

PESQUISA OPERACIONAL NA MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS DE TRANSPORTE FLORESTAL

Edson LACHINI¹

Nilton César FIEDLER¹

Evandro Ferreira da SILVA¹

Giovanni Correia VIEIRA¹

Luandson Araújo de SOUZA¹

Flávio Cipriano de Assis do CARMO¹

- RESUMO: O presente estudo teve como objetivo minimizar os custos de transporte de madeira de uma empresa florestal por meio da utilização de programação linear inteira. Para tal, realizou-se um estudo detalhado sobre a rotina de cada caminhão coletando-se informações durante 5 meses (maio a setembro de 2014). O modelo proposto nesse estudo teve como objetivo minimizar o custo, determinando o número de viagens de cada caminhão à cada fazenda, de forma a atender à demanda da empresa, com base em informações referentes à carga ótima por veículo, tempo de deslocamento da fazenda até a indústria, dias trabalhados, volume total de madeira transportada, média diária de madeira transportada até o pátio da indústria, média de viagens por dia, quilometragem média diária, combustível consumido por dia e consumo médio. Também foram inseridos na modelagem os custos fixos e variáveis. O modelo apresentou desempenho satisfatório e condizente com o esperado, em que o caminhão com menor custo de produção foi o mais utilizado, tendo maior participação na solução nos 3 cenários. O modelo proposto atendeu aos objetivos do trabalho, otimizando a frota de caminhões no transporte de madeira das fazendas visando atender à demanda da serraria com o menor custo.
- PALAVRAS-CHAVE: Análise econômica; otimização do transporte florestal; planejamento florestal; redução de custos; modelos matemáticos.

1 Introdução

No Brasil, o transporte florestal, em sua maioria, é realizado por meio do modal rodoviário, devido ao histórico e tendência nacional de investimentos substanciais nesse tipo de modal (ALVES *et al.*, 2013). Essa categoria de modal possui grande aceitação no Brasil devido a diversos fatores, como a extensa malha viária, a grande oferta de diferentes tipos de veículos e o baixo valor de aquisição, quando comparado a outros modais existentes (MACHADO *et al.*; 2009).

¹Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, CEP: 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. E-mail: edson_lachini@hotmail.com; niltoncesarfiedler@yahoo.com.br; evandroflorestal@gmail.com; cvgiovanni@gmail.com; luandsonasouza@gmail.com; flaviocipriano@hotmail.com

A operação de transporte florestal consiste na movimentação de madeira e seus derivados da floresta ou indústria até o local de consumo. O custo com transporte de madeira realizado no Brasil tem sido um dos principais fatores que inviabilizam economicamente projetos florestais. Em razão de uma grande parte dos reflorestamentos estar situada muito distante dos centros consumidores, as etapas de colheita e transporte são consideradas atividades de suma importância, pois chegam a representar grande parcela dos custos totais da madeira posta na indústria (SILVA *et al.*, 2014).

O alto custo gerado pelas atividades de colheita e transporte ocorre pelo fato de haver um grande número de variáveis envolvidas no processo, como variáveis climáticas, distância entre a floresta e a unidade em que será processada a madeira, custos de manutenção, combustível, lubrificante, pneus, acessórios e tarifas (BERGER *et al.*, 2003).

Uma alternativa para minimizar tais custos e auxiliar o processo de tomada de decisão é a aplicação da Pesquisa Operacional (PO). A PO envolve pesquisa sobre operações e é aplicada em problemas visando a melhor forma de conduzir e coordenar as atividades de uma organização, quase sempre, sob restrições que envolvem recursos escassos (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Com a aplicação da PO é possível auxiliar o processo de tomada de decisão, podendo resultar na diminuição de custos, da distância percorrida e até mesmo maximização da carga deslocada até o ponto de entrega (BERGER *et al.*, 2003). Problemas de otimização de transporte são amplamente aplicados na área florestal em função do número de variáveis e necessidade de soluções viáveis para os problemas apresentados. Lacowicz *et al.* (2002) aplicaram programação linear para minimizar custos do transporte rodoviário com um único destino e 17 origens.

