

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

**PLANEJAMENTO DA COLHEITA DE MADEIRA EM
REGIÃO MONTANHOSA COM USO DE
MODELAGEM ESPACIAL E PROGRAMAÇÃO
LINEAR INTEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ALYNNE RUDEK

IRATI-PR

2015

ALYNNE RUDEK

**PLANEJAMENTO DE COLHEITA DE MADEIRA EM REGIÃO MONTANHOSA
COM USO DE MODELAGEM ESPACIAL E PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador

Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho

Coorientador

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes

Orientador

IRATI-PR

2015

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

- R915 RUDEK, Alynne.
Planejamento da colheita de madeira em região montanhosa com uso de modelagem espacial e programação linear inteira -- Irati, PR : [s.n], 2015. 91f.
- Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho
Coorientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce
Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Paraná.
1. Engenharia Florestal – dissertação. 2. Colheita florestal. 3. Cabos aéreos.
I. Lopes, Eduardo da Silva. II. Oliveira Filho, Paulo Costa de. III. Arce, Julio Eduardo. IV. UNICENTRO. V. Título.

CDD 20 ed. 634.98

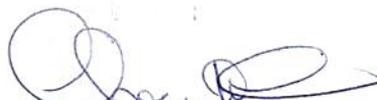
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PARECER

Defesa Nº 70

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, após arguir a mestranda **Alyne Rudek** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "PLANEJAMENTO DA COLHEITA DE MADEIRA EM REGIÃO MONTANHOSA COM USO DE MODELAGEM ESPACIAL E PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA", é de parecer favorável à APROVAÇÃO da estudante, habilitando-a ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

Irati-PR, 09 de setembro de 2014.



Dr.ª *Christel Lingnau*
Universidade Federal do Paraná
Primeira Examinadora



Dr. *Renato Cesar Gonçalves Robert*
Universidade Federal do Paraná
Segundo Examinador



Dr. *Eduardo da Silva Lopes*
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Aos meus pais, Davi Rudek e
Nadia L. Rudek.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Centro-Oeste, ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de cursar o mestrado;

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Professor Eduardo da Silva Lopes, pela orientação, apoio e confiança depositados para a realização deste trabalho;

Aos Professores Julio Eduardo Arce e Paulo Costa de Oliveira Filho, por aceitarem coorientar a realização deste trabalho e pelos ensinamentos transmitidos;

À todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais;

Ao Professor Atílio Antonio Disperatti (*In memoriam*), por todos os ensinamentos transmitidos, e pela sua contribuição na minha formação profissional e pessoal;

À empresa Berneck S. A., pela oportunidade de estar realizando este trabalho em suas áreas, em especial ao Sr. Afonso Mehl e o Sr. Geremias Antonio Perreto;

Ao companheiro Carlos Henrique Drinko, que auxiliou nas coletas de dados em campo;

Aos amigos do Laboratório de Colheita Florestal Saulo, Diego, Millana e Oscar, pela amizade, companheirismo e as conversas acompanhadas pelos cafés da tarde no R.U. da universidade;

Aos amigos Clewerson, Carla, Natasha e Pedro, meus sinceros agradecimentos;

À minha família, em especial aos meus pais Davi Rudek e Nadia L. Rudek, e ao meu irmão Emanuel Rudek, que sempre me deram apoio ao longo da realização deste trabalho;

Às amigas de república Vanessa, Priscila, Tânia e Juliana pelos momentos de descontração e amizade.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, agradeço.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO GERAL.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Setor Florestal Brasileiro	4
3.2. Colheita de madeira	5
3.2.1 Métodos de colheita de madeira	5
3.2.2 Sistemas de colheita de madeira	6
3.2.3 Mecanização da colheita de madeira	8
3.2.4 Colheita de madeira em região montanhosa.....	9
3.2.5. Extração florestal.....	10
3.2.6. Extração com sistema de cabos aéreos	10
3.3. Planejamento florestal	12
3.3.1 Planejamento aplicado à colheita de madeira.....	13
3.3.2 Métodos científicos de planejamento	14
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
4.1. Caracterização da área de estudo.....	20
4.2. Sistemas de colheita de madeira utilizados na empresa	21
4.3. Caracterização da operação com o sistema de cabos aéreos	23
4.4. Coleta de dados.....	28
4.4.1. Estudo de tempos e movimentos do sistema de cabos aéreos	28
4.4.2. Processamento da imagem de satélite	31
4.5. Preparação dos dados da área de estudo	34
4.5.1. Estratificação das áreas de colheita	34
4.5.2. Definição das áreas a serem colhidas com o sistema de cabos aéreos	35
4.5.3. Definição dos potenciais pontos de instalação do sistema de cabos aéreos	37
4.6. Alocação do sistema de cabos aéreos.....	39
4.6.1. Desenvolvimento dos modelos para instalação do sistema de cabos aéreos	39
4.6.2. Modelagem Espacial	43

4.6.3. Fluxograma dos procedimentos metodológicos	43
4.7. Análises Estatísticas	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1. Aplicações do SIG no planejamento da colheita florestal	46
5.1.1. Delimitação das áreas florestais	46
5.1.2. Determinação das declividades	50
5.1.3. Determinação das áreas de colheita de madeira	52
5.2. Estimativa do volume, número horas-máquina e produtividade da colheita de madeira	59
5.3. Determinação dos pontos de instalação do sistema de cabos aéreos	63
6. CONCLUSÕES	78
7. RECOMENDAÇÕES.....	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
9. ANEXOS.....	86

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SIG	Sistemas de Informações Geográficas
PO	Pesquisa Operacional
Cfa	Clima temperado úmido com verão quente
° C	Graus Celsius
ha	Hectare
cm	Centímetro
m	Metro
GPS	Sistema de Posicionamento Global (do inglês Global Positioning System, GPS)
Nm	Nanômetro
%	Percentual
DE	Distância de extração
DV	Deslocamento Vazio
EG	Engate
AR	Arraste
DC	Deslocamento Carregado
DG	Desengate
IN	Interrupções
PLI	Programação Linear Inteira
Syx	Erro padrão da estimativa absoluto
Syx %	Erro padrão da estimativa em percentagem
R ²	Coefficiente de determinação
R ² aj	Coefficiente de determinação ajustado
CV %	Coefficiente de variação
n	Número de repetições
m ³	Metro cúbico
i	Célula real
j	Localização da torre

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de colheita de madeira utilizando Cabos Aéreos. Fonte: Thuringian Ministry for Agriculture, Forestry, Environment and Nature Conservation TMLFUN. 2008.	12
Figura 2. Localização da área de estudos.	20
Figura 3. Sistema de colheita de madeira de toras curtas: (a) <i>harvester</i> ; (b). <i>forwarder</i>	21
Figura 4. Sistema de colheita de madeira de árvores inteiras: (a) motosserra; (b) cabo aéreo.	22
Figura 5. Sistema de colheita de madeira de árvores inteiras: (a) Motosserra; (b) Guincho arrastador.	22
Figura 6. Veículo e torre principal do sistema de cabos aéreos montado na estrada florestal.	27
Figura 7. Medidor de distância utilizado para mensurar distâncias ao longo das faixas de extração.....	29
Figura 8. GPS Leica SR20 utilizados na coleta de pontos de controle planialtimétrico. Fonte: Leica.	32
Figura 9. Isolinhas de nível com equidistância de 10 metros	33
Figura 10. Carta imagem ilustra a malha de pontos criados sobre a área de estudo.	36
Figura 11. Carta imagem representa os potenciais pontos para instalação do sistema de cabos aéreos em um trecho de estrada na área de estudo.....	38
Figura 12. GPS Leica GS15. Fonte: Leica.	39
Figura 13. Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados no estudo.....	44
Figura 14. Mapa de uso da terra da área de estudos com suas respectivas classes de uso e ocupação da terra.	47
Figura 15. Distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo da área de estudo.	48
Figura 16. Carta imagem demarcando a área de estudo selecionada e delineada através do programa ArcGIS 10.1, para a realização do estudo do planejamento da colheita florestal.	49
Figura 17. Carta imagem apresenta as classes de declividade observadas na área de estudo. .	51
Figura 18. Carta imagem representando o macroplanejamento de colheita florestal em áreas declivosas com três sistemas de colheita de madeira utilizados pela empresa.....	53
Figura 19. Carta imagem mostrando a estratificação das áreas de colheita de madeira com o sistema de cabos aéreos nas diferentes classes de distância de extração.....	56
Figura 20. Carta imagem de classes de declividade	62
Figura 21. Resultado do cenário simulado pelo <i>software</i> LINGO e apresentado no <i>software</i> Excel.....	64
Figura 22. Ilustração dos resultados encontrados para o cenário que visa à minimização do tempo de extração de madeira utilizando o sistema de cabos aéreos.	65
Figura 23. Setorização da área a ser colhida utilizando cabos aéreos, em função das posições a serem ocupadas pelas torres, determinadas pelo modelo que visa minimizar o tempo de extração.....	66
Figura 24. Comportamento da produtividade nas diferentes classes de declividade e distância de extração, para o cenário de minimização do tempo de ciclo operacional para a operação de colheita de madeira utilizando cabos aéreos.	69
Figura 25. Ilustração dos resultados encontrados para o cenário que visa à minimização da distância de extração de madeira utilizando o sistema de cabos aéreos.....	71
Figura 26. Setorização da área a ser colhida utilizando cabos aéreos, em função das posições a serem ocupadas pelas torres, determinadas pelo modelo que visa minimizar a distância de extração.....	72
Figura 27. Vista lateral do bloco onde foi realizado o teste do modelo para alocação de torres. A seta em vermelho representa o sentido de extração da madeira, em direção à torre.	74

Figura 28. Comportamento da produtividade nas diferentes classes de declividade e distância de extração, para o cenário de minimização da distância de extração para a operação de colheita de madeira utilizando cabos aéreos.....76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do povoamento florestal da Fazenda Alecrinzal.	21
Tabela 2. Especificações técnicas das máquinas utilizadas na colheita de madeira.....	23
Tabela 3. Especificações da imagem WorldView-2.....	31
Tabela 4. Quantificação da área de estudo nas diferentes classes de declividade.....	52
Tabela 5. Quantificação das áreas a serem colhidas com os diferentes sistemas de colheita de madeira.....	54
Tabela 6. Quantificação das áreas de colheita de madeira com o sistema de cabos aéreos nas diferentes classes de distância de extração.	57
Tabela 7. Avaliação dos diferentes sistemas de colheita utilizados pela empresa.....	59
Tabela 8. Avaliação do sistema de cabos aéreos em diferentes classes de distância.	60
Tabela 9. Avaliação da produtividade em diferentes classes de declividade.	61
Tabela 10. Resultado parcial para o cenário de minimização do tempo de ciclo.....	68
Tabela 11. Resultado parcial para o cenário de minimização da distância de extração.	75

RESUMO

Alynn Rudek. **Planejamento de colheita de madeira em região montanhosa com uso de modelagem espacial e programação linear inteira.**

Tendo em vista as dificuldades encontradas na realização da colheita florestal em áreas montanhosas, o presente trabalho tem por objetivo definir o planejamento da colheita de madeira em região montanhosa utilizando Programação Linear Inteira (PLI) e Modelagem Espacial. A partir de dados coletados em campo referente à operação de colheita de madeira com o sistema de cabos aéreos, foi desenvolvido um modelo matemático para predição da alocação de torres para colheita com cabos aéreos, o qual contemplou as variáveis, produtividade do sistema, distância de extração, volume de madeira por célula (100 m²), declividade do terreno e tempo de ciclo operacional. Com esse modelo foi possível simular a alocação das torres em diferentes condições e, por conseguinte, o desempenho do sistema de cabos aéreos considerando diferentes variáveis de influência sobre o sistema, o que permite a tomada de decisões mais assertivas sobre a alocação das torres e o planejamento do sistema. O presente trabalho foi realizado nas áreas operacionais da colheita florestal, pertencente à empresa Berneck. Foi realizado o mapeamento das classes de declividade existentes na área de estudos, e utilizando a declividade como critério para definição dos sistemas mais adequados para a extração de madeira foram definidas as áreas a serem colhidas utilizando os diferentes sistemas de colheita empregados pela empresa. Foram utilizados como ferramentas para o planejamento da colheita florestal a Pesquisa Operacional e Sistemas de Informações Geográficas. Os resultados mostraram que grande porção da área estudada apresentou declividades elevadas, pertencentes às classes de 15 a 20° e 21 a 30°, correspondendo a 28,51% e 54,85% da área total, respectivamente, sendo então realizada a colheita de madeira nestas áreas com uso do sistema de cabos aéreos. O cabo aéreo representou 91,01 % das áreas a serem colhidas. A classe de distância de extração equivalente a 200 m representou 57,43% da área total a ser colhida com o uso do sistema de cabos aéreos, seguido pela distância de 201 a 400 m com 26,86% da área total, enquanto as demais áreas situaram-se nas classes com valores superiores a 400 m. Para o cenário de minimização do somatório das distâncias de extração, o modelo estimou a produtividade do sistema em diferentes condições de declividade e distância de extração. Foi verificado que a produtividade do sistema variou entre 21,0 m³ h⁻¹ e 18,0 m³ h⁻¹, nas classes de distância de 50 m e 150 m, respectivamente. Para o intervalo de declividade igual a 7° e 45°, a produtividade teve variação entre 21,0 m³ h⁻¹ e 17,27 m³ h⁻¹ respectivamente, para o mesmo cenário. Enquanto no cenário para minimização do tempo de ciclo operacional a produtividade do sistema variou entre 21,68 m³ h⁻¹ e 16,0 m³ h⁻¹, no intervalo de distância igual a 100 m e 200 m, respectivamente. Ao variar a declividade entre 5° e 20°, a produtividade teve variação entre 20,57 m³ h⁻¹ e 18,86 m³ h⁻¹ respectivamente. Os resultados mostraram que a variável “Tempo de Ciclo” afeta na definição dos pontos de alocação de torres, resultando em menor número de posições a serem ocupadas pela torre e consequentemente maior área de extração por torre; a variável “Distância de Extração” afeta na definição dos pontos de alocação, resultando na seleção de maior número de locais para instalação das torres, distâncias de extração mais curtas e maior movimentação das torres. O modelo para alocação de torres é eficiente, porém precisa ser aperfeiçoado a fim de garantir maior precisão nos casos em que a extração é realizada a longas distâncias. Estas informações auxiliam na tomada de decisão na etapa de planejamento da operação de colheita com cabos aéreos.

Palavras-Chave: Cabos aéreos; colheita florestal; otimização; modelagem espacial.

ABSTRACT

Alyne Rudek. **Planning of timber harvesting in mountainous region using spatial modeling and integer linear programming.**

Given the difficulties encountered in the realization of forest harvesting in mountainous areas, this paper aims to define the planning of timber harvesting in mountainous region with the support of computational tools. From the collected data relating to the extraction and processing of timber operations using cable logging, a mathematical model was developed to predicting the allocation of towers to harvest using cable logging, which included the variables system productivity, distance extraction, timber volume per cell (100 m²), land slope and time operating cycle. With this model it was possible to simulate the allocation of the towers under different conditions, and therefore, the system performance considering different variables influence on the system, which allows taking more assertive decisions about the allocation of the towers and system planning. This work was performed in the operational areas of forest harvesting, belonging to the company Berneck. Using ArcGIS tools mapping of existing classes of slope was conducted in the study area, and using the slope as a criterion for determining the most appropriate systems for logging, areas were defined to be harvested using different extraction systems applied by the company. Were used as tools for planning of forest harvest Operations Research and Geographical Information Systems. The results showed that a large portion of the study area showed high slopes, belonging classes 15° to 20° and 21° to 30°, corresponding to 28,51% and 54,85% of the total area, respectively, then being performed in these areas wood harvesting system using cable logging. The cable logging represented 91,01% of the areas to be harvested using this system. The class of distance equivalent to 200 m extraction accounted for 57,43% of the total area to be harvested with the cable logging system, followed by the distance 201-400 m with 26,86% of the total area, while other areas were found in classes with values greater than 400 m. For the scenario of minimizing the sum of the distances of extraction, the model estimated the productivity of the system under different slope and distance extraction conditions. It was found that the productivity of the system ranged between 21,0 m³ h⁻¹ and 18,0 m³ h⁻¹ in the distance classes of 50 m and 150 m, respectively. For the range of slope equal to 7° and 45°, the productivity ranged between 21,0 m³ h⁻¹ and 17,27 m³ h⁻¹ respectively, for the same scenario. As the scenario for minimizing the cycle time operating the system productivity ranged from 21,68 m³ h⁻¹ 16,0 m³ h⁻¹, in the range of distance equal to 100 m and 200 m, respectively. By varying the slope between 5° and 20°, the productivity ranged between 20,57 m³ h⁻¹ and 18,86 m³ h⁻¹ respectively. The results showed that the variable "Cycle Time" affects the definition of the points allocation towers, resulting in fewer positions to be occupied by the tower and consequently larger area of extraction tower; the variable "Distance Extraction" affects the definition of the points allocation tower, resulting in the selection of more locations for installation of the towers, thus resulting in greater movement of the towers. The model developed for allocation of towers is efficient, but needs to be improved to ensure greater precision in cases where the extraction is performed over long distances. This information helps in decision making in the planning stage of the harvesting operation with cable logging.

Keywords: Cable logging; forest harvesting; optimization; spatial modeling.

1. INTRODUÇÃO

No setor florestal, a colheita de madeira é considerada a etapa mais importante do ponto de vista econômico, chegando a representar 50% ou mais dos custos totais da madeira posta na indústria (MACHADO, 2014), além de ser influenciada por diversos fatores técnicos, econômicos, ambientais e sociais que interferem diretamente na forma de execução das operações (LOPES, 2001).

A colheita de madeira quando realizada em regiões montanhosas, torna-se ainda mais complexa, devido aos elevados custos operacionais e de produção, bem como a exigência de máquinas e equipamentos específicos para operação nestas condições (MINETTE, 1988).

As condições apresentadas na colheita de madeira de regiões declivosas resultam em maior grau de periculosidade, exigindo maior atenção e cuidado dos colaboradores. Em padrões adequados de segurança e ergonomia para atender aos requisitos legais e dos órgãos certificadores, há a necessidade da promoção de medidas por parte da empresa, que proporcionem maior segurança aos trabalhadores, reduzindo o risco de acidentes, que em determinadas situações, na área florestal, podem trazer consequências de origem fatal.

As alternativas técnicas para colheita em regiões declivosas e a segurança dos trabalhadores têm sido estudados e utilizados como uma forma de viabilizem a colheita de madeira com custos competitivos, com padrões adequados de segurança e ergonomia para atender aos requisitos legais e dos órgãos certificadores (CASTILHO *et al.*, 2014). O uso de equipamentos, como os sistemas de cabos aéreos, para operações extremas apresenta-se como uma alternativa promissora para a colheita. Isso se dá em função destes equipamentos combinarem capacidade técnica em desempenhar sua função a custos de manutenção compatíveis ao mercado mundial e a interferência no meio ambiente (ROBERT, 2013; PENNA, 2009).

Das etapas de colheita de madeira é importante destacar a de extração, que consiste na remoção da madeira do interior do talhão para a margem da estrada ou pátio intermediário. É uma etapa de grande complexidade e influenciada por diversos fatores que afetam a produtividade e os custos de produção, podendo citar: condições do povoamento, relevo, distância de extração, características das máquinas, dentre outros (MALINOVSKI *et al.*, 2006).

