to optimizing stem conversion. **PhD Dissertation**. University of Washington. 1980.

CARNIERI, C.; MENDOZA, G. A.; GAVINHO, L. G. Solution procedures for cutting lumber into furniture parts. **European Journal of Operational Research** 73: 495-501, 1994.

CLEMENT, C. R.; HIGUCHI, N. A Floresta Amazônica e o futuro do Brasil. **Ciência e Cultura**. São Paulo, v.58, n.3, p. 44-49, jul/set 2006.

EMBRAPA. **Banco de Dados Climáticos do Brasil**. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite, 2003. Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/index.php>>. Acesso em 05/10/2011.

FAALAND, B.; BRIGGS, D. Log bucking and lumber manufacturing using dynamic programming. **Management Science**, Vol. 30, nº2, February, 1984.

FAO. **Global Forest Resources Assessment**. Main Report. Roma: FAO, 2010.

FERREIRA, C. A.; SILVA; H. D. de. Afilamento e forma do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* e suas variações com a adubação. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 44, p. 07-106, jan/jun, 2002.

GERWING, J.; VIDAL, E.; VERÍSSIMO, A.; UHL, A. Rendimento no processamento de madeira no estado do Pará. **Série Amazônica**. Belém, nº 18, 2000.

GRONDIN, F. Improvements of the Dynamic Programming algorithm for tree bucking. **Wood and Fiber Science**, n. 30, vol. 1, pp. 91-104, 1998.

HOLMES, T. P.; BLATE, G. M.; ZWEED, J. C.; PEREIRA JR.,R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F.; BAUCH, R. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, 163: 93-110, 2002.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Série Manuais Técnicos em Geociências, Número 1. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Escala 1: 5.000.000. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Cartas_e_Mapas/Mapas_Murais/>. Acesso em 15/12/2011.

ITTO. **Annual review and assessment of the world timber situation**. Yokohama: ITTO, 2010.

ITTO. **Status of Tropical Forest Management 2011**. Technical Series 38. Yokohama: ITTO, 2011.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Vol. 15, nº 3, p. 259-263, jun., 2006.

MARSHALL, H. D.; MURPHY, G.; BOSTON, K. Three Mathematical Models for Bucking-to-Order. **Silva Fennica**, 40(1), 2006.

MENDONÇA, A. C. Caracterização e simulação de processos dinâmicos de uma área de floresta tropical de terra firme utilizando matrizes de transição. **Dissertação de Mestrado**, UFPR, 2003.

NOGUEIRA, M. M.; VIEIRA, V. W.; SOUZA, A. de; LENTINI, M. W. **Manejo de floresta naturais da Amazônia: corte, traçamento e segurança**. Manual Técnico 2. Belém: IFT, 2011.

NYBAKK, E.; BIRKELAND, T.; FINSTAD, K. Bucking-to-demand improves the match between sawmill demand and log supply in Norway. *In: 3rd Forest Engineering Conference - Sustainable Forest Operations*, pp. 1-8. Mont-Tremblant, Quebec, October 1-4, 2007.

PEREIRA; D.; SANTOS, D.; VEDOVETO, M.; GUIMARÃES, J.; VERÍSSIMO, A. **Fatos Florestais da Amazônia 2010**. Belém: Imazon, 2010.

PNEVMATICOS, S. M.; MANN, S. H. Dynamic programming in tree bucking. **Forest Products Journal**, vol. 22, nº 2, February, 1972.

SESSIONS, J.; OLSEN, E.; GARLAND, J. Tree bucking for Optimal Stand Value with Log Allocation Constraints. **Forest Science**, Vol. 35, nº 1, pp. 271-276, 1989.

SFB; AMAZON. **A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receitas e mercados**. Belém: SFB e Imazon, 2009.

VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI, M. **Pólos madeireiros do estado do Pará**. Belém: Imazon, 2002.

VIDAL, E., GERWING, J., BARRETO, P., AMARAL, P.; JOHNS, J. **Redução de desperdícios na produção de madeira na Amazônia**. Série Amazônia N° 05. Belém: Imazon, 1997.

WANG, J. Hardwood log bucking and loading efficiency in West Virginia. **Forest Products Journal**, Vol. 57, nº 5, mai. 2007.

WANG, J.; LEDOUX, C. B.; MCNEEL, J. Optimal tree-stem bucking of northeastern species of China. **Forest Products Journal**, Vol. 54. n^o 2, fev. 2004.