Berger *et al.* (2003) estudaram a situação do transporte florestal de madeira com várias origens e um único destino, a fim de obter a o número ideal de viagens, carga ótima, menor custo de transporte e quilometragem máxima. Kanzian *et al.* (2013) estudaram redes de fornecimento de energia florestal por meio de otimização multiobjetivo, no modelo o lucro deve ser maximizado e as emissões de CO₂ devem ser minimizadas.

Zhang, Johnson e Wang (2016) desenvolveram uma programação integrada multiestágio para um sistema de transporte multimodal (ferroviário e rodoviário) para uma cadeia de abastecimento de biocombustíveis de biomassa florestal. Gracia *et al.* (2014) estudaram o problema de coleta biomassa, por meio do problema clássico de roteamento de veículos, a minimização ocorre em função dos custos para frotas de diferentes veículos agrícolas (trituradores, caminhões, reboques basculantes e tratores). Dessa forma, este trabalho teve como objetivo minimizar os custos de transporte de madeira de uma empresa florestal com a utilização de programação linear inteira.

2 Material e métodos

2.1 Coleta de dados

Os dados da pesquisa foram coletados na serraria Jomadeiras, a qual está localizada na região montanhosa do Espírito Santo, município de Domingos Martins (latitude sul: 20°18'30", longitude oeste: 40°43'30"), distrito de Aracê, a 1.050 m de altitude, na divisa com o município de Venda Nova do Imigrante. Realizou-se um estudo detalhado sobre cada caminhão coletando-se informações durante 5 meses (maio a setembro de 2014).

Nesse estudo, foram levantadas informações referentes à carga ótima por veículo, tempo de deslocamento da fazenda até a indústria, dias trabalhados, volume total de madeira transportada, média diária de madeira transportada até o pátio da indústria, média de viagens por dia, quilometragem média diária, combustível consumido por dia e consumo médio (km.litro^{-1}). Vale ressaltar que as distâncias entre as fazendas e a serraria foram geradas por meio de simulação.

2.2 Análise de custos

A análise de custos foi realizada baseada na depreciação dos veículos, salários dos motoristas, encargos sociais, licenciamento dos veículos, seguro obrigatório e remuneração de capital. O custo fixo total é gerado a partir da soma dos custos citados.

A análise dos custos variáveis foi realizada baseada na média dos preços gastos pelos veículos com: combustíveis, lubrificantes, pneus, manutenções e lavagens. A soma destes custos fornecerá o custo variável total.

2.2.1 Custos fixos

2.2.1.1 Depreciação

Utilizou-se o método da depreciação linear, pois considerou-se que os recursos financeiros correspondentes ficam no caixa da empresa com remuneração zero (MACHADO e MALINOVSKI, 1988). A depreciação foi obtida pela Equação 1

$$D = \frac{(Va \times Vr)}{(n \times \overline{km})}, \quad (1)$$

em que: D = Depreciação ($\text{R}\$.\text{mês}^{-1}$); Va = Valor de aquisição ($\text{R}\$$); Vr = Valor residual ($\text{R}\$$); n = Vida útil (em meses), e, \overline{km} = Quilometragem média mensal (km).

2.2.1.2 Salários e encargos sociais

Os dados referentes aos salários e encargos sociais foram obtidos junto ao setor de pessoal da empresa, sendo que esses salários são compostos por três itens, conforme demonstrado na Equação 2 (FONTES e MACHADO, 2014) dada por

$$SM = \frac{N(S + E + C)}{\overline{km}}, \quad (2)$$

em que: SM = Salário do motorista (R\$.km⁻¹); N = Número de motoristas; S = Salário fixo (R\$.km⁻¹); E = Encargos (R\$.km⁻¹); C = Comissões (R\$.km⁻¹) e \overline{km} = Quilometragem média mensal (km).