E quando a extração de madeira é realizada em região montanhosa, torna-se ainda mais complexa, devido à grande dificuldade de execução da operação nestas condições, da baixa oferta de equipamentos disponíveis no mercado, dos elevados riscos de acidentes aos trabalhadores e dos elevados custos operacionais, exigindo, portanto, um planejamento eficiente para racionalização e otimização das operações.

Entretanto, atualmente, o planejamento das operações de colheita de madeira em regiões montanhosas tem sido executado pelas empresas florestais brasileiras de forma muito empírica e sem detalhamento de informações, sendo, muitas vezes utilizada apenas a experiência de profissionais na tomada de decisões, podendo acarretar em erros, perda de eficiência e elevados custos de produção.

Por isso o uso de ferramentas de apoio ao planejamento da colheita de madeira, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), a Pesquisa Operacional são de grande importância para a obtenção de maior eficiência das operações, aumento de produtividade e redução de custos de produção (MACHADO e LOPES, 2008; LOPES, 2001).

No caso da extração de madeira com o sistema de cabos aéreos, o conhecimento prévio por parte do planejador das especificidades das áreas de colheita, dos locais adequados para instalação do equipamento, da sequência ótima de execução, do melhor *layout* dos pátios e estradas, etc., são alguns benefícios que podem ser obtidos com uso das ferramentas computacionais no apoio ao planejamento das operações, possibilitando a maximização da produtividade, minimização dos custos de produção e execução das operações de forma ambientalmente correta.

2. OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem por objetivo definir o planejamento da colheita de madeira em região montanhosa com auxílio de modelagem espacial e otimização, subsidiando o aumento da eficiência operacional e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

Especificamente, objetivou-se:

- a) Definir a alocação ótima dos sistemas de colheita de madeira em diferentes classes de declividade e distância de extração;
- b) Estimar área, volume, número horas-máquina e produtividade do sistema de cabos aéreos nas diferentes classes de declividade e distância de extração;
- c) Definir os pontos ótimos de instalação do sistema de cabos aéreos em diferentes cenários para obtenção da sequência ótima de extração, maior cobertura e minimização de mudanças do equipamento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Setor Florestal Brasileiro

A formação de povoamentos florestais com fins econômicos no Brasil teve início no ano de 1904, com a introdução do gênero *Eucalyptus* pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro, por meio de trabalhos do Engenheiro Edmundo Navarro de Andrade, com a finalidade de obter matéria-prima destinada à produção de dormentes, postes e lenha para as locomotivas (MARTINI, 2004).

Segundo Machado (2014), até o final da década de 1960, o setor florestal era pouco expressivo dentro da economia nacional. Entretanto, com a criação da política governamental de incentivos fiscais, buscando diminuir a exploração indiscriminada dos recursos florestais naturais e a implantação de florestas de rápido crescimento, houve um grande impulso e desenvolvimento do setor florestal.

Ao final dos incentivos fiscais que ocorreu no ano de 1988, o setor florestal continuou a se desenvolver por meio das grandes empresas, que ampliaram as suas áreas reflorestadas com recursos próprios, tomando empréstimos ou incentivando o reflorestamento em pequenas e médias propriedades rurais (ANTONANGELO e BACHA, 1998; LEÃO, 2000) *apud* (SOARES *et al.*, 2014).

Atualmente, com a crescente demanda por produtos de base florestal, o setor encontra-se em pleno crescimento, contribuindo para o desenvolvimento do país em vários aspectos: econômico, social e ambiental.

Segundo a Associação Brasileira de Florestas Plantadas - ABRAF, no ano de 2012 a área de plantios de *Eucalyptus* e *Pinus* atingiu 6,66 milhões de hectares, representando um crescimento de 2,2 % em relação ao ano de 2011; enquanto o Valor Bruto da Produção Florestal aumentou significativamente em relação ao ano anterior, atingindo 56,3 bilhões de reais (0,5% da arrecadação nacional). No âmbito social as atividades da cadeia produtiva do setor contribuíram para a geração de 4,4 milhões de empregos, enquanto nos aspectos ambientais o setor contribuiu para a conservação das florestas nativas, manutenção dos regimes hídricos, fertilidade do solo e qualidade do ar e da água (ABRAF, 2013).

3.2 Colheita de madeira

A colheita de madeira é definida como um conjunto de operações realizadas no interior do povoamento florestal, objetivando preparar e extrair a madeira até as áreas de pátios, locais de transporte ou de utilização final, utilizando-se de técnicas e padrões previamente estabelecidos, com a finalidade de transformá-la em produto final (MACHADO, 2014; SILVA, 2003).

Para Arce *et al.* (2004), a colheita de madeira representa a operação final de um ciclo de produção florestal, onde são obtidos os produtos mais valiosos, constituindo um dos fatores que determinam a rentabilidade florestal.

Segundo Machado (2008), a colheita florestal representa, aproximadamente, 50% dos custos totais da madeira posto fábrica, sendo do ponto de vista econômico, a etapa mais importante do processo e de maior impacto na definição dos custos finais da matéria-prima. Além disso, é influenciada por diversos fatores, podendo ser eles técnicos, ambientais, ergonômicos e/ou sociais e que interferem diretamente na execução das operações (LOPES, 2001).

Segundo Malinovski (2007), as operações da colheita de madeira podem ser subdivididas em duas etapas básicas: corte e extração, sendo que o corte refere-se às operações de derrubada, desgalhamento, traçamento e empilhamento; já a extração da madeira refere-se à remoção da madeira da área de corte até a margem da estrada (estaleiro) ou pátio intermediários, podendo ser realizada na forma de baldeio, arraste, aéreo ou transporte direto.

3.2.1 Métodos de colheita de madeira

Existem vários métodos de colheita da madeira, variando segundo a espécie florestal, a idade do povoamento, o espaçamento de plantio, o volume individual das árvores, o manejo adotado, o destino final da madeira, as condições gerais da área trabalhada, etc., sendo que para cada grupo de fatores condicionantes haverá um método de colheita de madeira mais indicado (SILVA *et al.*, 2003).

Segundo Simões (2008), a escolha do método de colheita da madeira deve considerar ainda variáveis como: disponibilidade de mão-de-obra, espécie florestal, idade do povoamento, produto final, recursos financeiros disponíveis, características do relevo, etc.

Machado (2014) diz que a colheita de madeira pode ser classificada conforme o método de execução em: manual, semimecanizado e mecanizado.

a) Método manual: Trata-se de um método rudimentar, onde são utilizadas ferramentas simples como o machado ou as serras manuais (traçador e serra de arco) e auxílio de tração animal, aplicado em pequenas propriedades rurais. As vantagens são baixo custo de aquisição e manutenção dos equipamentos, porém apresenta elevado esforço físico e periculosidade, mão-de-obra com baixa qualificação e baixa produtividade (LOPES, 2011).

b) Método semimecanizado: Trata-se de um método que utiliza a motosserra para realização das etapas de derrubada, desgalhamento, destopamento e traçamento da madeira. As principais vantagens são o baixo custo de aquisição da máquina, atuação em qualquer condição topográfica e alta produtividade comparado ao método manual. As desvantagens são o elevado nível de ruído, esforço físico, riscos de acidentes e baixa produtividade em relação aos métodos mecanizados.

c) Método mecanizado: Trata-se de um método utilizado nas médias e grandes empresas florestais, possibilitando o aumento da produtividade e a eficiência operacional (SIMÕES, 2008). Possui como vantagem o aumento da qualidade, a racionalização das operações com melhores condições de segurança e saúde aos trabalhadores, maior produtividade e otimização dos custos de produção, garantindo o abastecimento das indústrias (FREITAS, 2005). As principais desvantagens referem-se ao elevado investimento inicial e exigência de boa estrutura de manutenção (SANT'ANNA, 2008).

3.2.2 Sistema de colheita de madeira

O sistema de colheita da madeira pode ser definido como toda a cadeia de produção, ou seja, todas as atividades parciais, desde a derrubada até a madeira posta no pátio das indústrias consumidoras (Malinovski, 1999). Robert e Andreatta (2012) definem sistemas de colheita como um conjunto de atividades parciais que interagem para o desempenho de uma função.

Machado (2014) afirma que o sistema de colheita de madeira compreende um conjunto de elementos e processos que envolvem a cadeia de produção e todas as atividades parciais, desde a derrubada até a madeira que abastece o pátio da indústria de transformação. Segundo o mesmo autor, os sistemas de colheita podem variar de acordo com diversos

fatores, como topografia do terreno, rendimento volumétrico do povoamento, tipo de floresta, uso final da madeira, máquinas, equipamentos e recursos disponíveis, tratamentos silviculturais, clima, tipo de solo, sortimento, disponibilidade de mão-de-obra e outros.

De acordo com a classificação da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) *apud* Machado (2014), os sistemas de colheita podem ser classificados quanto à forma da madeira na fase de extração, ao local onde é realizado o processamento final e ao grau de mecanização. Quanto à forma da madeira, são classificados em: sistemas de toras curtas (*cut to length*), sistema de fustes (*tree-length*), sistema de árvores inteiras (*full-tree*), cavaqueamento (*chipping*) e sistema de árvores completas (*whole-tree*).

Entretanto, os principais sistemas de colheita de madeira utilizados no Brasil são:

a) Sistemas de toras curtas (*cut to length*): Neste sistema a árvore é derrubada e processada no interior do talhão, sendo a madeira transportada para a margem da estrada ou pátio intermediário em forma de toras com um a seis metros de comprimento. As principais vantagens deste sistema são a adequação em desbastes, o baixo impacto ambiental em relação aos solos, a menor exportação de nutrientes e maior facilidade no manuseio da madeira. Entretanto apresenta elevado custo devido ao manuseio excessivo da madeira, restrições em locais com declive acentuado e inadequado quando do aproveitamento da biomassa residual da colheita para fins energéticos. (MALINOVSKI, 1999; MACHADO, 2014).

b) Sistema de toras longas ou fuste (*tree-length*): Neste sistema a árvore é semiprocessada (derrubada, desgalhada e destopada) no interior do talhão, sendo em seguida o fuste arrastado para a margem da estrada ou pátio intermediário, onde ocorre o traçamento da madeira na forma de toras (MALINOVSKI *et al.*, 2008). Apresenta como vantagens uma maior eficiência em árvores de maior volume e maior produtividade devido ao menor manuseio da madeira, com redução dos custos de produção. É o sistema mais utilizado em locais acidentados. Entretanto, as desvantagens referem-se aos maiores danos ao meio ambiente, em termos de compactação e a maior necessidade de planejamento, organização e controle das operações, evitando pontos de estrangulamento (ROBERT e ANDREATA, 2012).

c) Sistema de árvores inteiras (*full-tree*): Neste sistema, a árvore é apenas derrubada no interior do talhão, sendo em seguida removida para a margem do talhão ou pátio intermediário, onde são realizadas as operações subsequentes de desgalhamento, destopamento, traçamento e empilhamento da madeira.

A grande vantagem deste sistema consiste na concentração e facilidade no aproveitamento da biomassa residual da colheita de madeira na margem da estrada (ROBERT e ANDREATA, 2012), facilidade de operação em áreas de maior declividade, maior produtividade e menor custo de produção. Entretanto, acarreta maiores danos ambientais em termos de compactação do solo.

3.2.3 Mecanização da colheita de madeira

A colheita de madeira no Brasil era muito incipiente, sendo que até a década de 1940 poucas empresas utilizavam a mecanização em suas operações e com grande dependência de equipamentos adaptados dos setores agrícola e industrial. Nesse período, os sistemas manuais e semimecanizados foram amplamente usados por falta de alternativas, empregando grande contingente de mão-de-obra, tornando as operações onerosas e com alto risco de acidente (MACHADO, 2014).

A modernização das operações de colheita de madeira teve início na década de 1970, quando a indústria nacional começou a produzir maquinários de porte leve e médio, surgindo as motosserras profissionais, os tratores agrícolas equipados com pinça hidráulica traseira ou *mini skidder*, os *skidders* e os autocarregáveis. Na década de 1980 vieram os *feller-bunchers* de tesoura e de sabre, montados em triciclos e a grade desgalhadora.

A mecanização dos processos de colheita de madeira intensificou-se de forma significativa a partir do início da década de 1990, com a abertura do mercado brasileiro à importação de máquinas e equipamentos de países com maior tradição (BRAMUCCI, 2001). Os principais motivos foram o aumento da demanda por produtos florestais, a necessidade de maior rendimento das operações e diminuição dos custos de produção, a escassez da mão-de-obra, a necessidade de executar o trabalho de forma mais ergonômica e o aumento dos custos sociais.

A evolução da mecanização representa o desenvolvimento de máquinas com design ergonômico; motosserras mais leves e com menos vibração e ruído; máquinas com cabeçote de corte e acumulador (*feller-buncher*), que permitem fazer feixes para o arrastes; e máquinas com cabeçote de corte, acumulador e processador (*harvester*), que deixam a madeira pronta para o carregamento (MACHADO, 2014).

Desde então, esse processo vem se mostrando irreversível no Brasil, principalmente em função da redução da dependência de mão de obra, melhoria das condições de trabalho,

redução do custo final da madeira posto fábrica e da necessidade, por parte das indústrias, de um fornecimento regular e em quantidades cada vez maiores de madeira (BRAMUCCI, 2001).

3.2.4 Colheita de madeira em região montanhosa

Apesar da importância do aumento crescente da mecanização da colheita de madeira em terrenos acidentados, poucos são os trabalhos científicos e relatos de experiências realizadas no Brasil (MALINOVSKI *et al.*, 2011).

A colheita de madeira em áreas acidentadas exige o uso de máquinas e equipamentos dimensionados para executarem as tarefas com maior eficiência, com custos compatíveis, baixo impacto ambiental e capaz de proporcionar boas condições de trabalho aos trabalhadores (MINETTE, 1988) *apud* (BIRRO, 2002), garantindo ainda um nível eficiente de planejamento das operações.

O terreno com elevada declividade, em geral, apresenta muitos desafios para a colheita de madeira. Comparado aos terrenos planos, as operações de colheita de madeira quando realizadas em terrenos declivosos apresenta baixa produtividade, exige maior planejamento, além de acarretar em maiores desgastes das máquinas e equipamentos, maiores impactos ambientais sobre o solo e à floresta remanescente, condições inapropriadas de trabalho e maiores riscos de acidentes aos trabalhadores (MALINOVSKI *et al.*, 2011).

Bantel (2009) diz que a colheita de madeira em locais de topografia acidentada possui diversos obstáculos que desafiam a viabilidade e a operacionalidade do processo. Dentre as dificuldades cita-se a necessidade de uma regularidade do fluxo de movimentação da madeira, exigências de grandes estoques intermediários, eliminação das causas que resultam em baixa qualidade do produto e serviço, redução dos riscos de acidentes, garantia de continuidade operacional e necessidade de evitar danos ambientais.

Por isso, conforme cita o mesmo autor, algumas alternativas são: montar equipes que se proponham a realizar a colheita de madeira enfrentando as diversidades de acesso e declividade do terreno; maximizar a retirada da madeira; organizar e harmonizar as atividades em processos de trabalho, eliminando "gargalos" operacionais; reduzir custos notadamente na extração e na malha viária; maximizar a extração de produtos florestais, com classificação de

sortimentos e retirada de todo material de valor comercial, o que aumenta o uso dos equipamentos de extração e a malha viária e acelera o retorno do investimento.

Deve-se ressaltar que as dificuldades aumentam com a declividade do terreno (MALINOVSKI *et al.*, 2011). Por isso a colheita de madeira em áreas acidentadas exige um alto nível de planejamento das operações, bem como o desenvolvimento de máquinas e equipamentos específicos para essas condições, de forma a minimizar os custos, diminuir a necessidade de mão de obra e aumentar a produtividade (LIMA e LEITE, 2008).

3.2.5 Extração florestal

A extração refere-se à movimentação da madeira desde o local de corte até a margem do talhão (estaleiro), carreador ou pátio intermediário. Existem vários sinônimos para esta operação, dependendo da maneira como é realizada ou do tipo de equipamento utilizado, podendo ser citado o baldeio, arraste, transporte primário e aéreo (SEIXAS, 2008).

A extração da madeira é influenciada por diversos fatores, dentre os quais citam-se: nível de experiência e habilidade do operador, condições do povoamento, topografia do terreno, tipo de solo, condições climáticas, características das máquinas e distância de extração (LOPES *et al.*, 2007). É considerada um dos pontos críticos da colheita de madeira, devido aos elevados custos envolvidos, podendo o custo da unidade de madeira ser até 25 vezes maior que o custo do transporte principal (BIRRO *et al.*, 2002).

É importante ressaltar ainda que a extração constitui a fase de maior complexidade e maior custo dentro da colheita de madeira. Por isso, para otimizar e tornar viável economicamente a extração florestal é fundamental que esta etapa seja realizada de forma planejada e empregando-se os equipamentos adequados dentro do sistema mais indicado de trabalho (MARAN *et al.*, 2012).

3.2.6 Extração com sistema de cabos aéreos

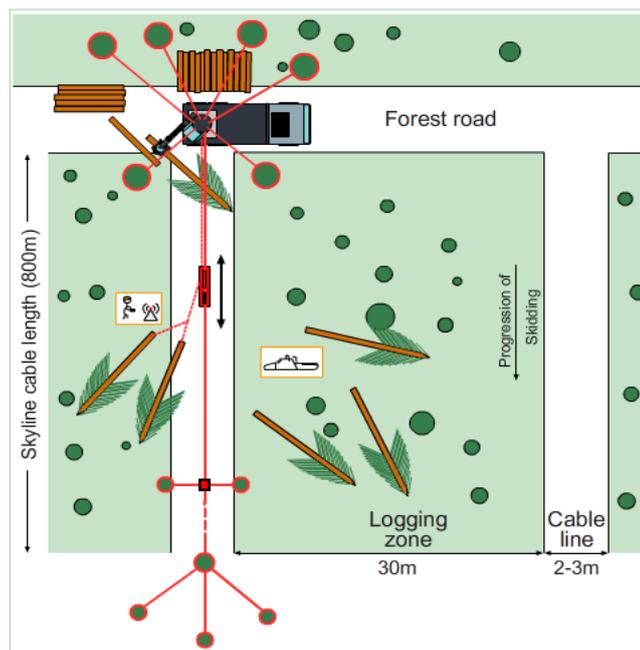
A colheita de madeira com uso dos sistemas de cabos aéreos teve sua origem nos Alpes europeus, especificamente na Áustria, sendo também utilizada em regiões montanhosas da América do Norte, Nova Zelândia, Chile e Japão (IPEF, 2009; BONT e HEINIMANN, 2012). No Brasil, esta tecnologia tem sido aplicada eficazmente nas regiões sul e sudeste, especificamente nos estados do Paraná e São Paulo (IPEF, 2009).

Nas regiões montanhosas o uso do sistema de cabos aéreos pode ser a opção mais adequada técnica e economicamente, viabilizando a extração de árvores inteiras para o posterior processamento da madeira, diminuindo a densidade e custos com construção e manutenção de estradas, redução de mão-de-obra e minimização de impactos ambientais (PENZSAUR, 2009) *apud* (BANTEL, 2010).

O uso do sistema de cabos aéreos é recomendado em áreas com declividade acima de 30%, locais considerados sensíveis ambientalmente, terrenos alagados onde os tratores florestais são inoperantes e em condições de extração desfavoráveis com até 1.000 m de distância (EPSTEIN *et al.*, 2006).