WANG, J.; LIU, J.; LEDOUX, C. B. A Three-Dimensional Bucking System for Optimal Bucking of Central Appalachian Hardwoods. **International Journal of Forest Engineering**, Vol. 20, n^o 2, jul. 2009.

APÊNDICE

RESULTADOS DO TRAÇAMENTO REAL E OTIMIZADO POR LOTE

L = comprimento total da tora; Ap = aproveitamento (m); l_1, l_2, \dots, l_k = tipos de produtos; Tc = taxa de conformidade (número de toretes em conformidade em relação ao número total produzido, por tora). Rv = resíduo visível; Ri = resíduo incorporado.

- FAVA AMARGOSA (FAAM)

Tora	L	TRACAMENTO REAL														TRACAMENTO OTIMIZADO															
		Ap (m)	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	l_9	l_{10}	l_{11}	l_{12}	Tc	Resíduo		Ap (m)	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	l_9	l_{10}	l_{11}	l_{12}	Resíduo
			5,70	5,40	5,10	4,80	4,50	4,20	3,90	3,60	3,30	3,00	2,70	2,40		Rv	Ri		5,70	5,40	5,10	4,80	4,50	4,20	3,90	3,60	3,30	3,00	2,70	2,40	
1	13,10	9,40	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	3,70	12,90	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0,20
2	11,40	9,40	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100,0%	0,00	2,00	11,40	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0,00
3	10,33	7,60	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	2,73	10,20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0,13	
4	14,88	14,55	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	50,0%	0,00	0,33	14,70	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	2	0,18
5	9,55	7,35	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	2,20	9,30	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0,25	
6	8,30	4,70	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	3,60	8,10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0,20
7	8,42	4,70	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	3,72	8,40	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0,02
8	7,68	4,70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	2,98	7,50	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,18
9	8,77	6,67	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	2,10	8,70	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0,07	
10	16,43	15,61	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7%	0,00	0,82	16,20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	3	0,23
11	16,30	15,00	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	33,3%	0,00	1,30	16,20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	3	0,10

- JACAREÚBA (JACA)

Tora	L	TRACAMENTO REAL								TRACAMENTO OTIMIZADO					
		A_p (m)	l_1	l_2	l_3	l_4	T_c	Resíduo		A_p (m)	l_1	l_2	l_3	l_4	Resíduo
			4,20	3,80	3,50	3,20		R_v	R_i		4,20	3,80	3,50	3,20	
1	18,32	17,48	0	0	5	0	100,0%	0,84	0	18,30	2	0	1	2	0,02
2	15,70	14,70	1	0	3	0	50,0%	0	1	15,70	2	1	1	0	0,00
3	9,98	8,40	2	0	0	0	0,0%	0	1,58	9,90	0	0	1	2	0,08
4	10,51	8,40	2	0	0	0	0,0%	0	2,11	10,50	0	1	1	1	0,01
5	12,36	12,22	2	1	0	0	66,7%	0	0,14	12,20	2	1	0	0	0,16
6	9,69	9,69	0	0	0	3	100,0%	0	0	9,60	0	0	0	3	0,09
7	13,28	12,63	3	0	0	0	66,7%	0	0,65	13,10	0	0	1	3	0,18
8	14,29	13,85	1	0	0	3	50,0%	0	0,44	14,10	1	0	1	2	0,19
9	8,80	8,70	2	0	0	0	50,0%	0	0,1	8,40	2	0	0	0	0,40
10	13,36	11,57	2	0	0	1	66,7%	0	1,79	13,10	0	0	1	3	0,26
11	15,67	15,41	2	1	1	0	50,0%	0	0,26	15,60	1	3	0	0	0,07
12	16,90	16,62	0	1	0	4	80,0%	0	0,28	16,90	0	1	1	3	0,00
13	17,77	17,20	0	2	0	3	0,0%	0	0,57	17,60	1	1	0	3	0,17

• LOURO GAMELA (LOGA)