2.2.1.3 Licenciamento e seguro obrigatório

Para o cálculo deste custo foi utilizada a Equação 3

$$LS = \frac{(CL + CS)}{\overline{km}}, \quad (3)$$

em que: LS = Custos de licenciamento e seguro obrigatório (R\$.km⁻¹); CL = Custo de licenciamento (R\$.km⁻¹); CS = Custo de seguro obrigatório (R\$.km⁻¹) e \overline{km} = Quilometragem média mensal (km).

2.2.1.4 Remuneração de capital

A remuneração de capital foi calculada por meio aplicação de uma taxa de juros ao investimento médio anual (IMA) correspondente ao custo de oportunidade que seria aplicado ao capital. Foi adotada a taxa de juros de 12% a.a., sendo esta, a mesma adotada por Burla (2008), de acordo com a Equação 4 dada por

$$RC = \frac{IMA \times i}{\overline{km}}, \quad (4)$$

em que: RC = Remuneração de capital (R\$.km⁻¹); i = Taxa anual de juros simples (%); IMA = Investimento médio anual (R\$) e \overline{km} = Quilometragem média mensal (km).

2.2.2 Custos variáveis

A análise dos custos variáveis foi realizada com base na média dos preços gastos pelos veículos com: combustíveis, lubrificantes, pneus, manutenções e lavagens. A soma destes custos forneceu o custo variável total.

2.2.2.1 Combustível

Foram coletadas informações de consumo de cada caminhão durante os meses de pesquisas junto ao departamento de manutenção mecânica da empresa. O custo mensal de combustível foi determinado pela Equação 5 dada por

$$CO = \frac{Pcl}{fa} \quad (5)$$

2.2.2.2 Lubrificantes

As informações necessárias para o cálculo de custos de lubrificantes também foram obtidas junto ao departamento de manutenção mecânica da empresa, relativo ao consumo de cada caminhão durante os meses de pesquisa.

Com base em indicadores médios de consumo e das informações técnicas do fabricante, os custos de lubrificantes foram estimados com fator de ajuste de 20% dos custos do combustível consumido por hora de trabalho, conforme a metodologia proposta pela Sociedade Americana de Engenharia Agrícola (*American Society of Agricultural Engineer, ASAE*), em 2001. O custo de lubrificantes foi calculado de acordo com a Equação 6 dada por

$$LU = Co \times Fc, \quad (6)$$

em que: LU = Custo de lubrificantes (R\$.km⁻¹); Co = Custo com combustível (R\$.km⁻¹) e, Fc = Fator de correção (20%).

2.2.2.3 Custos de pneus e acessórios

Para a determinação do intervalo médio de tempo entre cada troca de pneus ou recapes foram utilizadas informações do departamento de manutenção mecânica e do setor de compras da empresa.

Considerou-se ainda um “fator de segurança” no final da expressão, como um coeficiente de segurança para pneus estourados e sem condições de recuperação. O valor mínimo para este fator é 1,1, que equivale a 10% (ALVES, 2011). Os custos com pneus e acessórios foram determinados pela Equação 7 dada por

$$PN = \frac{(Ppn + Pc + Pr) \times Np}{\overline{kmp}} \times 1,1, \quad (7)$$

em que: PN = Custo de pneus e acessórios (R\$.km⁻¹); Ppn = Preço dos pneus e acessórios (R\$.mês⁻¹); Pc = Preço de conserto (R\$.mês⁻¹); Pr = Preço de recapagem (R\$.mês⁻¹); Np = Número de pneus, e, \overline{kmp} = Média mensal por pneu (km).

2.2.2.4 Manutenção mecânica dos caminhões

Os custos de manutenção dos veículos foram obtidos com auxílio do setor de contabilidade da empresa e são divididos em custos de peças e custos de oficina (salários e encargos dos mecânicos).

2.2.2.5 Lavagem

Os custos referentes à lavagem dos veículos (LA) foram obtidos por meio de pesquisas de mercado na região. Cada caminhão é submetido à uma lavagem mensal.