A análise de viabilidade da colheita com cabos aéreos requer a consideração das condições topográficas da área a ser colhida, da capacidade do sistema de cabos aéreos, da localização da torre e da extremidade onde será fixado a outra extremidade do cabo aéreo, o uso de árvores suporte, além de outros requisitos ambientais como a alocação do cabo mestre sobre áreas de preservação permanente ou áreas com vegetação nativa no interior do talhão a ser colhido (CHUNG e SESSIONS, 2003).

O uso de cabo aéreo comporta um sistema misto de colheita (Figura 1), devido à derrubada das árvores ser feita com uma motosserra e a extração de árvores inteiras para as estradas ser realizado com auxílio de um dispositivo móvel que se desloca ao longo de um cabo com uma das suas extremidades fixadas numa torre (porção superior do declive) e a outra em árvores (porção inferior do declive). Em algumas situações pode haver a necessidade do desgalhamento com machadinha (IPEF, 2009).



Fonte: Thuringian Ministry for Agriculture, Forestry, Environment and Nature Conservation TMLFUN.2008.

Figura 1. Sistema de colheita de madeira utilizando Cabos Aéreos.

O elevado custo operacional da extração de madeira em regiões montanhosas utilizando cabos aéreos, o elevado investimento na aquisição do equipamento e a baixa produtividade quando comparada aos sistemas usuais de colheita de madeira, faz do planejamento para o sistema de cabos aéreos uma etapa de grande importância (PENNA, 2009).

Por isso, para obter maior eficiência e otimização do processo de extração de madeira com o sistema de cabos aéreos, algumas práticas devem ser adotadas como qualificar o pessoal para execução do planejamento de instalação e operação do equipamento, possibilitando assim obter a maximização da produtividade, minimização dos custos e menores danos ambientais (DYKSTRA e HEINRICH, 1996) *apud* (BANTEL, 2010).

3.3 Planejamento florestal

O planejamento florestal pode ser definido como o desenvolvimento de processos, técnicas e atitudes administrativas que proporcionam uma situação viável de avaliar as implicações futuras de decisões presentes, em função dos objetivos da empresa, que

auxiliarão na tomada de decisão futura, de forma rápida, coerente e eficiente. (MALINOVSKI, 2007).

Faria (2012) afirma que o planejamento possibilita à empresa a visualização de todos os cenários e métodos possíveis para resolução de problemas de forma preventiva, enquanto Chung (2002) afirma que quando o planejamento for realizado adequadamente, irá reduzir os impactos ambientais, aumentar a eficiência econômica e a segurança no trabalho.

O planejamento florestal, devido à sua natureza, tem como característica principal a resolução de problemas envolvendo elevado número de variáveis, longos horizontes de planejamento, variações de clima e mudanças de mercado, tais como flutuações de preços, de oferta e de demanda (NASCIMENTO *et al.*, 2012).

3.3.1 Planejamento aplicado na colheita de madeira

Em função da grande complexidade e dos elevados custos de produção, as operações de colheita da madeira têm recebido os maiores investimentos, tais como máquinas de alta tecnologia e produtividade, substituindo os sistemas tradicionais caracterizados por máquinas de baixa tecnologia, que acarreta, conseqüentemente, em baixa produtividade (MACHADO e LOPES, 2008).

Em muitos casos, as máquinas de colheita da madeira representam elevado investimento e são utilizadas sem um planejamento adequado da operação, acarretando, conseqüentemente, em elevados custos de produção (MALINOVSKI, 2007). Por isso, é essencial a busca antecipada dos problemas e a identificação das variáveis envolvidas, de modo que as correções em relação ao plano original sejam efetuadas antes do início das operações (MACHADO e LOPES, 2008).

Além disso, um planejamento eficiente da colheita de madeira é essencial, por permitir a otimização das operações, a melhoria da qualidade do produto e serviço, a minimização dos impactos ambientais, a melhoria das condições de saúde e segurança dos trabalhadores, o aumento da produtividade e a redução dos custos (MACHADO e LOPES, 2008).

Por isso, é de suma importância o conhecimento prévio dos fatores que afetam as operações de colheita de madeira e que necessitam ser considerados no planejamento, podendo-se destacar: povoamento, topografia, objetivos da madeira, demanda da indústria, regime de manejo, recursos financeiros disponíveis, rendimentos e custos dos maquinários, grau de mecanização, capacidade de suporte do terreno, condições climáticas, sistemas de

colheita, logística, ergonomia das máquinas e equipamentos, segurança, treinamento etc. (MACHADO e LOPES, 2008).

Malinovski (2007) afirma que, para redução dos custos das atividades de colheita, várias técnicas e procedimentos podem ser utilizados, em especial técnicas de Pesquisa Operacional, tais como: Programação Linear, Programações Inteira e Mista, Programação Dinâmica, utilização de algoritmos e simulações. Conforme o mesmo autor, a maioria destas técnicas objetiva uma solução ótima do problema, focando principalmente na maximização dos lucros ou na minimização dos custos.

Epstein *et al.* (2006) afirma que o planejamento realizado de forma manual, ou seja, sem o uso de softwares específicos para o planejamento da colheita com o sistema de cabos aéreos, tende a usar a rede viária existente, sem avaliar adequadamente os elevados custos para repará-la e torná-la útil. Conforme o referido autor, há também a tendência de maximizar a área a ser colhida utilizando os sistemas tradicionais de colheita, porque o custo de colheita com estes sistemas é menor, se comparado com o custo da colheita utilizando cabos aéreos, mas esta prática não é capaz de avaliar adequadamente o aumento dos custos da operação causado pelo investimento em estradas. Na prática é demasiadamente complexo gerar diferentes alternativas e avaliá-las quantitativamente, sem o uso de softwares, a fim de fazer a seleção do cenário ideal.

3.3.2 Métodos científicos de planejamento

O uso de métodos científicos no planejamento é importante para a otimização das operações de colheita de madeira, diante de diversos fatores influentes, além de contribuir para a redução de custos.

Segundo Epstein *et al.* (2006) há relatos de empresas localizadas em vários países que utilizam sistemas informatizados, desde a década de 1990, para o planejamento da colheita com cabos aéreos. O planejamento operacional e layout da alocação de torres são passos importantes para determinar a viabilidade das operações de colheita utilizando cabos aéreos (SOLMIE, 2003).

No Brasil, dentre os métodos científicos de apoio no planejamento florestal cita-se as técnicas de Pesquisa Operacional e os Sistemas de Informações Geográficas, apesar de pouco

exploradas como ferramentas para solução de problemas específicos na área de colheita de madeira (MACHADO e LOPES, 2014).

Conforme Epstein *et al.* (2006), o planejamento das operações de colheita com cabos aéreos realizado através de *softwares* específicos permite o planejador procurar novas maneiras de abordar o problema, aumentando a perspectiva na busca de melhores soluções. Em contraste com o planejamento manual, que requer vários dias para construir e avaliar uma alternativa, o método informatizado permite criar e avaliar várias alternativas em algumas horas. Além disso, o planejador pode se concentrar nos casos mais difíceis.

Para Chung e Sessions (2003), o planejamento na operação de extração de madeira com uso de cabos aéreos possui um elevado grau de complexidade, requerendo a consideração de aspectos como eficiência econômica, questões ambientais e características físicas da área. Além disso, é requerido um estudo de viabilidade do sistema de cabos aéreos, em que, segundo os autores, é necessário avaliar as condições topográficas da área, a capacidade de carga da torre, a localização da torre e do ancoradouro terminal, a localização das árvores que têm a função de suporte intermediário e a suspensão adequada dos cabos que em alguns casos passam sobre as áreas de mata ciliar, para que não danifiquem a mesma.

Adams *et al.* (2003) dizem que a colheita de madeira realizada em terreno montanhoso necessita de um planejamento detalhado. Por isso, os autores desenvolveram um modelo que avalia os riscos da colheita em áreas com declividade acentuada utilizando o Sistema de Informações Geográficas. No referido modelo são inseridas informações sobre as características do solo e o modelo digital do terreno, onde o resultado obtido é o mapa de riscos, informações sobre a resistência do solo, riscos de erosão e recomendações para o sistema de colheita de madeira utilizado.

Chung e Sessions (2001) utilizaram soluções heurísticas para a alocação de estradas considerando a topografia do terreno, os padrões de estradas e os custos de colheita e transporte. No estudo foram utilizadas duas heurísticas, a de Algoritmos Genéticos e a de *Simulated Annealing*, de modo a alocar dois padrões de estradas: estradas principais com pavimento de pedras e estradas de terra. A heurística *Simulated Annealing* simula as possíveis rotas e a de Algoritmos Genéticos seleciona as rotas viáveis conforme as restrições consideradas. Os resultados encontrados apontam que as técnicas heurísticas para solução de problemas de alocação de estradas florestais podem ser ferramentas úteis, apesar da necessidade de aperfeiçoamento destas.

Legües *et al.* (2007) comparou a heurística de Busca Tabu com o modelo exato solucionado com o *software* CPLEX versão 8.1, para a solução de problemas de alocação de torres para a extração de madeira utilizando cabos aéreos. Os resultados encontrados através da heurística Busca Tabu comparados aos resultados numéricos obtidos com o *software* CPLEX mostraram que a heurística Busca Tabu pode ser utilizada para solucionar problemas de alocação com sucesso, apresentando ainda tempos menores de processamento.

É importante também ressaltar o trabalho de Chung *et al.* (2004), que realizaram o planejamento de áreas para instalação de sistema de cabos aéreos, por meio da suposição dos locais a serem ocupados pelas torres. A pesquisa utilizou o Sistema de Informações Geográficas, o modelo digital do terreno da área e algoritmos heurísticos para solucionar problemas de alocação das estradas e planejamento das unidades para instalação das torres. O método avaliou possíveis posições das torres com base na viabilidade do sistema e custos de instalação. Foram apontados 40 potenciais locais para instalação das torres. O modelo desenvolvido selecionou 19 pontos e 139 eitos para instalação o cabo aéreo, em uma área correspondente a 93 ha.

3.3.2.1 Sistemas de Informações Geográficas

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem ser entendidos como um poderoso conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e representar visualmente dados espaciais, a partir do mundo real, para um conjunto particular de propósitos (BURROUGH, 1989).

Lo e Yeung (2007) definem o SIG como um sistema que possibilita o gerenciamento de dados geoespaciais e a utilização dos mesmos para a solução de problemas espaciais. Para Ferreira *et al.* (2013), os SIG's possibilitam a identificação, quantificação e análise de mudanças ocorridas no espaço durante um determinado período, enquanto Chung (2002) diz que o SIG é capaz de armazenar a estrutura geográfica e numérica de povoamentos florestais e associar esse banco de dados espaciais aos modelos de planejamento.

Segundo Faria (2012), por meio do SIG, o planejador pode não somente visualizar e propor soluções para determinado problema, como também permite a alteração, de forma rápida, de uma solução gerada pelo sistema por outra que considere outros fatores.

Para Neteler e Mitasova (2002) *apud* Malinovski (2007), o SIG é uma integração de

hardware, *software* e dados designados para administração, processamento, análise e visualização de dados, onde o *software* proporciona condições para o uso efetivo de dados espaciais na resolução de uma enorme gama de problemas.

Os SIG's são utilizados também para a elaboração de mapas (cartografia automática), com qualidade superior e custo inferior aos mapas manuais. Além disso, são utilizados para a análise dessas informações com o objetivo de seleção de áreas de corte, simulações de cenários de manejo, mapeamento de áreas de grande risco de fogo e explosão de população de insetos, definição de áreas para plantio de determinados materiais genéticos etc. (IPEF, 1993).

Na colheita de madeira, sabe-se que essa ferramenta pode auxiliar na solução de complexos problemas de planejamento. Com o SIG, podem-se resolver problemas geográficos baseados em informações de mapas digitais, associados a uma base de dados de atributos, podendo ser conectado a ferramentas de planejamento e manejo florestal. Além disso, é eficiente na solução de problemas que envolvem alocação de equipamentos e recursos, construção e manutenção de estradas, determinação da rota ótima de transporte, delimitação de áreas de fauna, monitoramento de estágios de sucessão da floresta, manejo de paisagens etc. (MACHADO, 2008).

Malinovski (2007) desenvolveu, por meio de técnicas matemáticas e de funcionalidades disponíveis no Sistema de Informações Geográficas GRASS, uma ferramenta tecnológica capaz de calcular e otimizar a distância média de extração (DME) de madeira com *forwarder*, em diferentes tamanhos e formatos de talhões. O autor concluiu que o modelo otimizado mostrou-se eficaz para o cálculo da distância média de extração, tanto em talhões com formato regular quanto irregular e permitiu definir o sentido de alinhamento de plantio ótimo. A partir da distância média de extração, foi possível compartimentalizar os talhões. Já Kühmaier e Stampfer (2010) pesquisaram a alocação de diferentes sistemas de colheita com base na declividade do terreno utilizando a ferramenta *ModelBuilder* do ArcGIS. Os autores relatam o uso do sistema de cabos aéreos em 62 % das áreas a serem colhidas.

3.3.2.2 Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional teve sua origem durante a Segunda Guerra Mundial, quando um grupo de pesquisadores procurou aplicar métodos científicos para apoiar os comandos operacionais na resolução de problemas de natureza logística, tática e de estratégia militar de

grande dimensão e complexidade. O objetivo era decidir sobre a utilização mais eficaz dos recursos militares limitados (MORAES, 2005).

O termo Pesquisa Operacional está associado em geral, e quase exclusivamente, com a aplicação de técnicas matemáticas a problemas de decisão, representados e analisados por meio de modelos (ARCE, 1997).

Sanchez *et al.* (1985) *apud* Fenner (2006) comenta que uma pessoa treinada em resolver problemas de um tamanho razoável pode solucioná-lo e aproximar-se bastante do ótimo, mas à medida que o problema fica mais complexo e as alternativas se multiplicam, o indivíduo tende a perder o controle e, então, o uso do modelo matemático se torna indispensável.

Uma característica importante da Pesquisa Operacional e que facilita o processo de análise de decisão é a utilização de modelos matemáticos, permitindo a "experimentação", o que significa que uma decisão pode ser melhor avaliada e testada antes de ser efetivamente implementada (MORAES, 2005).

Os modelos são úteis na administração florestal, quando bem construídos, validados e aplicados, para tomar decisões com consequências previsíveis. Com o auxílio dos modelos podem ser realizadas em laboratório experiências sobre situações quase impossíveis de obter na floresta real (ARCE, 1997).

Malinovski *et al.* (2007) afirmam que, dentro da Pesquisa Operacional, a Programação Linear, a Programação Inteira e Mista, a Programação Dinâmica, o uso de algoritmos, o PERT/COM e as simulações, são as técnicas mais empregadas que buscam a solução ótima de um problema para maximização dos lucros ou minimização dos custos.

Banhara *et al.* (2010) utilizaram Programação Linear Inteira Mista a fim de aprimorar as técnicas de planejamento operacional de colheita de madeira e afirmam que é possível elaborar um modelo de Programação Linear capaz de representar o planejamento operacional de colheita, além de incorporar aspectos produtivos, ambientais e de abastecimento.

Epstein *et al.* (2006) desenvolveram um sistema para alocação de torres de colheita com cabos aéreos e estradas, utilizando soluções heurísticas e Programação Linear Inteira Mista. O sistema proporciona como resultados as seguintes informações: (i) locais de torres, utilizando coordenadas georreferenciadas; (ii) os custos médios de colheita para os diferentes tipos de equipamentos, área e volume colhido; (iii) volume de madeira para não ser colhido devido ao alto custo econômico e de difícil acesso; (iv) custo de construção de estradas,

incluindo novas estradas e melhoria das estradas existentes; (v) o custo do transporte de madeira; e (vi) volume total colhido e os custos totais médios

A Programação Dinâmica é utilizada em modelos onde o problema completo pode ser decomposto em subproblemas menores (LISBOA, 2002). Exemplo disso pode ser encontrado em Marques *et al.*(2005) que desenvolveram um modelo de programação dinâmica, com o objetivo de determinar o momento ótimo de substituição de equipamentos e máquinas utilizados na colheita florestal. O autor verificou que o modelo proposto é mais suscetível a aumentos no valor de aquisição do equipamento, enquanto o modelo sem receita é mais sensível a variações na taxa de juros e concluiu que a aplicação da Programação Dinâmica oferece ao planejador uma gama de alternativas bem maior para auxiliar a tomada de decisão.

A programação das atividades através da técnica PERT/CPM (*Program Evaluation and Review Technique/ Critical Path Method*) utiliza conceitos de redes para planejar a coordenação das atividades de um determinado projeto, com o objetivo de estabelecer em que tempo (por exemplo, em que dia ou semana) uma atividade deve começar e terminar (NOGUEIRA, S/D).

Marques *et al.*, (1995) testou a técnica PERT/CPM no planejamento e controle das operações de transporte florestal rodoviário, visando a otimização do sistema. Este autor concluiu que o uso do planejamento com PERT/CPM diminuiu a duração do ciclo operacional dos veículos em aproximadamente 10 %, em consequência da redução das demoras improdutivas no ciclo operacional, além de permitir prever as atividades críticas e evitar assim problemas que possam acarretar em atrasos da programação. Já Fernandes *et al.* (2013) utilizaram PERT/CPM para a determinação do caminho crítico da cadeia de exploração de madeira nativa. O autor conclui que a utilização de ferramentas da Pesquisa Operacional permite planejar as operações de exploração nos períodos sem chuva na região.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada nas áreas operacionais da empresa Berneck – Florestal, localizada na região do Vale do Ribeira, município de Tunas do Paraná, Estado do Paraná, entre os paralelos 24°58'28" S e 49°05'09" W, com altitude média de 906 metros (Figura 2).

O clima da região, segundo KÖPPEN, é classificado como temperado úmido (Cfa), caracterizado por geadas pouco frequentes, chuvas distribuídas no decorrer do ano e verões quentes, com temperatura média anual em torno de 18° C. A região apresenta relevo de ondulado a forte-ondulado (EMBRAPA, 1999), com grandes desníveis altimétricos.

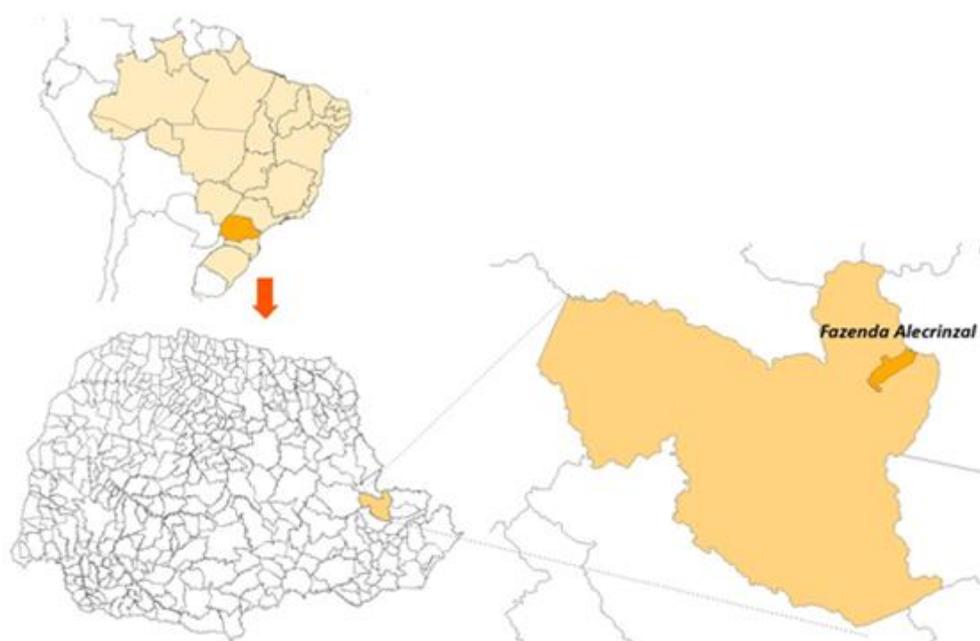


Figura 2. Localização da área de estudos.