Tora	L	TRACAMENTO REAL															TRACAMENTO OTIMIZADO																				
		Ap (m)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l ₉	l ₁₀	l ₁₁	l ₁₂	l ₁₃	l ₁₄	l ₁₅	Tc	Residuo		Ap (m)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l ₉	l ₁₀	l ₁₁	l ₁₂	l ₁₃	l ₁₄	l ₁₅	Residuo
			5,65	5,35	5,05	4,75	4,45	4,15	3,85	3,55	3,25	2,95	2,65	4,50	3,90	4,10	4,40		Rv	Ri		5,65	5,35	5,05	4,75	4,45	4,15	3,85	3,55	3,25	2,95	2,65	4,50	3,90	4,10	4,40	
1	13,70	13,68	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	100,0%	0,02	0,00	13,70	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,00					
2	13,42	13,11	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	33,3%	0,05	0,26	13,40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0,02		
3	10,42	10,10	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,01	0,31	10,40	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0,02		
4	9,91	9,55	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,01	0,35	9,85	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,06		
5	19,00	18,70	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	50,0%	0,03	0,27	19,00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0,00		
6	18,87	18,75	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	100,0%	0,12	0,00	18,85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0,02		
7	8,90	8,90	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	100,0%	0,00	0,00	8,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,00		
8	9,60	9,60	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	100,0%	0,00	0,00	9,55	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,05		
9	16,54	15,42	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3%	0,00	1,12	16,50	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0,04		
10	9,35	8,85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,50	9,25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,10		
11	7,10	6,80	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,30	7,10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,00		
12	9,60	8,95	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,65	9,55	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,05		
13	13,24	12,15	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0,0%	0,01	1,08	13,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,04		
14	9,12	8,90	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,22	9,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0,12		
15	14,10	13,43	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	33,3%	0,00	0,67	14,10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0,00		
16	21,00	20,67	0	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	60,0%	0,00	0,33	21,00	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0,00		
17	14,35	13,95	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,40	14,35	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0,00		
18	21,00	20,78	0	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	60,0%	0,00	0,22	21,00	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0,00		
19	10,88	10,70	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,18	10,85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0,03		
20	13,00	12,94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	66,7%	0,00	0,06	13,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0,00			
21	14,60	14,34	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	33,3%	0,00	0,26	14,60	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0,00		

Continua...

Continuação.

22	10,56	10,40	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,16	10,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0,11
23	10,21	10,14	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,07	10,15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,06	
24	19,33	18,70	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,63	19,30	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,03		
25	14,00	14,00	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	100,0%	0,00	0,00	14,00	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0,00		
26	12,10	11,88	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	33,3%	0,00	0,22	12,10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,00		
27	9,50	9,20	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,30	9,50	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00		
28	9,28	9,28	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100,0%	0,00	0,00	9,25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,03		
29	10,72	10,65	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,07	10,70	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0,02		
30	14,54	14,32	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	33,3%	0,00	0,22	14,50	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0,04		
31	11,75	11,60	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	33%	0,00	0,15	11,75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0,00		

- LOURO ITAÚBA (LOIT)

Tora	L	TRACAMENTO REAL														TRACAMENTO OTIMIZADO															
		Ap (m)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l ₉	l ₁₀	l ₁₁	l ₁₂	T _c	Residuo		Ap (m)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l ₉	l ₁₀	l ₁₁	l ₁₂	Residuo
			5,40	4,70	4,50	4,00	3,85	3,70	3,50	3,30	3,05	2,70	2,60	4,20		R _v	R _i		5,40	4,70	4,50	4,00	3,85	3,70	3,50	3,30	3,05	2,70	2,60	4,20	
1	18,35	18,35	0	0	0	1	1	2	0	0	1	0	0	0	100,0%	0,00	0,00	18,35	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0,00
2	19,10	18,30	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0%	0,00	0,80	19,10	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0,00
3	15,02	14,95	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	75,0%	0,00	0,07	15,00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0,02
4	14,10	13,80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,0%	0,00	0,30	14,10	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0,00
5	17,35	15,50	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	1,85	17,35	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,00
6	19,50	19,43	0	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	80,0%	0,00	0,07	19,50	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	0,00
7	18,82	16,20	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	2,62	18,80	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0,02
8	16,75	16,53	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	75,0%	0,00	0,22	16,75	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0,00
9	16,85	15,50	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3%	0,00	1,35	16,85	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,00
10	19,87	19,30	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,57	19,85	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0,02
11	11,17	11,10	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	66,7%	0,00	0,07	11,15	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0,02
12	10,69	10,57	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	66,7%	0,00	0,12	10,65	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0,04
13	13,01	10,80	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	2,21	13,00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0,01
14	19,55	18,24	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	1,31	19,55	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0,00
15	12,95	12,72	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3%	0,00	0,23	12,95	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0,00

- LOURO PRETO (LOPR)