2.2.3 Obtenção do Custo Total

O custo total foi obtido, conforme Burla (2001), somando-se os custos fixos, os custos variáveis e as despesas administrativas, que variam de 5 a 15% sobre o custo total no período de um mês, conforme Equação 8 dada por

$$CT = CF + CV + DA, \quad (8)$$

em que: CT = Custo total (R\$.km⁻¹); CF = Custos fixos (R\$.km⁻¹); CV = Custos variáveis (R\$.km⁻¹) e, DA = Despesas administrativas (R\$.km⁻¹).

2.2.4 Custo de produção

Refere-se ao custo por unidade de produção. Foi obtido pela divisão dos custos operacionais (R\$.hf⁻¹) pela produtividade dos respectivos caminhões (R\$.m⁻³), conforme a fórmula 9 dada por

$$CTp = \frac{CT}{P}, \quad (9)$$

em que: CTp = custo operacional total por quilometro rodado (R\$.m⁻³); CT = custo operacional total (R\$.km⁻¹); P = produtividade (m³.km⁻¹).

O grau de utilização é a percentagem do tempo efetivamente trabalhado pelo veículo em relação ao tempo total programado para o trabalho, de acordo com a Equação 10 (FONTES e MACHADO, 2014) dada por

$$GU = \frac{TE}{(TE + TI)} \cdot 100, \quad (10)$$

em que: GU = Grau de utilização (%); TE = Tempo de trabalho efetivo (h) e TI = Tempo de interrupções operacionais (h).

2.3 Descrição do problema

Com os custos obtidos na primeira fase do trabalho foi possível otimizar o transporte florestal minimizando os custos da colheita de madeira para serraria.

A empresa possui uma frota própria de três caminhões, todos trucados, autocarregáveis, com carrocerias semelhantes, conforme apresentado na Tabela 1. A empresa possui dois turnos totalizando 8 h diárias e 176 h mensais. O grau de utilização obtido foi de 89,95%, 91,80% e 90,01%, respectivamente, caminhão A, B e C.

Tabela 1 - Descrição operacional dos caminhões analisados

Características	Caminhão A	Caminhão B	Caminhão C
Capacidade Máxima de Transporte	30 Toneladas	21 Toneladas	27 Toneladas
Velocidade média operacional vazio	37,23 (km.h ⁻¹)	34,15 (km.h ⁻¹)	38,18 (km.h ⁻¹)
Velocidade média operacional carregado	32,17 (km.h ⁻¹)	30,76 (km.h ⁻¹)	34,24 (km.h ⁻¹)
Tempo operacional de carregamento	0,796 (horas)	0,761 (horas)	0,921 (horas)
Tempo operacional de descarregamento	0,263 (horas)	0,289 (horas)	0,316 (horas)

Tabela 2 - Distância da fazenda e quantidade de madeira ofertada

Fazenda	DF (km)	QMO (t.mês⁻¹)	TNV Caminhão A (horas)	TNV Caminhão B (horas)	TNV Caminhão C (horas)
1	17	416	1,55	1,57	1,71
2	19	520	1,61	1,64	1,76
3	23	416	1,72	1,76	1,87
4	36	390	2,10	2,16	2,23
5	39	416	2,19	2,25	2,31
6	44	291,2	2,33	2,41	2,45
7	49	640	2,47	2,56	2,59
8	66	820	2,96	3,08	3,06
9	74	790	3,19	3,33	3,28
10	77	650	3,28	3,42	3,36

Nota: DF: Distância da fazenda; QMO: Quantidade de madeira ofertada; TNV: Tempo necessário de viagem (compreende o tempo somatório de deslocamento vazio, carregamento, deslocamento carregado e descarregamento).