A área total da fazenda possuía 1.298,67 hectares, enquanto a área de estudo correspondeu a 548,03 hectares. Os dados foram coletados no período de janeiro de 2013 a janeiro de 2014.

Os dados referentes às características do povoamento florestal da área de estudo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Características do povoamento florestal da Fazenda Alecrinzal.

Varição da declividade da área estudada (graus)	0° a 45°
Idade do povoamento (anos)	27
Espécie plantada	<i>Pinus elliottii</i>
Número de árvores do povoamento (árvore/ha)	1.358
Área basal do povoamento (m ² / ha)	56,62
Diâmetro médio das árvores (DAP) (cm)	23,1
Altura média das árvores (m)	22,3
Volume médio individual das árvores na área estudada (m ³)	0,41
Volume médio do talhão (m ³ /ha)	556,7
Espaçamento (m)	3 x 2,45

4.2 Sistemas de colheita de madeira utilizados na empresa

A empresa adota na colheita de madeira os sistemas de “Toras Curtas” e de “Árvores Inteiras”.

O sistema de toras curtas é composto pelo trator florestal *harvester*, que realiza as operações de corte e processamento da madeira no interior do povoamento (Figura 3a), enquanto o trator florestal *forwarder* (Figura 3b) realiza a extração das toras na forma de baldeio. Este sistema é utilizado apenas nas áreas mecanizáveis existentes na fazenda, geralmente em áreas de topo de morro, servindo de apoio ao sistema de cabos aéreos.



(a)



(b)

Figura 3. Sistema de colheita de madeira de toras curtas: (a) *harvester*; (b). *forwarder*.

O sistema de colheita de madeira de árvores inteiras é composto pela motosserra, que realiza a derrubada das árvores no interior do povoamento (Figura 4a), enquanto o sistema de cabos aéreos é responsável pela extração da madeira do interior dos talhões até a margem da

estrada na forma de árvores inteiras (Figura 4b), que posteriormente são processadas em toras com diferentes sortimentos pelo cabeçote *harvester* acoplado à torre instalada sobre o caminhão do sistema de cabos aéreos.

Nas áreas onde a distância de extração é inferior a 150 m, utiliza-se o sistema de colheita composto pela motosserra (Figura 5a), responsável pela derrubada das árvores, enquanto o guincho arrastador (Figura 5b) realiza o arraste da madeira do interior do talhão até a margem da estrada. É importante ressaltar que o uso do guincho arrastador ocorre em substituição ao sistema de cabos aéreos, visando a obtenção de maior produtividade da operação de extração da madeira, em função do grande tempo despendido com a instalação e desinstalação do sistema de cabos aéreos, quando operante em áreas com distâncias de extração muito curtas, ou seja, inferiores a duzentos metros.



(a)



(b)

Figura 4. Sistema de colheita de madeira de árvores inteiras: (a) motosserra; (b) cabo aéreo.



(a)



(b)

Figura 5. Sistema de colheita de madeira de árvores inteiras: (a) Motosserra; (b) Guincho arrastador.

As especificações técnicas das máquinas utilizadas na colheita de madeira na empresa são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Especificações técnicas das máquinas utilizadas na colheita de madeira.

Sistema de Colheita	Máquina (operação)	Especificações Técnicas
Toras Curtas	Harvester (Corte e processamento)	Marca <i>John Deere</i> , modelo 200D LC, motor Diesel <i>PowerTech™</i> com certificação <i>Tier 3</i> , potência líquida de 159 hp / 119 kW, peso operacional de até 22,4 t, rodados de esteiras. Cabeçote marca <i>Waratah</i> , modelo WH 60, máximo diâmetro de corte de 65 cm, máxima abertura da garra igual a 125 cm, peso de 1350 kg, velocidade de corte de 40 m/ sec.
	Forwarder (Extração)	Marca <i>Timberjack</i> , modelo 1710D, motor <i>John Deere</i> 6081 HTJ02, potência 160 kW, peso operacional de 19,5 t, capacidade de carga de 17 t, rodados de pneus equipado com semiesteiras na traseira, máxima força de tração igual a 200 kN, garra com capacidade máxima de 1.185 kg e distância máxima de alcance de 8,5 m.
Árvores Inteiras	Motosserra (Corte)	Marca <i>Stihl</i> , modelo MS 381. Capacidade do tanque de combustível de 0,680 l. Peso igual a 6,6 kg. Potência de 5.3 CV. Rotação lenta de 2.400 RPM e rotação máxima de 12.500 RPM. 72,2 cilindrada (cm ³).
	Sistema de cabos aéreos (Extração)	Marca <i>Konrad</i> , modelo <i>Mounty 4000</i> , altura da torre de 13,1 m, força de tração do cabo mestre de 42 kNm, comprimento do cabo mestre 550 m, espessura do cabo mestre 20 mm, comprimento do cabo de tração 650 m, espessura do cabo de tração 12 mm, equipado com quatro cabos de ancoragem, comprimento dos cabos de ancoragem de 50 m e espessura dos cabos de ancoragem 20 mm.
	Guincho Arrastador (Extração)	Trator da marca <i>Massey e Fergusson</i> , modelo 283, com rodados de pneus tração 4x4 e equipado com guincho da marca TMO de 33 toneladas; cabo TMO com 200 m de comprimentos e diâmetro igual a 5/8" (15,87 mm).

4.3 Caracterização da operação com o sistema de cabos aéreos

A equipe de trabalhadores florestais que realiza as operações de corte e extração com o sistema de cabos aéreos é composta por: um balizador responsável pelo alinhamento do cabo mestre; dois montadores responsáveis pela montagem e desmontagem da torre; dois motosserristas responsáveis pela derrubada das árvores; um operador de torre responsável pelo desengate da madeira extraída e posterior processamento; dois operadores responsáveis pelo engate das toras e guinchamento e um operador de caminhão autocarregável, responsável pelo baldeio da madeira até a estrada principal.

As principais etapas para operação com o sistema de cabos aéreos são descritos abaixo:

a) Planejamento de extração:

Esta etapa é iniciada com a determinação das áreas que serão colhidas com o sistema de cabos aéreos, sendo de responsabilidade do supervisor das operações de colheita de madeira.

b) Sinalização da área:

A sinalização da área é realizada com uso de placas de advertência colocadas em uma distância mínima de 100 m da área de operação. Algumas vezes é necessária a permanência de um colaborador próximo às áreas onde não é possível bloquear as vias de acesso, a fim de orientar o tráfego de veículos e auxiliar na operação do sistema de cabos com maior segurança.

c) Delimitação de área, balizamento e marcação de árvores suportes:

A marcação dos eitos de extração, com largura variando de 40 a 60 m é realizada pelo colaborador responsável pelo balizamento. Este realiza o alinhamento do eito, partindo da margem da estrada em direção à base do morro, marcando o centro do eito com o auxílio de estacas e terminando, muitas vezes, próximo às áreas de preservação permanente (APP). O comprimento das faixas varia de 150 a 650 m. De acordo com o comprimento da faixa são marcadas pelo balizador as árvores para o posterior estaiamento do cabo mestre. Estas árvores são marcadas com um corte da casca em sua base, de modo a sinalizar ao operador de motosserra, informando que estas não devem ser derrubadas.

d) Corte:

A operação de corte é realizada antes da instalação do sistema de cabos aéreos na área a ser colhida. Esta operação é executada por uma dupla de motosserristas que realizam a derrubada simultânea, com uma distância mínima de 20 metros entre os mesmos, a fim de assegurar a segurança da operação durante a realização do corte. O corte é realizado o mais baixo possível, de modo a evitar problemas operacionais durante a extração, como o travamento das árvores.

A fim de evitar o entrelaçamento dos fustes, o que dificulta a retirada da madeira do interior do talhão e afeta a produtividade do sistema, o corte não é realizado em espinha de peixe. O corte é realizado utilizando motosserra, no sentido do declive e paralelo à linha de instalação do cabo mestre. A desvantagem do corte realizado paralelo ao cabo mestres é o deslizamento das árvores derrubadas, no sentido do declive, e também a dificuldade de deslocamento dos operadores que realizam o engate da madeira a ser guinchada devido à diferença de nível entre a madeira e o solo, ocasionando em alguns casos a queda dos colaboradores no interior do talhão.

Quando o corte é realizado em espinha de peixe a diferença de nível entre a madeira e o solo é menor, pois a madeira é acomodada no sentido perpendicular à declividade do talhão, reduzindo o risco de queda dos colaboradores ao realizar o preparo dos fustes a serem guinchados. Porém, ao utilizar está técnica de corte, o sistema perde em produtividade devido ao entrelaçamento das árvores derrubadas.

e) Preparação da área:

Esta etapa foi realizada anteriormente à montagem do sistema de cabos aéreos (torre) no eito de trabalho, consistindo da fixação dos cabos e acessórios (trilhos e roldanas) nas árvores de estaio, que servem de suporte ao cabo mestre. Em seguida é iniciada a entrada da equipe de logística composta por um escalador e um ajudante, com o objetivo de deixar a área pronta para montagem do sistema de cabos aéreos. Nesta fase é realizada também a preparação da árvore onde é fixada a extremidade do cabo mestre, sendo selecionada a árvore com maior diâmetro localizada ao final do eito. Quando não há árvores de maior diâmetro, é realizada a amarração junto às outras árvores, garantindo suporte e resistência à pressão exercida pelo cabo mestre sobre a árvore e maior segurança da operação.

f) Montagem do sistema de cabos aéreos:

A torre do sistema é posicionada em local com terreno plano e firme, na estrada ou em um pátio intermediário, possibilitando que o equipamento permaneça estável sobre o solo. O equipamento é alinhado com as árvores previamente selecionadas no balizamento. Na sequência, os ajudantes descem com um cabo de menor diâmetro (mainline – cabo de tração), que durante a operação é responsável pelo tracionamento do transportador autopropelido. O cabo contorna a árvore onde é preso o cabo mestre, e então o mesmo é levado para a torre onde é fixado ao cabo mestre. Quando inicia-se o seu recolhimento, simultaneamente este traz o cabo mestre para o final do eito. Após esta etapa, o escalador escala a árvore de estaio para posterior instalação do cabo mestre e finaliza com os ajustes na máquina, acoplando o transportador autopropelido ao cabo mestre e posteriormente tencionando-o.

g) Operação de extração com o sistema de cabos aéreos:

Esta etapa é iniciada após finalizada a instalação da torre (Figura 6). O transporte das árvores do interior do talhão até a estrada é realizado pelo transportador autopropelido que desloca-se por meio do cabo mestre, sendo tracionado por um segundo cabo denominado mainline (tração). Esta operação envolve um operador de torre e dois ajudantes, responsáveis pela amarração dos cabos (*chockers*). O recebimento e desengate das árvores são realizados pelo operador da torre. O acionamento e movimentação do transportador autopropelido são realizados através de um controle remoto, controlado em conjunto pelo operador da torre e ajudantes.



Figura 6. Veículo e torre principal do sistema de cabos aéreos montado na estrada florestal.

h) Processamento:

O operador da torre realiza as seguintes atividades: controle da operação de extração, processamento e desengate.

Operação da torre: A operação da torre consiste em gerenciar a movimentação do transportador autopropelido e a operação do mesmo através do controle. O operador é responsável também pelo abastecimento do caminhão e o engraxe das peças que necessitam, quando for preciso.

Processamento: O processamento envolve o descascamento da madeira, traçamento e empilhamento. O empilhamento é realizado separando os sortimentos realizados.

Desengate: O desengate consiste na movimentação do operador da cabine até o local onde a madeira desce após o deslocamento carregado, sobre o caminhão e junto à torre. O operador retira as presilhas da madeira, recolhe o cabo e através dos comandos do controle ele devolve o transportador autopropelido para os operadores que estão no interior do talhão, para que a operação de extração possa ser continuada.

i) Desmontagem e deslocamento:

Esta etapa é iniciada com a finalização da extração, onde é retirado o cabo mestre das árvores de estaio, sendo então realizado o seu recolhimento e enrolamento no tambor. O deslocamento do caminhão para o próximo eito é feito com a torre posicionada na horizontal.

4.4 Coleta de dados

4.4.1 Estudo de tempos e movimentos do sistema de cabos aéreos

Inicialmente foi realizado um estudo de tempos e movimentos piloto da etapa de extração de madeira com o sistema de cabos aéreos, a fim de definir o número mínimo de observações necessárias, ao nível de confiança de 95% e um erro relativo de 5%, por meio da equação proposta por CONAW (1977):

$$n_{ideal} = \frac{S^2 \cdot t_{0,05}^2}{E^2}$$

onde: n_{ideal} = número mínimo de ciclos necessários; t = valor de t , para o nível de probabilidade desejado, (n-1) graus de liberdade; S^2 = variância; E = erro admissível, em porcentagem (5%).

O estudo de tempos e movimentos do sistema de cabos aéreos teve por objetivo, a determinação da produtividade do equipamento nas diferentes classes de distâncias e declividades de extração, para posterior uso desta informação no modelo de planejamento.

A distância ao longo das faixas de extração foi mensurada utilizando um medidor de distância (Figura 7).



Figura 7. Medidor de distância utilizado para mensurar distâncias ao longo das faixas de extração.

Em função da distância máxima de extração obtida no estudo piloto e dos testes estatísticos realizados para verificar a diferença entre as médias de produtividade nas classes de distância, a área experimental foi estratificada em cinco classes de distância de extração (DE): $DE \leq 200$; $201 < DE \leq 400$; $401 < DE \leq 600$; $601 < DE \leq 800$ e $DE > 801$ metros.

Em seguida, foi realizado um estudo de tempos e movimentos da operação de extração com o sistema de cabos aéreos nas diferentes distâncias de extração. Foi empregado o método de cronometragem de tempos contínuos, caracterizado pela medição do tempo sem a interrupção do cronômetro. A leitura do cronômetro foi realizada no ponto de medição referente à atividade parcial recém-concluída.

O ciclo operacional do sistema de cabos aéreos foi subdividido nas seguintes atividades parciais: Guinchamento que compreende as operações de Deslocamento Vazio, Engate, Arraste, Deslocamento Carregado e Desengate; Processamento e Interrupções, as quais são descritas a seguir:

- Deslocamento Vazio (DV): inicia com o deslocamento do transportador autopropelido a partir da torre instalada sobre o caminhão na estrada e termina com a parada do mesmo próximo ao local de engate das árvores no interior do talhão;
- Engate (EG): inicia no momento em que o operador apanha o cabo de arraste, deslocando-se em seguida até as árvores a serem engatadas e termina com o engate do cabo na última árvore a ser arrastada até o cabo principal;

- Arraste (AR): inicia no momento em que o feixe de árvores movimentava-se na forma de arraste em direção ao cabo principal e termina quando o feixe de árvores se aproxima do transportador autopropelido, com o recolhimento do cabo de arraste;
- Deslocamento Carregado (DC): Inicia quando o transportador autopropelido sobe com o feixe de árvores do interior do talhão em direção à margem da estrada, e termina quando o carro aproxima-se da torre na estrada;
- Desengate (DG): Inicia quando o carro com o feixe de árvores posiciona-se próximo à torre, e termina quando as árvores são completamente desengatadas para o posterior processamento das árvores;
- Processamento (PR): O processamento da madeira extraída é realizado pelo cabeçote *harvester*, o qual é acoplado à torre que sustenta o sistema de cabos aéreos, e ocorre simultaneamente à operação de guinchamento. O operador realiza o processamento da madeira extraída, a partir da cabine. A operação de processamento é interrompida e o operador deixa a cabine quando o deslocamento carregado é encerrado para realizar então a operação de desengate. O operador que realiza o processamento da madeira é responsável também pela operação de desengate das árvores extraídas. Ao final do desengate o processamento é retomado.
- Interrupções (IN): Foram registrados como interrupções todos os tempos em que o equipamento não estava realizando as atividades acima mencionadas.

A produtividade efetiva do sistema de cabos aéreos foi obtida por meio do volume médio das árvores fornecido pelo inventário da empresa, cujo valor foi multiplicado pelo número de árvores extraídas durante os ciclos operacionais e então divididas pelas horas efetivamente trabalhadas, conforme a seguinte expressão:

$$Pr = N * V / he$$

Onde: *Pr* = Produtividade (m^3 cc he^{-1}); *N* = número de árvores extraídas; *V* = volume médio individual das árvores com casca (m^3 cc); e *he* = tempo efetivo de trabalho (horas).

4.4.2 Processamento da imagem de satélite

Inicialmente foi adquirido um par de imagens estereoscópicas do satélite *WorldView-2* para obtenção do mapa de uso da terra da área estudada, do mapa de curvas de nível e do TIN (*Triangulated Irregular Network* - Rede de Triângulos Irregulares).

Na Tabela 3 são apresentadas as especificações técnicas da imagem *WorldView-2* utilizada no estudo.

Tabela 3. Especificações da imagem *WorldView-2*.

Imagem Estereoscópica
Data de obtenção: 27.06.2011
Resolução Espacial: 0,50 m
Resolução radiométrica: 16 bits por pixel
Banda Pancromática: 450 – 800 nm
Escala visual (zoom máximo) de 1: 500
Escala Cartográfica de 1: 5.000 depois de ortorretificada
Ângulo máximo de visada: +/- 45” off-nadir

De posse das imagens do satélite *WorldView-2*, procedeu-se a obtenção de 16 pontos de controle planialtimétricos, em campo, ao longo de toda a área de estudo, realizado com uso de um GPS da marca Leica, modelo SR20 com fase L1 (Figura 8).

Tal procedimento permitiu ortorretificar a imagem de satélite e assim, gerar o mapa topográfico da área, onde foram obtidas as curvas de nível do terreno, com equidistância de 10 metros, por meio da estereorestituição de pares estereoscópicos da imagem de satélite.

O processamento da imagem de satélite, incluindo a correção geométrica e a compilação das curvas de nível foram realizadas pela empresa, utilizando os pontos de controle coletados em campo.



Fonte: Leica.

Figura 8. GPS Leica SR20 utilizados na coleta de pontos de controle planialtimétrico.

A partir das isolinhas de nível com equidistância de 10 metros (Figura 9), foi elaborado o modelo digital do terreno para a variável Z altimétrica, do tipo Grade Triangular Irregular (TIN), para a área de estudo. Isso porque a grade irregular representa mais fielmente terrenos declivosos. A seguir, a grade triangular foi transformada em uma grade regular com resolução de 10 por 10 metros. Posteriormente foi gerado o MDT para a variável Z - declividade em graus, o qual foi fatiado em seis classes de declividade, sendo elas: 0 a 7°; 8 a 14°; 15 a 20°; 21 a 30°; 31 a 44° e acima de 45°.

De posse do TIN, foram gerados o mapa de elevação e o mapa de declividades da área estudada.