Tora	L	TRACAMENTO REAL											TRACAMENTO OTIMIZADO										
		Ap (m)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	Tc	Resíduo		Ap (m)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	Resíduo
			4,70	4,20	3,70	3,20	2,70	2,35	2,20	3,80		Rv	Ri		4,70	4,20	3,70	3,20	2,70	2,35	2,20	3,80	
1	9,10	8,90	1	1	0	0	0	0	0	0	0%	0,00	0,20	9,10	0	0	1	1	0	0	1	0	0,00
2	10,71	10,30	0	0	0	0	1	0	0	2	0%	0,00	0,41	10,70	0	0	1	1	0	0	0	1	0,01
3	10,87	10,20	0	0	1	2	0	0	0	0	0%	0,00	0,67	10,85	0	0	0	0	0	3	0	1	0,02
4	11,92	11,40	0	0	0	0	0	0	0	3	0%	0,00	0,52	11,90	0	0	1	0	0	0	2	1	0,02
5	12,06	11,40	0	0	0	0	0	0	0	3	0%	0,00	0,66	12,05	0	0	1	0	0	1	1	1	0,01
6	12,06	11,40	0	0	0	0	0	0	0	3	0%	0,00	0,66	12,05	0	0	1	0	0	1	1	1	0,01
7	12,51	11,80	0	1	0	0	0	0	0	2	0%	0,00	0,71	12,50	0	0	0	0	1	0	1	2	0,01
8	13,09	12,30	1	0	0	0	0	0	0	2	0%	0,00	0,79	13,05	0	0	0	0	0	3	1	1	0,04
9	13,41	13,20	2	0	0	0	0	0	0	1	33%	0,00	0,21	13,40	0	0	0	0	1	2	1	1	0,01
10	13,86	13,20	2	0	0	0	0	0	0	1	0%	0,00	0,66	13,85	0	0	0	0	1	1	4	0	0,01
11	14,29	14,14	3	0	0	0	0	0	0	0	33%	0,00	0,15	14,25	0	0	1	0	0	1	2	1	0,04
12	14,70	14,10	3	0	0	0	0	0	0	0	0%	0,00	0,60	14,70	0	0	1	0	0	0	5	0	0,00
13	15,23	13,03	3	0	0	0	0	0	0	0	25%	1,41	0,79	15,20	0	0	0	0	0	0	0	4	0,03
14	15,45	14,60	0	0	0	1	0	0	0	3	0%	0,00	0,85	15,45	0	0	0	0	1	1	3	1	0,00
15	15,50	12,30	1	0	0	0	0	0	0	2	0%	2,00	1,20	15,50	0	0	0	1	0	2	0	2	0,00
16	15,64	14,60	0	0	0	1	0	0	0	3	0%	0,00	1,04	15,60	0	1	0	0	0	0	0	3	0,04
17	15,90	15,18	0	0	0	0	0	0	0	4	25%	0,00	0,72	15,85	0	0	1	0	0	1	1	2	0,05
18	15,98	15,20	0	0	0	0	0	0	0	4	0%	0,00	0,78	15,95	0	1	0	0	0	5	0	0	0,03
19	16,34	15,57	0	1	0	0	0	0	0	3	25%	0,00	0,77	16,30	0	0	0	0	0	6	1	0	0,04
20	16,61	15,50	1	0	0	1	0	0	0	2	0%	0,00	1,11	16,60	0	0	1	0	0	2	2	1	0,01
21	17,20	16,10	1	0	0	0	0	0	0	3	0%	0,00	1,10	17,20	0	0	1	0	0	2	4	0	0,00

Continua...

Continuação.

22	17,20	16,40	2	0	0	1	0	0	0	1	0%	0,00	0,80	17,20	0	0	1	0	0	2	4	0	0,00
23	17,32	16,50	1	1	0	0	0	0	0	2	0%	0,00	0,82	17,30	0	0	1	0	0	0	1	3	0,02
24	18,50	17,55	0	0	0	0	0	1	0	4	0%	0,00	0,95	18,50	0	0	0	0	1	0	2	3	0,00
25	18,70	17,71	1	0	0	0	2	0	0	2	20%	0,00	0,99	18,70	0	0	0	0	1	4	3	0	0,00
26	18,95	18,10	1	0	0	3	0	0	0	1	0%	0,00	0,85	18,95	0	0	1	0	0	3	2	1	0,00
27	19,27	18,45	0	0	0	1	0	0	0	4	20%	0,00	0,82	19,25	0	0	0	0	1	1	3	2	0,02
28	19,30	18,40	0	0	0	1	0	0	0	4	0%	0,00	0,90	19,30	0	0	0	1	0	2	0	3	0,00
29	19,30	18,40	0	0	0	1	0	0	0	4	0%	0,00	0,90	19,30	0	0	0	1	0	2	0	3	0,00
30	19,65	18,40	0	0	0	1	0	0	0	4	0%	0,00	1,25	19,65	0	0	0	0	0	1	1	3	0,00
31	19,75	18,96	0	0	1	0	0	0	0	4	20%	0,00	0,79	19,75	0	0	0	0	0	1	1	4	0,00