A madeira para serraria foi obtida de 10 fazendas, localizadas em distâncias diferentes da serraria, sendo que em boas condições de tráfego, é possível cada caminhão realizar de

2 a 3 viagens por dia (Tabela 2). De acordo com as informações do setor de planejamento da empresa em estudo, tem-se três cenários de possíveis demandas sendo 1.872, 2.392 e 2.912 toneladas de madeira por mês. Pretende-se definir nas condições apresentadas o planejamento para cada situação.

O modelo de otimização empregado teve como objetivo determinar o número ótimo de viagens, levando em consideração atender à demanda real da serraria, que possui flutuação em período mensal.

2.4 Modelo matemático do problema

2.4.1 Função objetivo

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{10} C_{ij} X_{ij}, \quad (11)$$

em que C_{ij} são os custos, em reais, associados ao deslocamento do caminhão i , fazenda j para a serraria ($\text{R}\$.t^{-1}.\text{km}^{-1}$). Esse custo é obtido multiplicando o custo produção por quilômetro de cada caminhão pela distância total (ida e volta) da serraria à fazenda.

2.4.2 Restrições

2.4.2.1 Restrição de horas disponíveis mensais de cada caminhão

$$\sum_{j=1}^{10} d_j X_{1j} \leq 176 \times GU_1, \quad (12.1)$$

$$\sum_{j=1}^{10} d_j X_{2j} \leq 176 \times GU_2, \quad (12.2)$$

$$\sum_{j=1}^{10} d_j X_{3j} \leq 176 \times GU_3, \quad (12.3)$$

em que d_{ij} é a distância, em km, de cada caminhão a fazenda j . A disponibilidade de tempo é em função do grau de utilização (GU).

2.4.2.2 Restrição de horas disponíveis mensais de cada caminhão

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i1} \leq 416, \quad (13.1)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i2} \leq 520, \quad (13.2)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i3} \leq 416, \quad (13.3)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i4} \leq 390, \quad (13.4)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i5} \leq 416, \quad (13.5)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i6} \leq 291,2, \quad (13.6)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i7} \leq 640, \quad (13.7)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i8} \leq 820, \quad (13.8)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i9} \leq 790, \quad (13.9)$$

$$\sum_{i=1}^3 cc_i X_{i10} \leq 650, \quad (13.10)$$

em que cc_i é a capacidade de carga (t) que cada caminhão pode carregar da fazenda j .

2.4.2.3 Restrição de horas disponíveis mensais de cada caminhão

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{10} cc_i X_{ij} \geq \text{Demanda da serraria}, \quad (14)$$

em que cc_i é a carga máxima de madeira que o caminhão i leva da fazenda j para a serraria. A demanda mínima da serraria nos cenários foram de 1.872, 2.392 e 2.912 toneladas.

2.4.2.4 Restrição de horas disponíveis mensais de cada caminhão

$$X_{ij} \in \mathbb{Z}^+, \quad (15)$$

em que X_{ij} são as variáveis associada aos caminhões i e fazendas j .

2.5 Método de solução

Os cenários propostos foram solucionados utilizando o software CPLEX com o algoritmo *Branch and bound*, tendo o computador a seguinte configuração: Intel Core™ i7-4790 - CPU 3.60 GHz, 32 GB DDR3 1600 MHz.

3 Resultados e discussão

3.1 Custos do transporte

Levando em consideração a situação real, na qual ambos os modelos de caminhão trabalham por um período de 8 horas diárias, procedeu-se os cálculos referentes aos custos operacionais, com o intuito de representar o custo real dos caminhões. Os valores obtidos pela pesquisa de mercado, que foram utilizados no cálculo do custo dos três diferentes modelos de caminhão, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores utilizados no cálculo do custo operacional dos caminhões avaliados

Itens	Caminhão	Caminhão	Caminhão
	A	B	C
Valor de aquisição (R\$)	280.000,00	220.000,00	270.000,00
Valor residual (R\$)	140.000,00	110.000,00	145.000,00
Vida útil (meses)	60	60	60
Taxa de juros anual (%)	12	12	12
Custo óleo diesel (R\$)	2,40	2,40	2,40
Consumo médio diesel por km (l/km)	0,9	1,9	1,5
Custo óleo motor (R\$)	15,00	15,00	15,00
Consumo médio óleo motor por km (l/km)	0,042	0,042	0,042
Quilometragem média por mês (km)	2.000	1.827,2	1.939