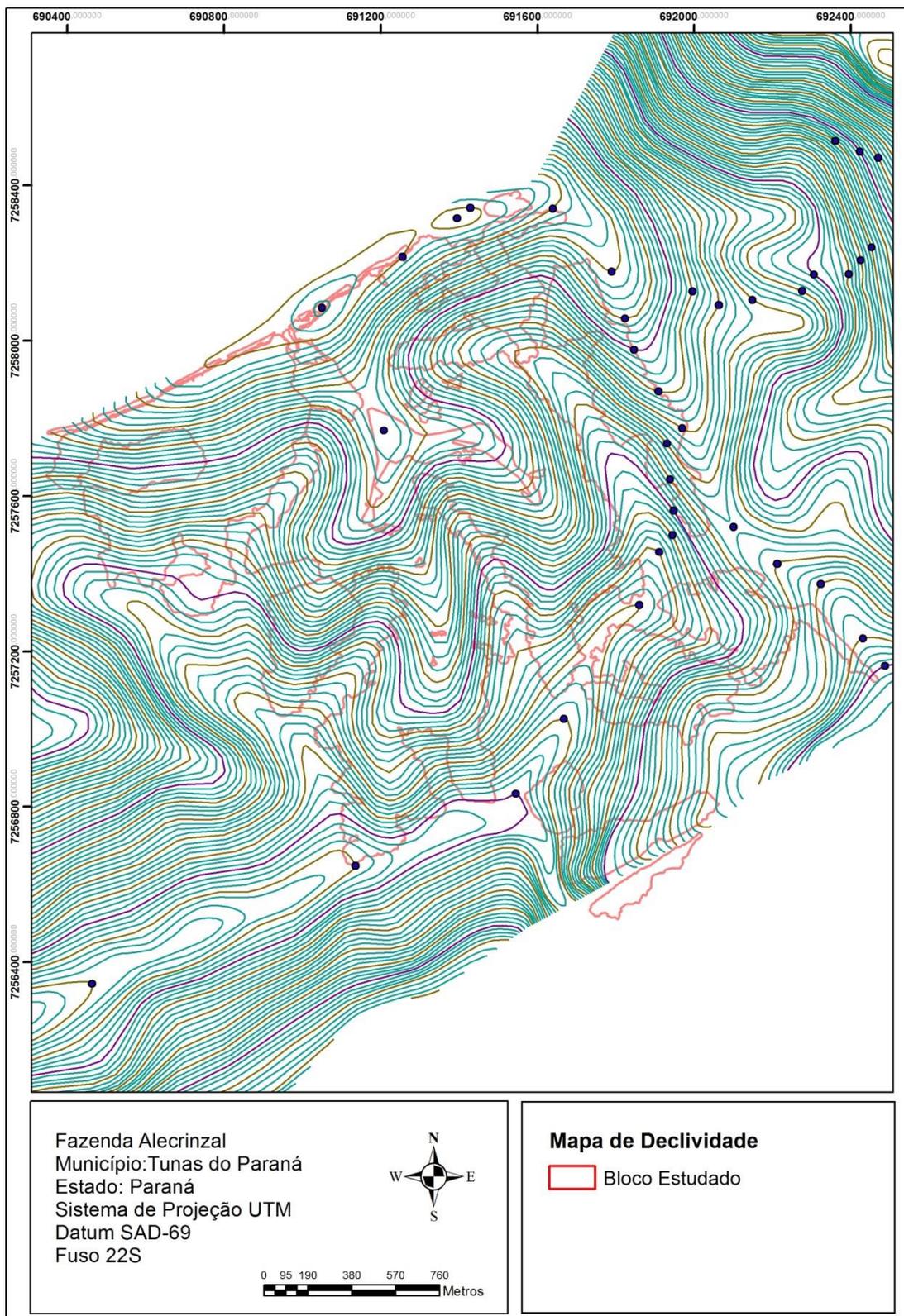


Figura 9. Isolinhas de nível com equidistância de 10 metros.

4.5 Preparação dos dados da área de estudo

4.5.1 Estratificação das áreas de colheita

A área de estudo foi estratificada em diferentes classes de declividade, a partir de uma amostragem realizada nos eitos onde foi realizada a colheita florestal, com medição da declividade utilizando clinômetro digital, marca *Haglof*, em intervalos de distâncias de 50 metros ao longo das faixas de extração de madeira.

A partir da Rede de Triângulos Irregulares, do número de amostras de ciclos operacionais coletados, das medições de declividade realizadas em campo e testes estatísticos, a área de estudo foi estratificada nas seguintes classes de declividade ($d \leq 20^\circ$, $20^\circ < d \leq 30^\circ$, e $> 30^\circ$), visando o posterior uso dos referidos dados na criação dos modelos matemáticos a serem utilizados para alocação das torres.

Com o objetivo de delimitar e quantificar as áreas a serem colhidas pelos diferentes sistemas de colheita de madeira utilizados pela empresa: *harvester + forwarder*, motosserra + guincho arrastador e motosserra + sistema de cabos aéreos, foi realizada uma segunda estratificação da área de estudos, considerando a declividade, utilizando a Rede de Triângulos Irregulares e as ferramentas do *software* ArcGIS. Desta forma, as classes de declividade mapeadas na área de estudo foram 0 a 7°; 8 a 14°; 15 a 20°; 21 a 30°; 31 a 44° e acima de 45°.

Posteriormente foram alocados os sistemas de colheita conforme a declividade e quantificado para cada sistema de colheita o número de horas-máquina necessárias, o volume a ser colhido e a produtividade média para cada sistema de colheita de madeira.

Em seguida, avaliou-se a operação de extração de madeira com o sistema de cabos aéreos, determinando o número de horas-máquina, a área colhida, o volume extraído e a produtividade nas diferentes classes de declividade de 0 a 7°; 8 a 14°; 15 a 20°; 21 a 30°; 31 a 44° e acima de 45° e nas distâncias de extração de 0 a 200, 201 a 400, 401 a 600, 601 a 800 e > 801 m.

Na sequência, os dados espaciais obtidos foram reunidos em um banco de dados para a realização de análises e sua aplicação como ferramenta de apoio no planejamento da colheita de madeira.

4.5.2 Definição das áreas a serem colhidas com o sistema de cabos aéreos

Utilizando as ferramentas do SIG, foi sobreposta uma malha de pontos com equidistância de 10 x 10 m sobre a área correspondente aos talhões com o plantio de Pinus. Tal dimensão foi definida considerando o volume de dados final, o tempo necessário para o processamento dos dados e a potência dos computadores utilizados para o processamento dos dados.

Cada ponto que compõe a malha foi definido como uma unidade de célula. Sendo assim, para cada célula foram determinados os atributos: volume médio de madeira (m³); as coordenadas X, Y e Z (Figura 10) por meio do Modelo Digital do Terreno; distância entre cada célula e os potenciais pontos de torre. Em seguida, foram estimados os atributos de produtividade da máquina e os tempos consumidos para a retirada da madeira em cada célula.

Estas informações foram agrupadas em um banco de dados no Excel e foram utilizadas para a construção dos modelos para alocação das torres para colheita de madeira utilizando cabos aéreos.

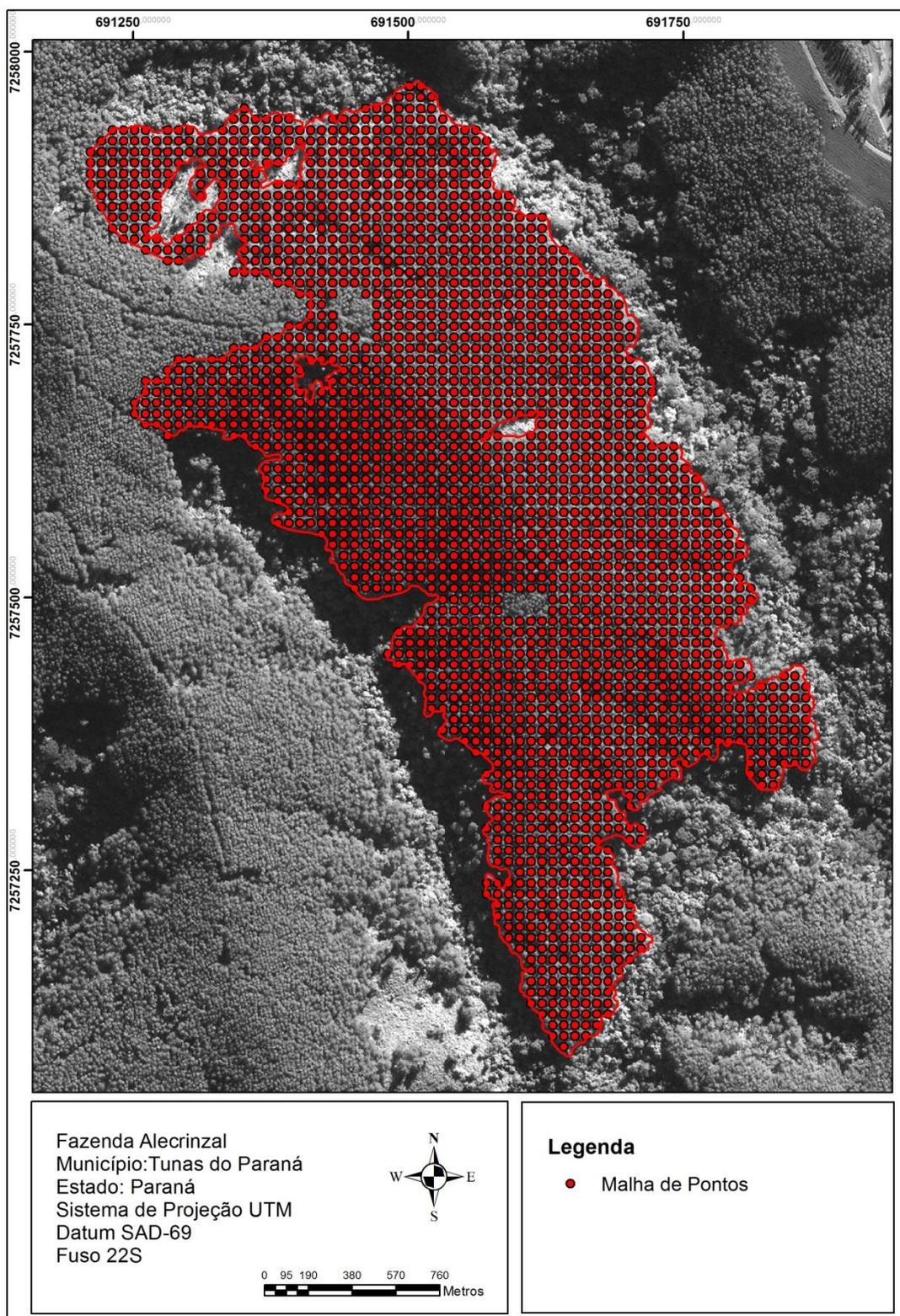


Figura 10. Carta imagem ilustra a malha de pontos criados sobre a área de estudo.

4.5.3 Definição dos potenciais pontos de instalação do sistema de cabos aéreos

Foram definidos em campo os potenciais pontos para alocação de torres, com o auxílio do mapa topográfico da área de estudo e os conhecimentos de um dos colaboradores da empresa, o qual faz parte da equipe de logística, responsável pelo processo de instalação das torres (Figura 11).

Para tal, foram consideradas restrições operacionais como: posicionamento dos cabos de ancoragem; comprimento total do cabo mestre; características do relevo; altura da torre; número de árvores suporte; número de células abrangidas pela torre nos diferentes pontos de alocação; tempo do ciclo operacional de extração; volume de madeira a ser extraído por ciclo operacional na área abrangida pela torre; classes de declividade; elevação; presença de estradas, produtividade, distância e tempo de ciclo entre cada par i (célula real); j (localização da torre).

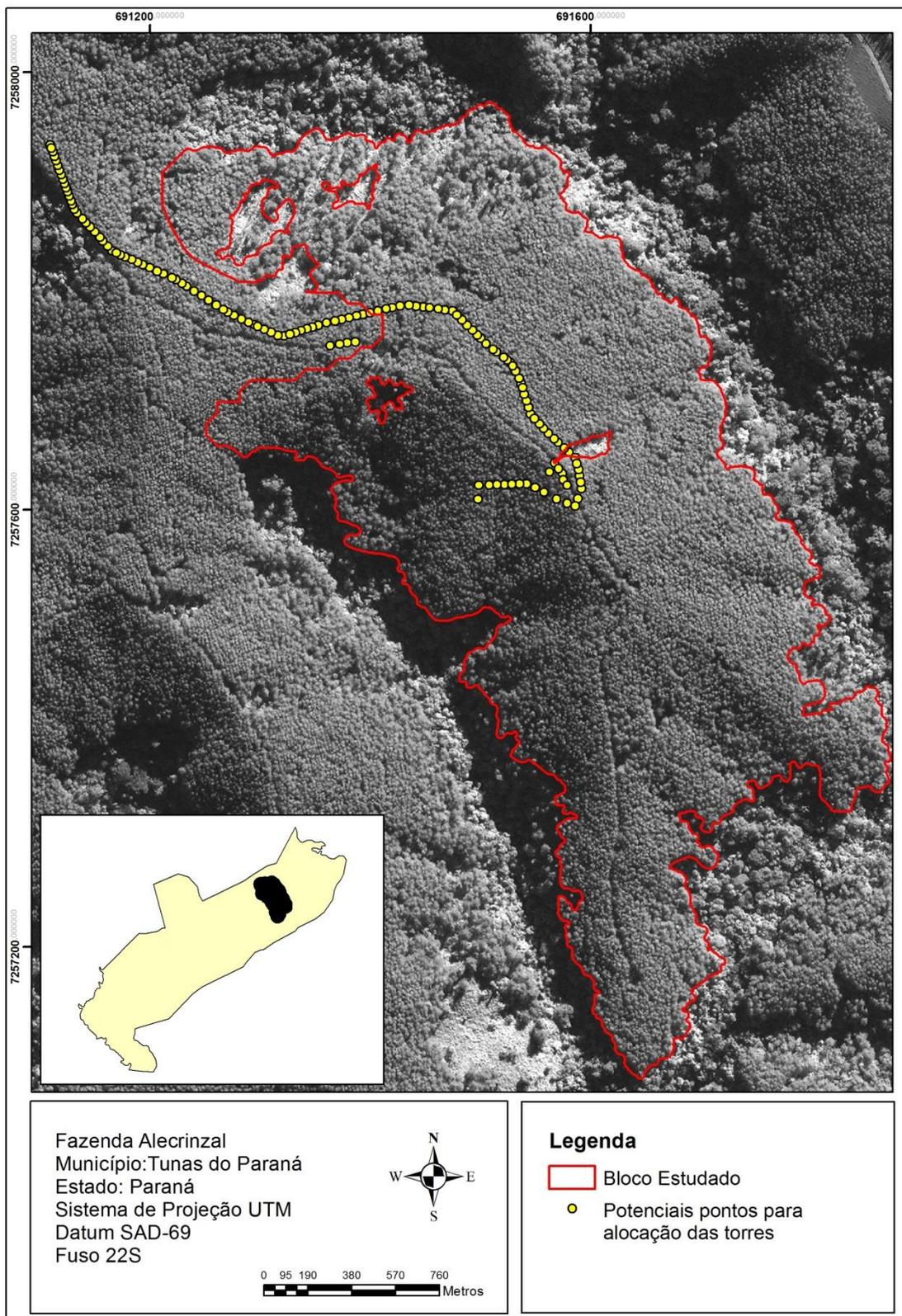


Figura 11. Carta imagem representa os potenciais pontos para instalação do sistema de cabos aéreos em um trecho de estrada na área de estudo.

Na marcação dos potenciais pontos para alocação do sistema de cabos aéreos, procedeu-se o caminhamento por todas as estradas da área de estudo, de modo a definir os possíveis pontos, considerando as restrições operacionais estabelecidas. Os 136 pontos foram demarcados sobre a malha de estradas com o auxílio do uso de um GPS da marca Leica, modelo GS15 (Figura 12) com fase L1 e L2, com sistema GPS e GLONASS.



Fonte: Leica.

Figura 12. GPS Leica GS15.

4.6 Alocação do sistema de cabos aéreos

4.6.1 Desenvolvimento dos modelos para instalação do sistema de cabos aéreos

A técnica Programação Linear Inteira (PLI) foi utilizada com objetivo de definir a alocação ótima dos locais para instalação das torres no sistema de cabos aéreos, a partir de dois critérios: minimização do tempo do ciclo operacional de extração e minimização da distancia de extração. Outro critério para adoção de PLI é pelo fato da área de estudos ter sido dividida em células.

Para minimizar o tempo de extração de madeira, minimizar a movimentação das torres e maximizar a produtividade em função da declividade e distância de extração, foram utilizadas as respectivas funções:

Produtividade= f(distância)

Tempo de Ciclo= f(distância, declividade)

Foi determinada a distância, a declividade, o tempo do ciclo operacional e o volume para cada variável X_{ij} . Se ao multiplicar a distância ponderada pelo seno da declividade o resultado era negativo a mesma era desconsiderada automaticamente.

DP_{ij} = Distância ponderada pelo seno da declividade.

Se a declividade for negativa $DP_{ij} = 999$

Foi aplicada uma penalidade igual a 100 para cada torre utilizada, representando um custo simbólico para que esta seja desmontada e montada no próximo ponto de extração. Esta penalidade deve ser aplicada a fim de evitar que o modelo utilize todos os pontos de torre disponíveis. Assim, o modelo é limitado a selecionar os melhores pontos conforme a função objetivo utilizada e as suas respectivas restrições consideradas.

As variáveis consideradas no modelo foram:

$$X_{ij} \begin{cases} 1, & \text{se a célula } i \text{ é extraída para a torre } j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$T_j \begin{cases} 1, & \text{se a torre } j \text{ está ativa;} \\ 0, & \text{se não} \end{cases}$$

Para minimizar a distância de extração de madeira com o sistema de cabos aéreos e a movimentação do equipamento, em função da declividade, foi utilizada a seguinte função objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j (DP_{ij} * X_{ij}) + 10.000 * \sum_j (T_j) \quad (1)$$

Onde,

- i = células com madeira a ser extraída;
- j = posições potenciais das torres;

DP_{ij} = distância ponderada pelo seno da declividade entre a célula i e a posição de torre j . Se a declividade for negativa $DP_{ij} = 999$;
 X_{ij} = 1, se a madeira da célula i é extraída pela torre j ; 0, caso contrário;
 T_j = 1, se a posição potencial de torre j é utilizada; 0, caso contrário.

Para minimizar o tempo de ciclo operacional da extração de madeira utilizando o sistema de cabos aéreos, em função da declividade e distância de extração, foi utilizada a respectiva função objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j (T_{ij} * X_{ij}) + 10.000 * \sum_j (T_j) \quad (2)$$

$$X_{ij} \begin{cases} 1, & \text{se a célula } i \text{ é extraída para a torre } j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$T_j \begin{cases} 1, & \text{se a torre } j \text{ está ativa;} \\ 0, & \text{se não} \end{cases}$$

Onde,

i = células com madeira a ser extraída;
 j = posições potenciais das torres;
 T_{ij} = tempo necessário para a madeira da célula i ser levada até a torre j ;
 X_{ij} = 1, se a madeira da célula i é extraída pela torre j ; 0, caso contrário;
 T_j = 1, se a posição potencial de torre j é utilizada; 0, caso contrário.

As restrições utilizadas no sistema foram:

1. Cada célula i manda madeira para uma única torre j .

$$\sum_j X_{ij} = 1$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

2. T_j é uma variável binária que pode valer 0 ou 1. Portanto, essa restrição é uma restrição que faz com que nenhum volume seja colhido se a torre T_j estiver desativada ($T_j = 0$) e permite que até 10.000 m³ sejam colhidos se a torre T_j estiver ativada ($T_j = 1$).

$$\sum_i \leq 10.000 T_j$$

$$j = 1, 2, \dots T$$

Os modelos desenvolvidos foram aplicados em áreas de plantios de Pinus, equivalentes a 132,03 hectares. Foram comparados dois cenários contendo 136 pontos possíveis para a alocação das torres, para um conjunto de oito máquinas a serem utilizadas na operação de colheita de madeira com cabos aéreos.