• MAÇARANDUBA (MASS)

Tora	L	TRACAMENTO REAL													TRACAMENTO OTIMIZADO																
		Ap (m)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l ₉	l ₁₀	l ₁₁	l ₁₂	Tc	Resíduo		Ap (m)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l ₉	l ₁₀	l ₁₁	l ₁₂	Resíduo
			5,65	5,35	5,05	4,75	4,45	4,15	3,85	3,55	3,25	2,95	2,70	4,50		Rv	Ri		5,65	5,35	5,05	4,75	4,45	4,15	3,85	3,55	3,25	2,95	2,70	4,50	
1	20,25	19,97	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,28	20,25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0,00
2	16,00	15,81	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7%	0,00	0,19	16,00	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	1	0	0,00
3	11,90	11,30	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,6	11,90	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0,00
4	9,47	9,20	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,27	9,45	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0,02
5	11,06	10,70	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,36	11,05	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0,01
6	12,02	11,30	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,72	11,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0,07
7	19,42	19,00	0	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,42	19,40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0,02
8	16,66	16,37	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,29	16,65	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	1	0,01
9	12,58	12,51	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	66,7%	0,00	0,07	12,55	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0,03
10	6,23	5,65	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,58	6,20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0,03
11	9,59	9,51	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,08	9,55	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,04
12	14,87	14,56	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	33,3%	0,00	0,31	14,85	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0,02
13	13,62	13,47	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	66,7%	0,00	0,15	13,60	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0,02
14	12,96	12,75	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,21	12,85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0,11
15	9,86	9,79	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,07	9,85	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,01
16	7,60	7,60	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	100,0%	0,00	0,00	7,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0,15
17	7,52	7,10	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,42	7,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0,07
18	9,96	9,85	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	50,0%	0,00	0,11	9,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0,06
19	14,17	14,04	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	66,7%	0,00	0,13	14,05	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,12
20	11,95	11,30	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,65	11,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0,00
21	13,76	13,76	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	100,0%	0,00	0,00	13,75	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0,01

Continua...

Continuação.

22	18,07	18,07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	100,0%	0,00	0,00	18,05	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0,02
23	10,11	9,80	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,31	10,10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0,01
24	18,50	18,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,0%	0,00	0,50	18,50	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	2	0,00	
25	13,63	10,70	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	2,62	0,31	13,60	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0,03	
26	20,80	20,80	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	100,0%	0,00	0,00	20,80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2	0,00	
27	10,72	10,72	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100,0%	0,00	0,00	10,70	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	
28	21,08	20,52	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	40,0%	0,00	0,56	21,05	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4	2	0	0,03	
29	18,10	18,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	75,0%	0,00	0,10	18,10	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	1	0,00	
30	8,45	8,25	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	50,0%	0,00	0,20	8,35	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,10	
31	13,00	12,79	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	33,3%	0,00	0,21	13,00	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0,00	
32	8,96	8,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	50,0%	0,00	0,06	8,95	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,01	
33	14,13	14,02	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	66,7%	0,00	0,11	14,05	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,08	
34	13,77	13,58	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	66,7%	0,00	0,19	13,75	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0,02	
35	11,70	11,63	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	66,7%	0,00	0,07	11,65	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0,05	
36	9,89	9,50	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0%	0,00	0,39	9,85	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,04	
37	13,50	13,11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	33,3%	0,00	0,39	13,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,00	
38	21,36	21,23	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	2	80,0%	0,00	0,13	21,35	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0,01	
39	17,85	17,65	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	75,0%	0,00	0,20	17,85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0,00	
40	18,75	18,55	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	75,0%	0,00	0,20	18,75	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	2	0,00	