A tabela 4 contém em detalhes o custo fixo, variável e a composição do custo total dos três veículos em estudos. Aplicando-se a metodologia da FAO, segundo Machado e Malinovski (1988), obteve-se o custo operacional para os modelos Caminhão 1, Caminhão 2 e Caminhão 3 de 7,64 R\$.km⁻¹, 5,53 R\$.km⁻¹ e 6,20 R\$.km⁻¹, respectivamente.

Tabela 4 - Custo total dos veículos (R\$.mês⁻¹)

Componentes de Custo	Custo unitário (R\$)		
	Caminhão 1	Caminhão 2	Caminhão 3
Depreciação	1,16	1,03	1,07
Salários motoristas e encargos sociais	0,85	0,93	0,87
Licenciamento e seguro obrigatório	0,12	0,09	0,12
Remuneração de capital (CDB)	1,40	1,20	1,39
Custos Fixos	3,53	3,25	3,45
Combustível	2,67	1,26	1,60
Lubrificantes	0,53	0,25	0,32
Custos de pneus e acessórios	0,35	0,35	0,35
Lavagem e lubrificação	0,12	0,12	0,13
Custos Variáveis	3,67	1,98	2,40
Custos de Administração	0,42	0,31	0,35
Custo Total	7,64	5,53	6,20
Custo total (km.t⁻¹)	0,255	0,263	0,30

Os custos operacionais encontrados no estudo foram semelhantes aos encontrados por Alves (2011), para o Bitrem e Tritem, que foi de R\$ 6,22 por km, utilizando o mesmo modal de transporte rodoviário.

A distribuição dos custos para os Caminhões 1, 2 e 3 foi bem distinta. Os custos fixos corresponderam a 46,33%, 58,40% e 55,36% do custo total respectivamente, sendo a

remuneração de capital e a depreciação os custos que mais influenciaram dentre os custos fixos.

Pode-se verificar que o caminhão 1 apresenta valores maiores principalmente quanto ao custo de depreciação em relação aos outros caminhões, devido ao fato de o valor de aquisição deste ser mais elevado, o que fornece um valor depreciativo médio mensal mais elevado. Na aquisição de equipamentos deve ser levado em consideração o tempo para substituição do veículo e o valor residual de venda, pois isso interfere diretamente na depreciação e distribuição dos custos ao longo da vida útil estipulada.

Os custos variáveis corresponderam a 48,16%, 35,98% e 38,64% para os caminhões 1, 2 e 3, respectivamente, sendo o custo de combustível o componente mais relevante dos custos variáveis. Somente o combustível foi responsável por mais de 1/3 dos custos variáveis, essa análise leva em consideração alguns fatores: modelo, desempenho e capacidade do equipamento.

Porém, deve se atentar que durante a aquisição o consumo médio do produto e o preço de aquisição, por via, de acordo com a vida útil e diferenciação de custos de aquisição, passa a ser mais viável a compra de caminhões mais eficientes em relação a consumo em horizontes maiores de planejamento de vida útil do caminhão.

Os custos de administração para os caminhões foram semelhantes sendo 5,49%, 5,60% e 5,63% respectivamente 1, 2 e 3.

3.2 Minimização dos custos por meio da programação linear inteira

3.2.1 Cenário 1

Com a minimização do custo total por meio da programação inteira foi obtido um custo de R\$ 40.244,10 por mês para atender à demanda de 1.872 t.mês⁻¹ de madeira. Com relação aos caminhões utilizados, como esperado, foi observado que o mais empregado foi o que teve o menor custo de produção.