As coordenadas geográficas dos potenciais pontos de instalação do sistema de cabos aéreos, as informações referentes às células que compõem a malha de pontos, como coordenadas geográficas, volume de madeira (m³), área (m²), juntamente com as informações referentes ao relevo da área de estudo e dados coletados em campo sobre a operação de extração de madeira com cabos aéreos foram tabeladas no *software* Excel e analisados por meio do *software* LINGO.

O *software* LINGO busca as informações nas planilhas do *software* Excel, faz a leitura e a interação entre os dados, apontando as melhores soluções para o problema de planejamento, representando as soluções nas formas gráfica e numérica em planilhas do Excel.

Nesta etapa são realizadas simulações de diferentes cenários para alocação dos pontos de torre, de forma a obter a melhor disposição dos pontos que otimize a operação de extração de madeira e proporcione a cobertura da maior área de extração possível com o mínimo de mudanças do equipamento.

Na sequência, os resultados obtidos são espacializados e analisados no *software* de modelagem espacial, a fim de otimizar a operação de planejamento da extração de madeira em regiões montanhosas.

O modelo desenvolvido apresenta funções objetivo simples. Epstein *et al.* (2006) utilizaram complexas equações para a determinação dos locais ideais para alocação de torres, associando a programação linear inteira mista ao SIG, a fim de solucionar problemas como a

minimização do custo de instalação e operação de máquinas de colheita, construção de estradas e de transporte de madeira.

Devido à magnitude do problema, o estudo do sistema de alocação de torres para colheita de madeira com cabos aéreos foi reduzido, sendo realizado apenas para uma porção da área de estudo contendo plantios florestais, com área igual a 23,5 ha.

4.6.2 Modelagem Espacial

Através da interpretação visual da imagem do satélite *WorldView-2* foi realizado o mapa digital de uso da terra, delimitando os talhões de pinus a serem colhidos, a rede hidrográfica, a rede de estradas, as áreas de reserva legal e de preservação permanente.

Na interpretação visual das feições foi utilizado o *software* ArcGIS. Foram aplicados os elementos de interpretação (tonalidade, cor, forma, tamanho, textura, sombra, padrão, adjacências e localização geográfica) na imagem de satélite, a fim de gerar informações sobre a área estudada.

Para os resultados obtidos através dos modelos matemáticos, os mesmos são espacializados e analisados no *software* de modelagem espacial ArcGIS, a fim de selecionar o melhor cenário para alocação das torres, considerando aspectos técnicos, operacionais e ambientais.

Ao final, foi construído o banco de dados no SIG contemplando todas as informações geradas para os cenários de alocação de torres, além dos mapas compilados: mapas de uso e ocupação da terra, delimitação das áreas contendo plantios florestais, mapeamento das classes de declividade predominantes na área estudada, determinação das áreas a serem colhidas de acordo com o sistema de colheita empregado pela empresa, com base na declividade e determinação das distâncias de extração. Sendo então essas informações utilizadas para apoiar a tomada de decisões e otimizar o planejamento das operações de colheita florestal utilizando cabos aéreos.

4.6.3 Fluxograma dos procedimentos metodológicos

O fluxograma apresentado na Figura 13 ilustra os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa.

A partir dos dados coletados em campo foram criados os modelos de previsão para a otimização da alocação do sistema de cabos aéreos com uso das ferramentas de Pesquisa Operacional e Sistemas de Informações Geográficas. Como produto final foram obtidos os mapas de uso da terra da área de estudo e um modelo de planejamento contendo os melhores pontos para alocação de torres em dois cenários distintos.

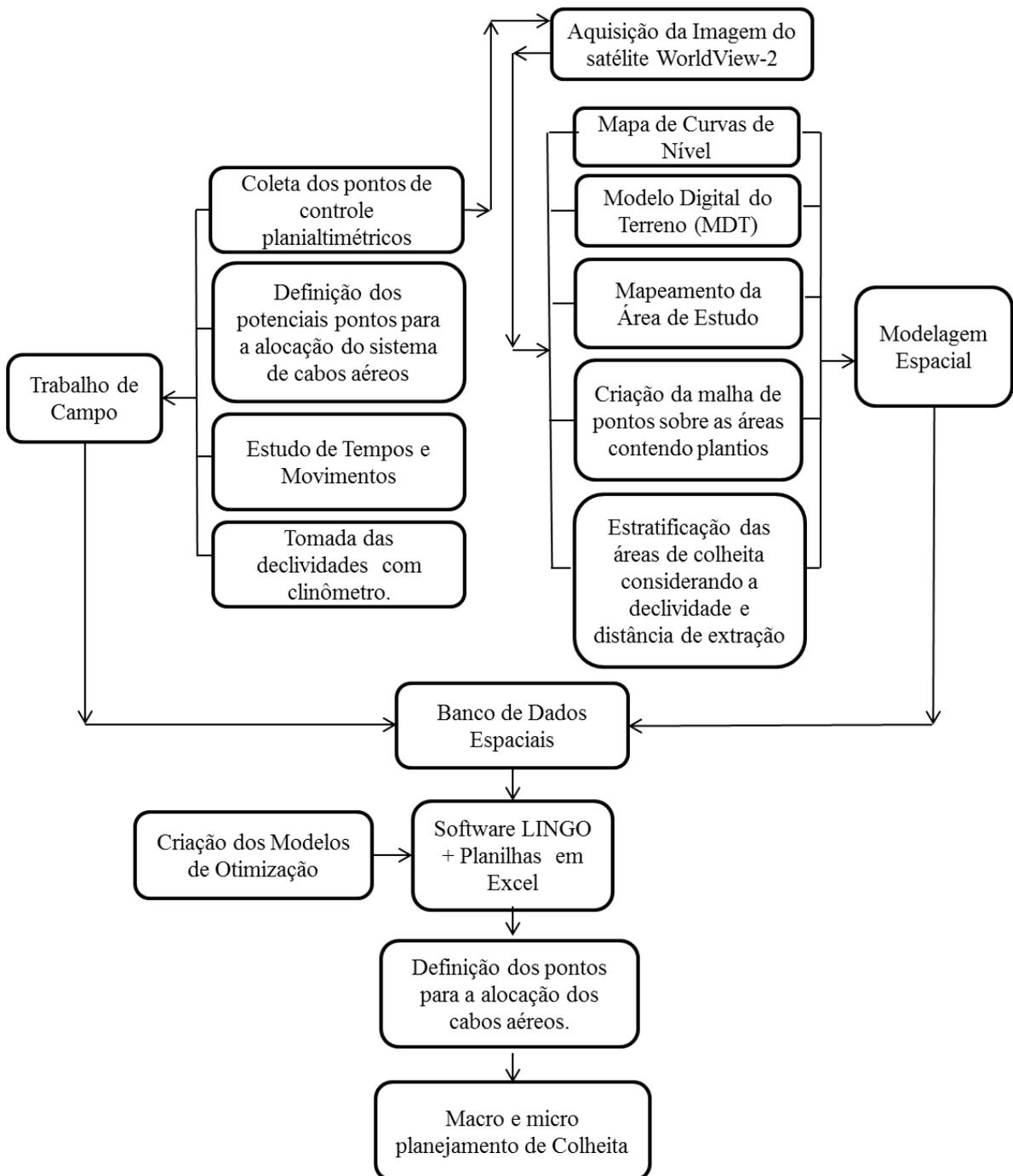


Figura 13. Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados no estudo.

4.7 Análises Estatísticas

O delineamento estatístico utilizado neste estudo foi o de experimento inteiramente casualizado. Os dados referentes à produtividade e o tempo do ciclo operacional do sistema de cabos aéreos nas diferentes classes de distância de extração foram submetidos ao teste de *Bartlett*, para verificação da homogeneidade das variâncias, ao nível de 95 % de confiança.

Em seguida foi realizada a ANOVA, para determinar se as médias avaliadas apresentaram diferenças estatisticamente significativas com respeito a uma ou mais das médias restantes, e comparadas às médias pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5 %, de modo a comparar a produtividade do equipamento e o tempo de ciclo operacional nas diferentes distâncias de extração.

Foram ainda realizadas análises de regressão, por meio do uso de componentes principais, a fim de verificar a relação entre as variáveis distância de extração, declividade, tempo do ciclo operacional (restrições) e a produtividade do sistema de cabos aéreos. As variáveis que apresentaram maior índice de correlação foram incorporadas no modelo desenvolvido para a alocação de torres, sendo avaliadas então como variáveis de restrição.

A escolha do modelo foi feita por meio da avaliação estatística das equações de regressão desenvolvidas, considerando o coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj), o erro padrão da estimativa absoluto e em percentagem (S_{yx} e S_{yx} %), o valor de F, e a análise gráfica dos resíduos em percentagem. Os modelos que apresentaram os melhores ajustes foram aplicados para estimar a variação da produtividade do sistema de cabos aéreos e o tempo do ciclo operacional ao longo das diferentes distâncias de extração. Por fim, foram utilizados para subsidiar a construção dos modelos para alocação das torres, na etapa subsequente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Aplicações do SIG no planejamento da colheita florestal

O Sistema de Informações Geográficas foi utilizado para compilar os mapas a fim de otimizar e apoiar o planejamento das operações de colheita florestal.

5.1.1 Delimitação das áreas florestais

Por meio da interpretação visual da imagem pancromática do Satélite *WorldView-2* que recobre a área estudada (Figura 14), foi possível discriminar as classes de uso e ocupação da terra, as quais foram: floresta nativa, floresta plantada, campos e estradas.

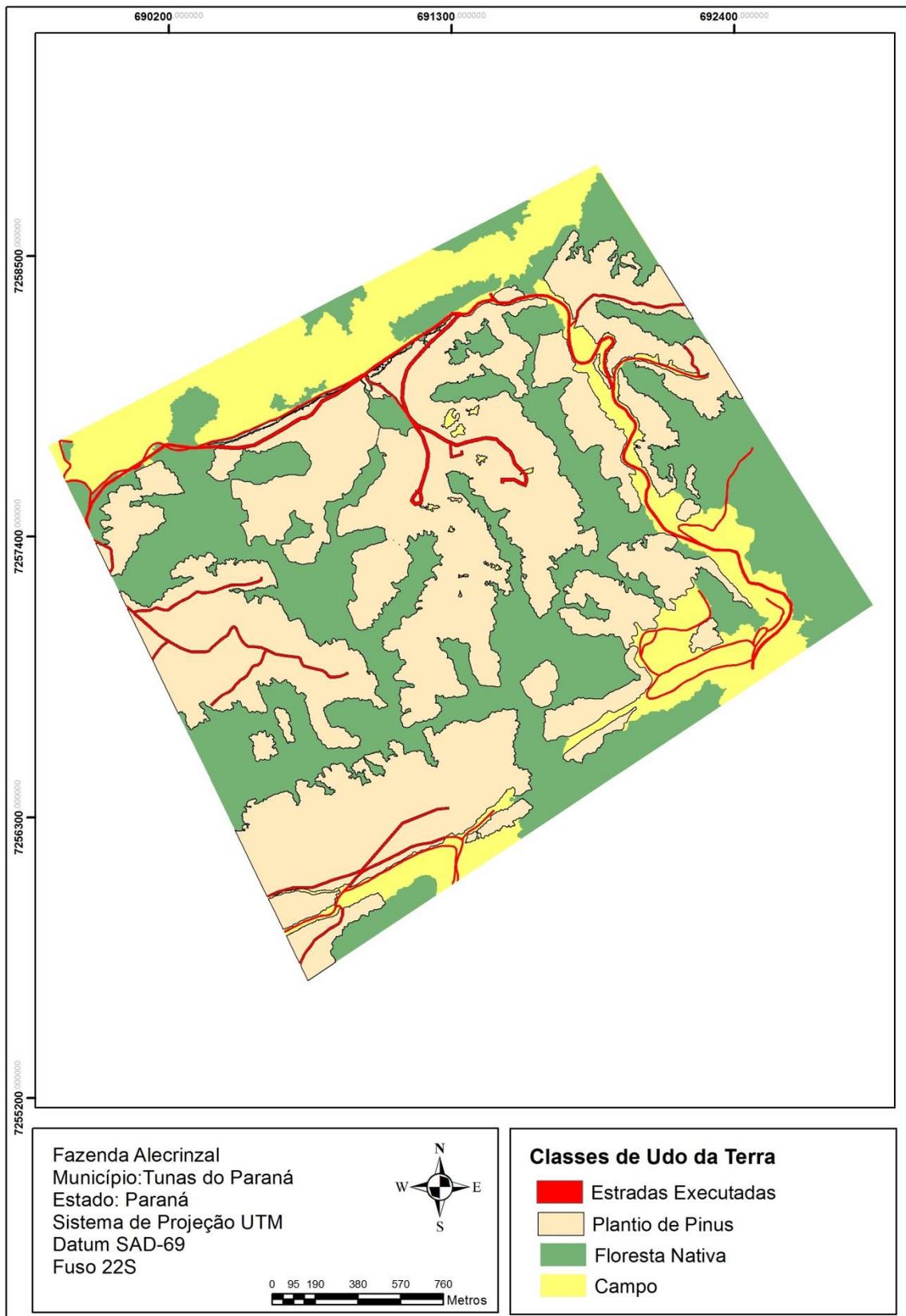


Figura 14. Mapa de uso da terra da área de estudos com suas respectivas classes de uso e ocupação da terra.

A área de estudo corresponde a 548,03 hectares, sendo que desse total, 196,40 ha estavam recobertos por floresta nativa; 246,87 ha por plantios de Pinus; 88,94 ha com campos e 15,82 ha com estradas.

Em relação às estradas de uso florestal, considerando uma largura média de 10 m, ressalta-se que a densidade de estradas era de 28,8 metros lineares/hectare. A baixa densidade de estradas em áreas onde é empregado o sistema de cabos aéreos é justificada pelas longas distâncias de extração que este equipamento pode alcançar.

Na Figura 15 é apresentada a distribuição percentual das classes de uso e cobertura do solo na área de estudo.

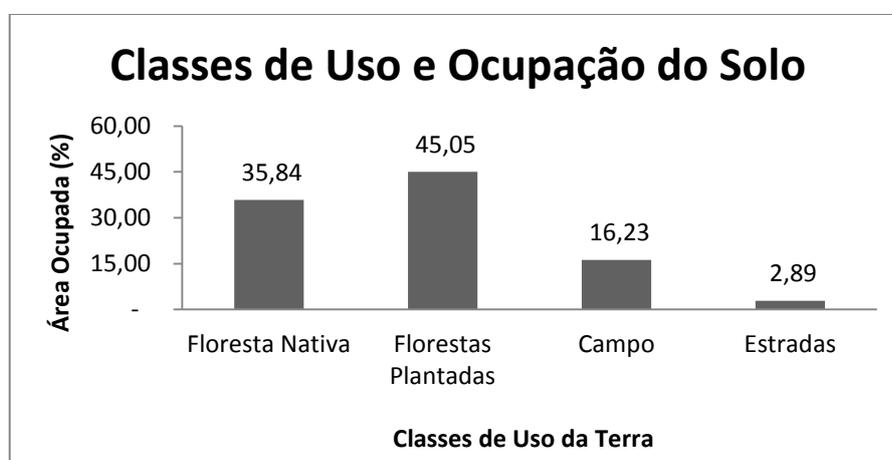


Figura 15. Distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo da área de estudo.

A interpretação visual da imagem pancromática do Satélite *WorldView-2* apresentou como maior dificuldade a compreensão dos limites entre as diferentes classes de uso e ocupação da terra, tornando a delimitação destes mais complexa, acarretando um maior tempo para a realização da interpretação da imagem. Entretanto, a classificação visual tem sido mais utilizada em relação aos métodos de classificação de imagens automático e semiautomático para imagens de alta resolução espacial, devido a menor confusão entre classes e também porque a classificação orientada ao objeto não é recomendada para imagens com alta resolução espacial.

A área de estudo contemplando os blocos com plantios de pinus que foram posteriormente utilizados para realização do planejamento da colheita de madeira, objeto principal deste estudo, correspondeu a 132,03 ha (Figura 16).

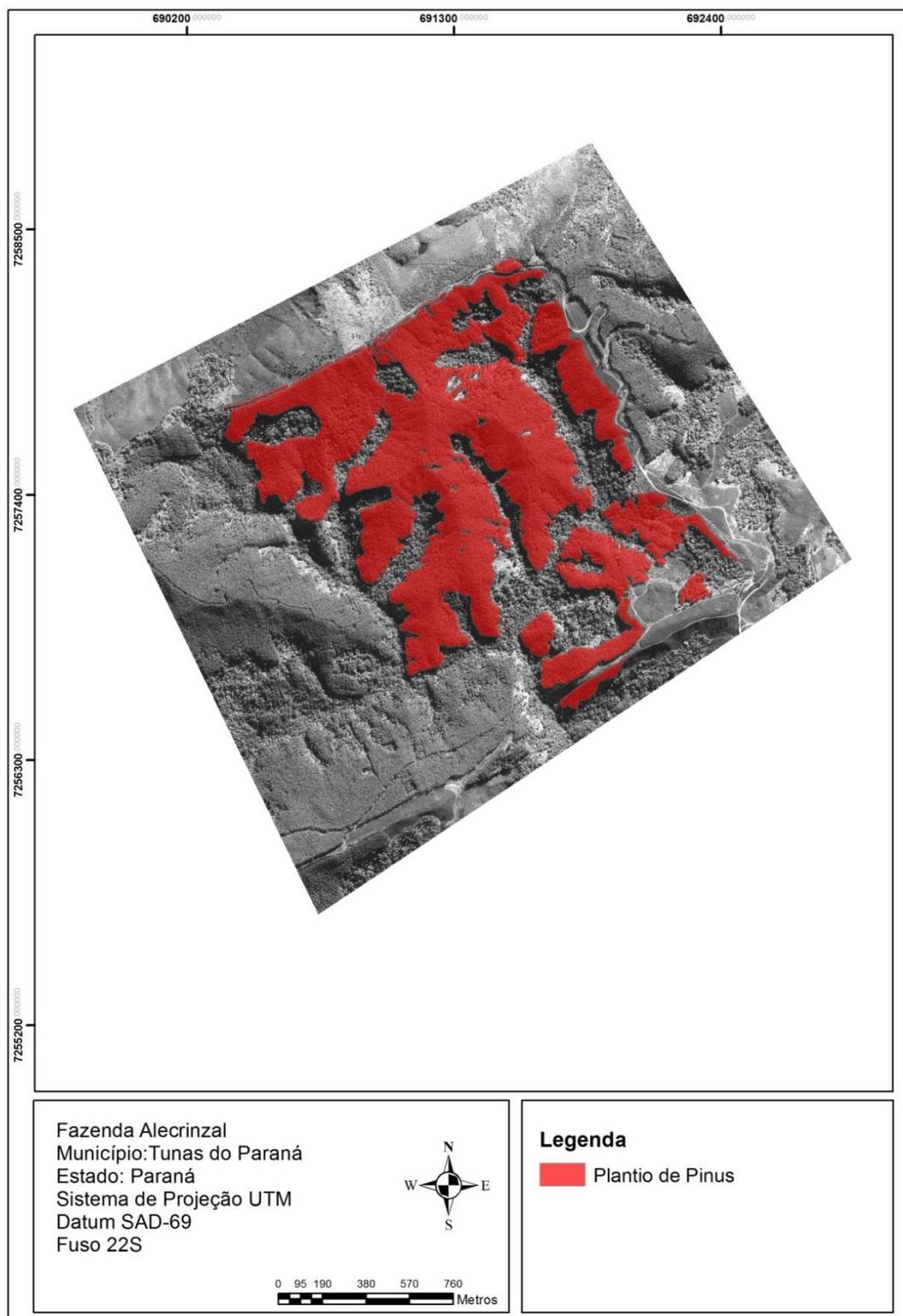


Figura 16. Carta imagem demarcando a área de estudo selecionada e delineada através do programa ArcGIS 10.1, para a realização do estudo do planejamento da colheita florestal.

5.1.2 Determinação das declividades

A declividade do terreno é uma variável de grande importância no planejamento e também um fator limitante na determinação do sistema de colheita de madeira a ser utilizado.

Segundo Machado (2008), em relevos com inclinações inferiores a 11,3° (20%) é indicado, por exemplo, o uso do conjunto composto por *harvester + forwarder* e para a colheita da madeira e acima de 16,7° (30%) de inclinação é indicado o uso do sistema de cabos aéreos. Epstein *et al.*, (2006) afirmam que o sistema de cabos aéreos é usado principalmente para áreas de colheita com declividade acima de 30%. Pires (1997) indica o uso de tratores agrícolas com guincho acoplado, para declividades superiores a 35,9° (20°), enquanto Maran *et al.* (2012) aponta o uso de *chocker skkider* em declividades superiores a 60%. Já Kühmaier e Stampfer (2010) sugerem o uso de *forwarder* com cabo em declividades inferiores a 60%.

A Figura 17 ilustra a estratificação da área conforme as classes de declividade mapeadas, enquanto na Tabela 4 é apresentada a quantificação destas áreas, em hectares, dentro das diferentes classes de declividade, sendo também uma informação importante para o planejador florestal.

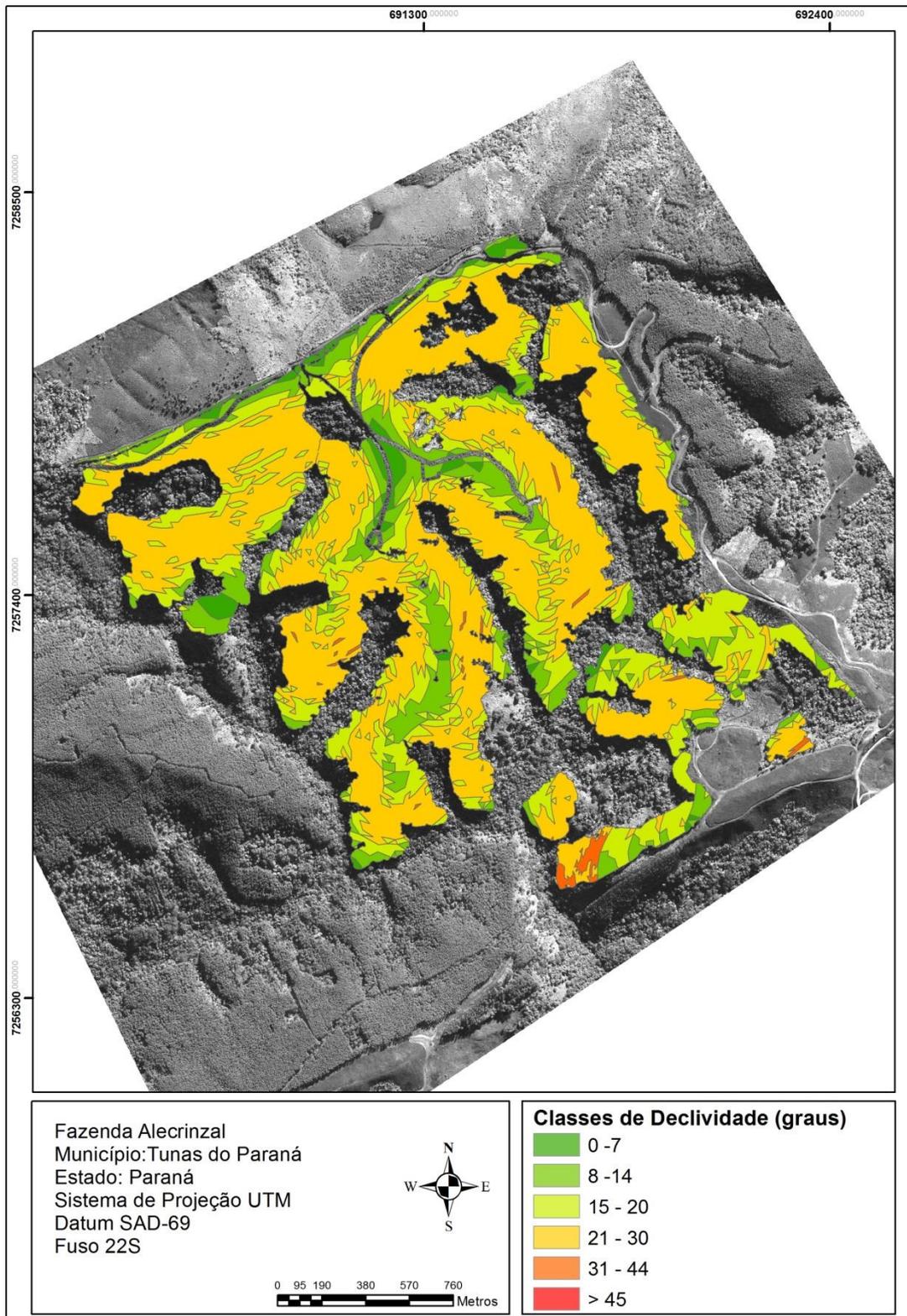


Figura 17. Carta imagem apresenta as classes de declividade observadas na área de estudo.

Como pode ser observado, grande parte da área estudada apresentou declividades elevadas, pertencentes às classes de 15 a 20° e 21 a 30°, correspondendo a 28,51% e 54,85% da área total, respectivamente, sendo recomendada a colheita de madeira com uso do sistema de cabos aéreos.

Tabela 4. Quantificação da área de estudo nas diferentes classes de declividade.

Declividade (graus)	Unidade de Área Porcentagem (%)
0 – 7	2,69
8 – 14	13,05
15 – 20	28,51
21 – 30	54,85
31 – 44	0,89
> 45	0,004

Para as áreas com declividades menos acentuadas, pertencentes às classes de declividade 0 a 7° graus e 8° a 14° que corresponderam a 2,69% e 13,05%, respectivamente, é recomendado o uso do sistema *harvester + forwarder* para a realização da colheita florestal. As áreas com declividade superior a 31% representam 0,90% da área estudada.

5.1.3 Determinação das áreas de colheita de madeira

A estratificação das áreas com florestas plantadas e a quantificação das áreas a serem colhidas contemplando os diferentes sistemas de colheita de madeira utilizados pela empresa foi realizada em função das classes de declividade mapeadas na área estudada.

A Figura 18 ilustra a alocação dos diferentes sistemas de colheita de madeira em razão da declividade, enquanto na Tabela 5 é apresentada a quantificação destas áreas, em hectares, dentro das diferentes classes de declividade. Tal informação é importante para o planejador florestal, pois auxilia no processo de tomada de decisão e na preparação da área a ser colhida, incluindo a construção das estradas de acesso de acordo com as necessidades de cada sistema, delimitação das áreas dos talhões, definição dos locais para alocação de pilhas de madeira e posicionamento das máquinas de carregamento, definição da estratégia de alocação de caminhões e dimensionamento da frota para transporte, de forma que a madeira seja transportada, evitando gargalos.

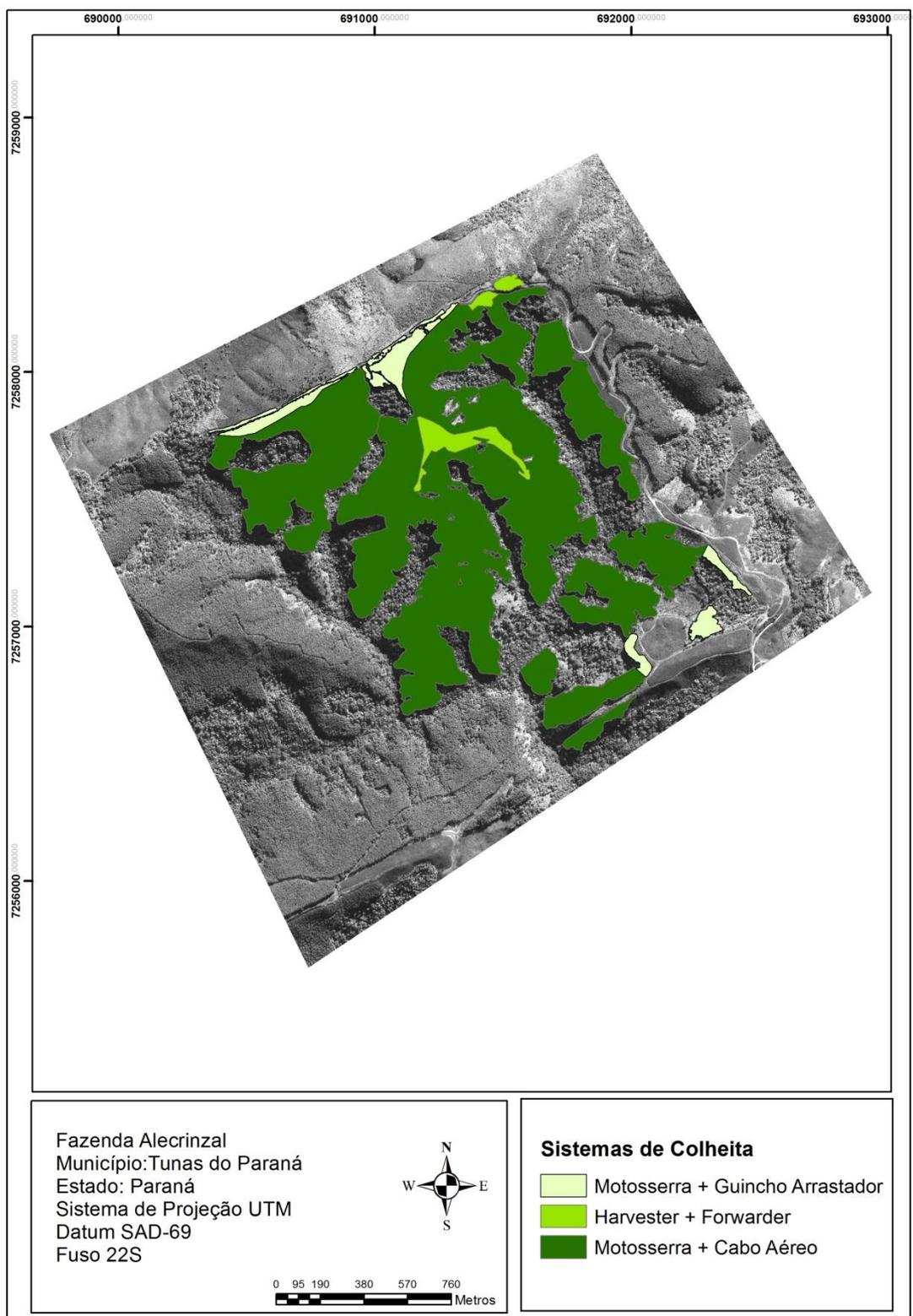


Figura 18. Carta imagem representando o macroplanejamento de colheita florestal em áreas declivosas com três sistemas de colheita de madeira utilizados pela empresa.

Essa informação é importante também para a determinação dos sistemas que serão mantidos operantes em caso de mudanças climáticas, por exemplo, elevados índices pluviométricos. Determinando, dessa forma, se os sistemas têm capacidade de atender o abastecimento da indústria, conforme a sua produtividade, número de máquinas disponíveis e dimensionamento da equipe de colaboradores da empresa.

No caso de os sistemas não serem capazes de atender, destaca-se então o importância dessas informações e do planejamento, pois a ação seguinte será acionar reforços, como o aumento da produção em outras unidades produtivas, de forma a suprir a fábrica e manter o estoque de madeira para abastecimento da mesma, garantindo a não interrupção das operações do processo fabril.

A visualização e quantificação prévia das áreas a serem colhidas permitirá ao planejador a tomada de decisões importantes, podendo, por exemplo, prever com antecedência o número de horas-máquina, a produtividade e custos da colheita de madeira com os diferentes sistemas disponíveis. Possibilitando assim, o uso racional das máquinas e equipamentos, permitindo um maior controle e eficiência das operações, aumento de produtividade e redução dos custos de produção.

Tabela 5. Quantificação das áreas a serem colhidas com os diferentes sistemas de colheita de madeira.

Sistemas de colheita de madeira	Unidade de Área	
	Hectare	Porcentagem (%)
Motosserra + Cabos Aéreos	120,16	91,01
Motosserra + Guincho Arrastador	7,65	5,79
Harvester + Forwarder	4,22	3,20

Na área estudada é possível observar que, de acordo com a declividade, o principal sistema de colheita de madeira a ser utilizado foi motosserra e cabos aéreos, sendo responsável pela extração da madeira em 91,01% da área de estudo, seguido pelo sistema composto por motosserra e guincho arrastador com a extração de madeira em 5,79% da área total, enquanto o sistema *harvester* e *forwarder* correspondeu a 3,20 % da área estudada.

Portanto, ficou evidente que em função das características da região de estudo, que possui um relevo ondulado à forte ondulado (EMBRAPA, 1999), prevalecendo às áreas com declividade elevada, sendo assim, os cabos aéreos o sistema de colheita de madeira mais viável técnica e economicamente para uso na extração de madeira nestas condições

operacionais. Nesta situação, conseqüentemente, reduz a densidade da malha viária e os custos com abertura e manutenção de estradas, reduz o esforço físico dos trabalhadores florestais, aumenta a área efetiva de plantio pela diminuição da malha viária e reduz os impactos ambientais da colheita causados nas áreas montanhosas.

É importante ressaltar que o uso do sistema composto por motosserra e guincho arrastador pode ser utilizado em condições em que há declividades elevadas, porém para distâncias de extração inferiores a 150 metros, sendo geralmente empregado em áreas de borda de talhão, localizadas próximo às estradas. Enquanto o sistema composto por *harvester* e *forwarder* é indicado para áreas planas, com declividade inferior a 20%.

Em função da área de estudo apresentar predominantemente valores elevados de declividade e conseqüentemente o sistema de cabos aéreos como sendo o principal sistema de colheita, obteve-se então a estratificação das áreas previstas para serem colhidas com cabos aéreos em diferentes classes de distância de extração (Figura 19), de modo a gerar informações que possam auxiliar o planejamento das operações florestais, além de permitir identificar a influência da distância de extração na produtividade e custos da colheita de madeira.

A estratificação da área em classes de distância foi realizada a partir das estradas aonde foram alocados os potenciais pontos para instalação das torres para colheita com cabos aéreos.

Segundo diversos autores (Seixas, 2008; Oliveira *et al.*, 2006), a produtividade e custos da colheita de madeira possui uma relação direta com a distância de extração, sendo o seu conhecimento prévio de grande importância para o planejador, auxiliando-o na tomada de decisões com vistas à execução das operações com maior produtividade e menor custo de produção.

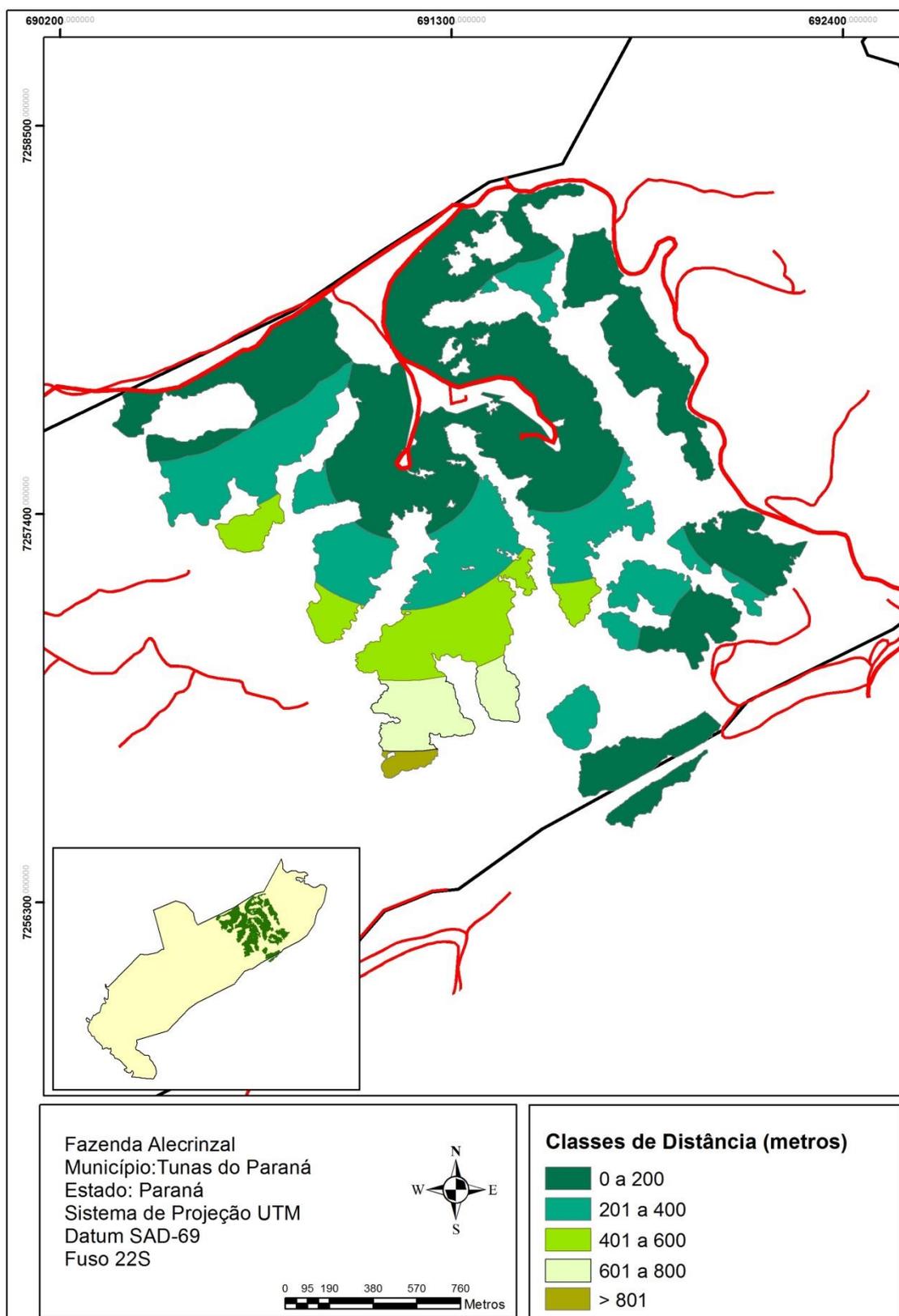


Figura 19. Carta imagem mostrando a estratificação das áreas de colheita de madeira com o sistema de cabos aéreos nas diferentes classes de distância de extração.

A Tabela 6 apresenta a quantificação das áreas de colheita de madeira disponíveis para uso do sistema de cabos aéreos nas diferentes classes de distância média de extração.

Tabela 6. Quantificação das áreas de colheita de madeira com o sistema de cabos aéreos nas diferentes classes de distância de extração.