Tabela 5 - Variáveis selecionadas no cenário 1

Variável	Nº de viagem	Volume transportado (t)
X11	13	390
X12	17	510
X13	13	390
X14	13	390
X15	5	150
X21	1	21

em que: X11 = caminhão 1 seguindo para a fazenda 1; X12 = caminhão 1 seguindo para a fazenda 2; X13 = caminhão 1 seguindo para a fazenda 3; X14 = caminhão 1 seguindo para a fazenda 4; X15 = caminhão 1 seguindo para a fazenda 5 e X21 = caminhão 2 seguindo para a fazenda 1.

A restrição de demanda mensal da serraria foi atendida em 1.824 metros cúbicos. O caminhão A foi o mais utilizado em função da sua capacidade e custos, realizando 61 viagens. Nesse cenário, o caminhão B fez apenas uma viagem à fazenda 1.

Em relação à quantidade ofertada de cada fazenda para atender à restrição de demanda total, foi possível observar que a restrição foi cumprida, somente a fazenda 5 teve a demanda ofertada abaixo de 90%, ofertando apenas 36,06%.

3.2.2 Cenário 2

O custo de implementação do cenário 2 resultou em R\$ 90.868,13 por mês com demanda de 2.394 t.mês⁻¹. Os caminhões transportaram 2.250, 63 e 81 t, respectivamente, 1, 2 e 3 (Tabela 6).

Tabela 6 - Variáveis selecionadas no cenário 2

Variável	Nº de viagem	Volume transportado (t)
X11	12	360
X12	15	450
X13	13	390
X14	13	390
X15	13	390
X16	9	270
X22	2	42
X23	1	21
X31	2	54
X32	1	27

Para atendimento da demanda foram selecionadas as fazendas de 1 à 6 e os três caminhões foram utilizados. Diferente do cenário 1, é evidente que, em função da demanda, existe uma correlação com a utilização dos caminhões.

3.2.3 Cenário 3

Com a minimização do custo total por meio da programação linear inteira foi obtido um custo de R\$ 129.916,02 por mês para atender à demanda de 2.912 t.mês⁻¹ de madeira. Os caminhões transportaram 2.100, 84 e 729 toneladas, respectivamente, 1, 2 e 3 (tabela 7).

Tabela 7 - Variáveis selecionadas no cenário 3

Variável	Nº de viagem	Volume transportado (t)
X11	2	60
X12	4	120
X13	13	390
X14	13	390
X15	13	390
X16	9	270
X17	16	480
X22	1	21
X23	1	21
X25	1	21
X26	1	21
X31	13	351
X32	14	378

A distância rodada por cada caminhão (Tabela 8) teve variação distinta entre os cenários, à medida que caminhões mais custosos tendem a serem os mesmos utilizados na solução ótima.

Dessa forma, o modelo proposto foi capaz de suprir lacunas de escalonamento de caminhões, fazendo o transporte a cada destino de forma otimizada. Como resultado secundário, proporcionou a análise de fatores até então desconhecido no planejamento de transporte praticado que seria a análise de viabilidade do tomador de decisão da empresa florestal em poder analisar a viabilidade de aluguel de veículos e, ou, a adoção de outros transportes a fim de suprir o tempo parado desse equipamento.

Tabela 8 - Soma das distâncias nos cenários

Caminhão	Cenário (km)		
	1	2	3
1	3.012	4.318	5.128
2	80	122	250
3	-	106	974

O modelo empregado foi satisfatório ao determinar a quantidade de viagens que cada caminhão deverá fazer para a atender a demanda estabelecida. No processo de modelagem é crucial a entrada de informações condizentes com a realidade. Desse modo, o estudo referente aos custos foi essencial para garantir a coerência e aplicabilidade do modelo na rotina da empresa.

Uma vez que ocorra a modificação de alguma variável, o surgimento de uma nova restrição e, ou, demanda no processo de modelagem, é necessária a reestruturação do modelo. O modelo proposto, pode ser utilizado na empresa como ferramenta de tomada de decisão, resultando em ganhos positivos no planejamento de transporte.

Conclusão

O modelo proposto atendeu aos objetivos de otimizar a frota de caminhões no transporte de madeira das fazendas, visando atender à demanda da serraria, com o menor custo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelas bolsas e investimentos. Agradecer o Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo pelos investimentos. Os autores também agradecem aos revisores e editores pelos comentários e sugestões.

LACHINI, E.; FIEDLER, N. C.; SILVA, E. F.; VIEIRA, G. C.; SOUZA, L. A.; CARMO, F. C. A. Operations research in minimization of costs of forest transportation. *Rev. Bras. Biom. Lavras*, v.36, n.2, p.473-488, 2018.

- **ABSTRACT:** *This study aimed to minimize the costs of wood transportation of a forestry company by using integer linear programming. For this, we performed a detailed study about the routine of each truck by collecting information during 5 months (May to September of 2014). The proposed model in this study aimed to minimize the cost, determining the number of trips of each truck at each farm, in order to meet the company's demand, based on information regarding at optimum load per vehicle, travel time from the farm to the industry, working days, total volume of transported wood, daily average of transported wood to the industry courtyard, average trips per day, average daily mileage, fuel consumed per day and average consumption. Were also inserted in the modeling the fixed and variable costs. The model presented satisfactory performance and consistent with the expected, in which the truck with lower production cost was the most used, with greater participation in the solution in the 3 scenarios. The proposed model has met the objectives of the work, optimizing the fleet of trucks in wood transportation from the farms to meet the demand of the factory at the lowest cost.*
- **KEYWORDS:** *Economic analysis; optimization of forest transport; forest planning; reduction of costs; mathematical models.*

Referências

ALVES, R. T. *Análise técnica e de custos do transporte florestal rodoviário*. 2011. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011. Disponível em: <<http://cienciasflorestaisufes.webnode.com.br/products/analise-tecnica-e-de-custos-do-transporte-florestal-rodoviario/>>. Acesso em: 25 set. 2016.

ALVES, R. T. *et al.* Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. *Revista Árvore*, Viçosa, v.37, n.5, p.897-904, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. *Standards 2001: machinery, equipment, and buildings: operating costs*. Ames, Iowa, USA, 2001. p. 164 - 226.

BERGER, R. *et al.* Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da programação linear. *Floresta*. v.33, n.1, p.53-62, 2003.

BURLA, E. R. *Avaliação técnica e econômica do “harvester” na colheita do eucalipto*. 2008. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. Disponível em: < <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3517> >. Acesso em: 25 set. 2016.

BURLA, E. R. *Mecanização de atividades silviculturais em relevo ondulado*. Belo Oriente: Cenibra, 2001. 144 p.

FONTES, J. M.; MACHADO, C. C. Manutenção mecânica. In: MACHADO, C. C. (Ed.). *Colheita Florestal*. 3.ed. Viçosa: Editora da UFV, 2014. p. 288 - 335.

GRACIA, C.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; ESTORNELL, J. An application of the vehicle routing problem to biomass transportation. *Biosystems Engineering*, v.124, p.40-52, 2014.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à pesquisa operacional*. 8.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. p. 828.

KAZIAN, C. *et al.* Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization. *Biomass and Bioenergy*, v.58, p.294-302, 2013.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S.; BIRRO, M. H. *Elementos básicos do Transporte Florestal Rodoviário*. 2.ed. Viçosa: Editora da UFV, 2009. 167 p.

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. *Ciência do trabalho florestal*. Viçosa: UFV, 1988. 65 p.

SILVA, M. L. *et al.* Custos. In: MACHADO, C. C. *Colheita Florestal*. 3.ed. Viçosa: Editora da UFV, 2014. p. 253-287.

ZHANG, F.; JOHNSON, D. M.; WANG, J. Integrating multimodal transport into forest-delivered biofuel supply chain design. *Renewable Energy*, v. 93, p. 58-67, 2016.

Recebido em 26.10.2016

Aprovado após revisão em 28.08.2017