Classe de Distância (m)	Unidade de Área	
	Hectare	Porcentagem (%)
0 a 200	69,0	57,43
201 a 400	32,28	26,86
401 a 600	12,22	10,17
601 a 800	5,86	4,88
Acima de 801	0,8	0,66

As classes de distância de extração superiores a 400 m representam a menor porcentagem da área florestal a ser colhida (Tabela 6). Isso implica na redução da utilização de árvores suporte ao longo do eito de extração. Dessa forma, as operações de montagem e remontagem das torres serão realizadas de forma mais rápida, reduzindo assim os tempos improdutivos do sistema.

A classe de distância de extração equivalente a 200 m representou 57,43% da área total a ser colhida com o uso do sistema de cabos aéreos, seguido pela distância de 201 a 400 m com 26,86% da área total, enquanto as demais áreas situaram-se nas classes com valores superiores a 400 m (Tabela 6).

Tal resultado pode ser atribuído às características geológicas, que conferem a esta região um relevo fortemente ondulado, que é predominante na área estudada, a rede hidrográfica bastante densa e a concentração da vegetação nativa nas áreas de fundo de vale, acompanhando e protegendo os corpos hídricos. Sendo assim, a área aproveitável disponível é reduzida.

Estas condições implicam, para o sistema de cabos aéreos, em uma menor área de cobertura a ser realizada pelas torres, e conseqüentemente a maior movimentação do equipamento ao longo da área a ser colhida.

A menor distância de extração afetará o rendimento do sistema de colheita de madeira, fazendo com que ocorra o aumento da produtividade e assim a redução do tempo do ciclo operacional, reduzindo também o tempo de permanência da torre num mesmo ponto. Por outro lado, com a colheita da área sendo realizada em um menor tempo, acarretará em um maior deslocamento da torre ao longo da área a ser colhida e conseqüentemente aumentará o

tempo improdutivo do sistema, considerando que a torre ficará inoperante por mais tempo devido à necessidade de um maior número de montagens e desmontagens dos equipamentos.

A movimentação da torre afeta também a produção, fazendo com que ocorra uma redução da mesma, em decorrência do tempo em que a operação do sistema será interrompida para que a estrutura seja deslocada para o próximo ponto, aonde será realizada a colheita.

O custo desta operação será afetado principalmente pelo deslocamento da torre. O tempo que o equipamento permanece inoperante, devido à necessidade de montagem e desmontagem, acarreta, em alguns casos, o aumento dos custos da operação.

A mudança de posição da torre com objetivo de ocupar mais pontos, causada pela menor distância de extração, exige uma malha de estradas mais densa, representando a perda de área produtiva e maiores custos com a construção e manutenção de estradas, além de maior possibilidade de causar impactos no meio ambiente. Esta condição ocasiona também uma maior movimentação de terra provocada pelas operações de corte e aterro, potencializando os processos erosivos ao longo da malha de estradas.

Lopes *et al.* (2013) ao estudar a extração de madeira de *Pinus taeda* L., em região montanhosa, com uso de um sistema de cabos aéreos da marca Koller, modelo K-602, verificou que a produtividade do equipamento diminuiu com o aumento da distância de extração, variando de 31,21 m³ h⁻¹ na classe de 0 a 100 metros a 14,15 m³ h⁻¹ para a classe 300 a 400 metros de distância de extração. Já Faria (2009), ao estudar a extração de madeira utilizando cabos aéreos em áreas com declive acentuado, verificou que a produtividade desta operação varia de 14,20 a 7,69 m³ h⁻¹, para o intervalo de distância entre 50 e 350 metros, respectivamente.

Os resultados apresentados por Lopes *et al.* (2013) e Faria (2009) evidencia uma redução significativa na produtividade da operação de extração com uso do sistema de cabos aéreos com o aumento da distância de extração. Por outro lado, nas maiores distâncias de extração, existe uma menor mudança de torre, podendo, em alguns casos, acarretar em menores custos finais de produção e investimentos na malha de estradas, evidenciando, portanto, a necessidade de um planejamento prévio das operações de colheita da madeira.

Para obter maior produtividade na extração de madeira, pode-se relacionar, basicamente, duas variáveis que estão intrinsecamente ligadas à operação, ou seja, a atividade anterior (corte) e a posterior (onde será colocada a madeira - pátio de estocagem). Nesse contexto, é importante conhecer a distância média de extração (DME), para poder programar

os custos da operação, e, conseqüentemente, os rendimentos potenciais a serem obtidos (MALINOVSKI, 2007).

Segundo Souza e Pires (2009), todas as variáveis provocam algum tipo de impacto na produtividade e custos dos equipamentos, sendo a distância de extração a variável mais relevante na atividade de colheita, pois quanto maior a distância entre o local onde as árvores estão e a margem da estrada, para onde devem ser transportadas, menor é o número de viagens realizadas durante o período de trabalho.

Tal situação evidencia a necessidade de estudos que definam o tamanho ideal dos talhões florestais, possibilitando obter a distância ótima de extração, a redução da movimentação da torre durante a execução da colheita de madeira e a otimização do fluxo de trabalho das máquinas, aliando a estas variáveis o custo de extração e a densidade de estradas.

5.2 Estimativa do volume, número horas-máquina e produtividade da colheita de madeira

Foi realizada uma avaliação dos diferentes sistemas de colheita de madeira empregados pela empresa, para determinação da área colhida, do volume total, do número horas-máquina e da produtividade média dos sistemas de colheita de madeira utilizados pela empresa, na área de estudo com dimensão de 132,03 (Tabela 7).

Tabela 7. Avaliação dos diferentes sistemas de colheita utilizados pela empresa.

Sistemas de colheita de madeira	Variáveis				
	Área (ha)	Volume (m ³)	Produtividade (m ³ h ⁻¹)	Horas-máquina (h)	Dias Previstos
Motosserra + Cabos Aéreos	120,16	66.893,07	16,69	4.007,97	501
Motosserra + Guincho Arrastador	7,65	4.258,76	7,50	567,83	71
Harvester + Forwarder	4,22	2.349,27	60,00	39,15	5

Os valores de produtividade apresentados na tabela acima representam a produtividade das máquinas utilizadas na operação de extração de madeira, sendo elas cabo aéreo, guincho arrastador e *forwarder*. Estes valores estão sujeitos a variações, pois dependem da produtividade das máquinas utilizadas na etapa de corte.

Para o sistema motosserra + cabos aéreos, o volume extraído correspondeu em 66.893,07 m³ em uma área de 120,16 ha. Considerando uma produtividade média de 16,69 m³

h^{-1} , o tempo necessário para a realização da colheita da madeira nesta área foi estimado em 501 dias úteis de trabalho. O sistema motosserra + guincho arrastador realizou a colheita de 7,65 ha e 71 dias úteis, trabalhando com uma produtividade média de $7,6 m^3 h^{-1}$. O sistema *harvester + forwarder* foi responsável pela colheita de 4,22 ha, tendo sido realizada em 5 dias úteis, extraíndo um volume de madeira correspondente à $2.349,27 m^3$, considerando uma produtividade média de $60 m^3 h^{-1}$, para distâncias curtas.

Na Tabela 8 é apresentada a área colhida, o volume extraído e a produtividade do sistema de cabos aéreos nas diferentes classes de distância de extração (0 a 200, 200 a 400 e 400 a 600 m) (Tabela 8) para o bloco aonde foi desenvolvido o trabalho de alocação de torres, com área equivalente a 23,5 ha.

Tabela 8. Avaliação do sistema de cabos aéreos em diferentes classes de distância.

Classes de distância (metros)	Variáveis				
	Área (ha)	Volume (m^3)	Produtividade ($m^3 h^{-1}$)	Horas- máquina (h)	Dias Previstos
0 a 200	17,6	9.820,19	17,89	549	69
201 a 400	4,9	2.738,96	15,49	177	22
401 a 600	1,0	573,40	12,72	45	6

Considerando o espaçamento do plantio e os dados de inventário disponibilizados pela empresa, obteve-se um volume de madeira estimado para cada célula da malha de pontos que correspondeu a $5,567 m^3$. É importante ressaltar que a maior área e o volume de madeira a ser extraído encontra-se na distância de extração situada entre 0 e 200 m, cujo tempo estimado de extração da madeira em função da produtividade estimada do equipamento foi de 549 horas ou 69 dias úteis de trabalho.

O decréscimo da produtividade é explicado pela conformação do relevo predominante na área, em que as entradas dos talhões apresentam declives acentuados, tornando-se mais suaves a medida em que avança em direção ao interior dos talhões e torna-se novamente acentuado no fundo dos talhões.

Sendo assim, o acesso de máquinas como o conjunto *harvester + forwarder* às áreas mais planas torna-se dificultado devido à inexistência de estradas, considerando ainda a inviabilidade econômica de construção de estradas para garantir o acesso à estas áreas, justificando então a utilização do sistema de cabos aéreos para a colheita de madeira nestas áreas.

Para o mesmo bloco, foi realizada a avaliação da produtividade nas diferentes classes de declividade (Tabela 9).

Tabela 9. Avaliação da produtividade do sistema de cabos aéreos em diferentes classes de declividade.

Classe de Declividade (Graus)	Área (ha)	Área (%)	Volume (m³)	Produtividade média (m³ h⁻¹)
0 – 7	0,18	0,76	100,44	21,00
8 – 14	3,03	12,84	1.687,71	20,02
15 – 20	6,83	28,95	3.800,33	15,54
21 – 30	13,46	57,06	7.491,97	17,00
31 – 45	0,09	0,38	51,21	18,16

Na Tabela 9 é apresentada a influência que a declividade exerce no sistema de colheita de madeira, por meio da produtividade. É possível observar uma tendência de redução da produtividade da operação de extração com o aumento da declividade do terreno. Lopes *et al.* (2011) afirmam que as variáveis volume de madeira, tempo do ciclo operacional e declividade influenciam a produtividade do cabo aéreo na extração de madeira em regiões montanhosas, confirmando assim a tendência observada para os cabos aéreos, onde a declividade afeta a produtividade do sistema.

Com o aumento da declividade, a produtividade dos operadores que auxiliam na extração da madeira tende a ser afetada devido às dificuldades encontradas no deslocamento ao longo do talhão, bem como na operação de colocação das presilhas na madeira, pois a mesma encontra-se acumulada nos locais com menor elevação, dificultando o trabalho e afetando assim a operação de extração da madeira.

Na Figura 20 é espacializadas a área de acordo com as classes de declividade, sendo que aproximadamente 57% da área estudada apresenta declividade entre 21 e 30 graus.

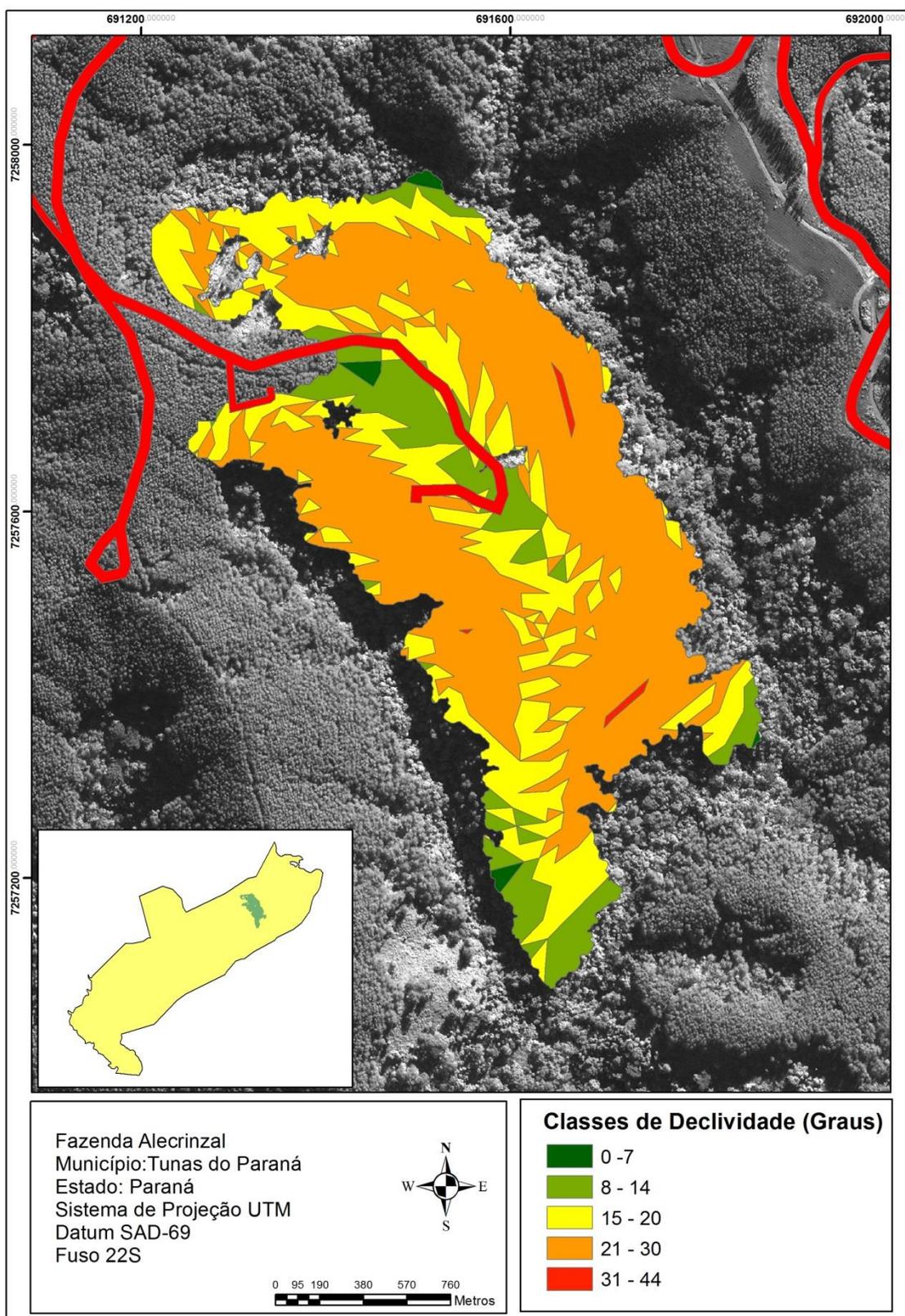


Figura 20. Carta imagem de classes de declividade

5.3 Determinação dos pontos de instalação do sistema de cabos aéreos

O desenvolvimento de técnicas para alocação do sistema de cabos aéreos para extração de madeira permitiu realizar simulações de diferentes cenários, considerando a declividade do terreno, a produtividade do equipamento, o tempo do ciclo operacional e a distância de extração. Com isso, foi possível avaliar as diferentes possibilidades de alocação e optar pela execução em campo daquelas que são mais viáveis do ponto de vista operacional, contribuindo para o melhor desempenho e otimização do sistema de colheita da madeira.

O modelo desenvolvido ofereceu a solução de alocação do equipamento contendo as seguintes informações: locais ideais de alocação considerando as variáveis de influência tempo do ciclo operacional e distância de extração; as coordenadas georreferenciadas dos pontos de torre selecionados; as coordenadas georreferenciadas para cada célula da malha de pontos; o volume médio e distância média de extração para cada célula a ser colhida; a área e volume a ser colhido por ponto onde será realizada a alocação da torre; o volume total colhido; a área total colhida; o tempo médio necessário para a realização da extração para a área total. Permitiu também gerar, apresentar e salvar diferentes cenários, considerando diferentes variáveis de restrição, de forma isolada.

O modelo de alocação proposto permite ao planejador apontar uma solução parcial em planilha Excel (Figura 21), além das soluções apontadas pelo modelo, podendo então determinar quais torres deverão ficar ativas e quais torres não serão utilizadas.

Malha de Pontos						Torres						
Células	Volun	Permi	X	Y	Z	Torres	Nº células	Usa	Permite	X	Y	Z
2319	5,567	1	691641	7257088	632	0	0	0	1	691166	7257837	843,5
2389	5,567	1	691631	7257098	636	1	0	0	1	691322	7257759	832,735
2390	5,567	1	691641	7257098	634	2	0	0	1	691295	7257769	835,979
2391	5,567	1	691651	7257098	632	3	33	1	1	691448	7257785	820,929
2392	5,567	1	691661	7257098	631	4	0	0	1	691475	7257782	818,971
2462	5,567	1	691631	7257108	637	5	130	1	1	691527	7257734	809,489
2463	5,567	1	691641	7257108	635	6	0	0	1	691545	7257688	806,5
2464	5,567	1	691651	7257108	634	7	19	1	1	691580	7257653	795,084
2465	5,567	1	691661	7257108	632	8	797	1	1	691588	7257610	788,581
2466	5,567	1	691671	7257108	631	9	0	0	1	691542	7257624	796,913
2535	5,567	1	691621	7257118	641	10	408	1	1	691586	7257603	790,023
2536	5,567	1	691631	7257118	639	11	62	1	1	691498	7257622	792,456
2537	5,567	1	691641	7257118	637	12	348	1	1	691498	7257609	788,715
2538	5,567	1	691651	7257118	635	13	58	1	1	691537	7257716	807,277
2539	5,567	1	691661	7257118	634	14	0	0	1	691500	7257757	815,227
2540	5,567	1	691671	7257118	632	15	0	0	1	691393	7257779	828,5
2541	5,567	1	691681	7257118	631	16	0	0	1	691240	7257800	841,692
2618	5,567	1	691611	7257128	645	17	0	0	1	691109	7257934	863,678
2619	5,567	1	691621	7257128	643	18	0	0	1	691508	7257623	793,062
2620	5,567	1	691631	7257128	641	19	0	0	1	691522	7257623	793,637
2621	5,567	1	691641	7257128	639	20	0	0	1	691535	7257624	796,606
2622	5,567	1	691651	7257128	637	21	0	0	1	691550	7257620	794,582
2623	5,567	1	691661	7257128	635	22	0	0	1	691558	7257616	793,608
2624	5,567	1	691671	7257128	634	23	52	1	1	691569	7257610	790,363
2625	5,567	1	691681	7257128	633	24	0	0	1	691579	7257606	790,023
2699	5,567	1	691611	7257138	646	25	0	0	1	691592	7257619	790,283
2700	5,567	1	691621	7257138	645	26	7	1	1	691590	7257631	791,453
2701	5,567	1	691631	7257138	643	27	0	0	1	691586	7257647	795,084
2702	5,567	1	691641	7257138	641	28	0	0	1	691589	7257637	792,406
2703	5,567	1	691651	7257138	639	29	2	1	1	691515	7257623	793,062
2704	5,567	1	691661	7257138	637	30	0	0	1	691591	7257625	791,453
2705	5,567	1	691671	7257138	635	31	102	1	1	691587	7257642	792,406
2706	5,567	1	691681	7257138	634	32	0	0	1	691576	7257656	797,568
2777	5,567	1	691611	7257148	648	33	0	0	1	691571	7257662	797,568

Figura 21. Resultado do cenário simulado pelo *software* LINGO e apresentado no *software* Excel.

Em seguida, os resultados foram espacializados no *software* ArcGIS, a fim de serem processados, analisados, gerando informações que auxiliam na tomada de decisão e na operação de planejamento florestal.

Na Figura 22 são apresentados os resultados para a alocação das torres e a divisão dos eitos para o cenário de minimização do tempo do ciclo operacional.

Cada conjunto de pontos que apresentam a mesma coloração representa um eito, ou seja, a área a ser colhida por uma torre em seu respectivo ponto de alocação. Os pontos em preto, com as suas respectivas numerações, representam os pontos de torre selecionados pelo modelo para o cenário de minimização do tempo de ciclo.

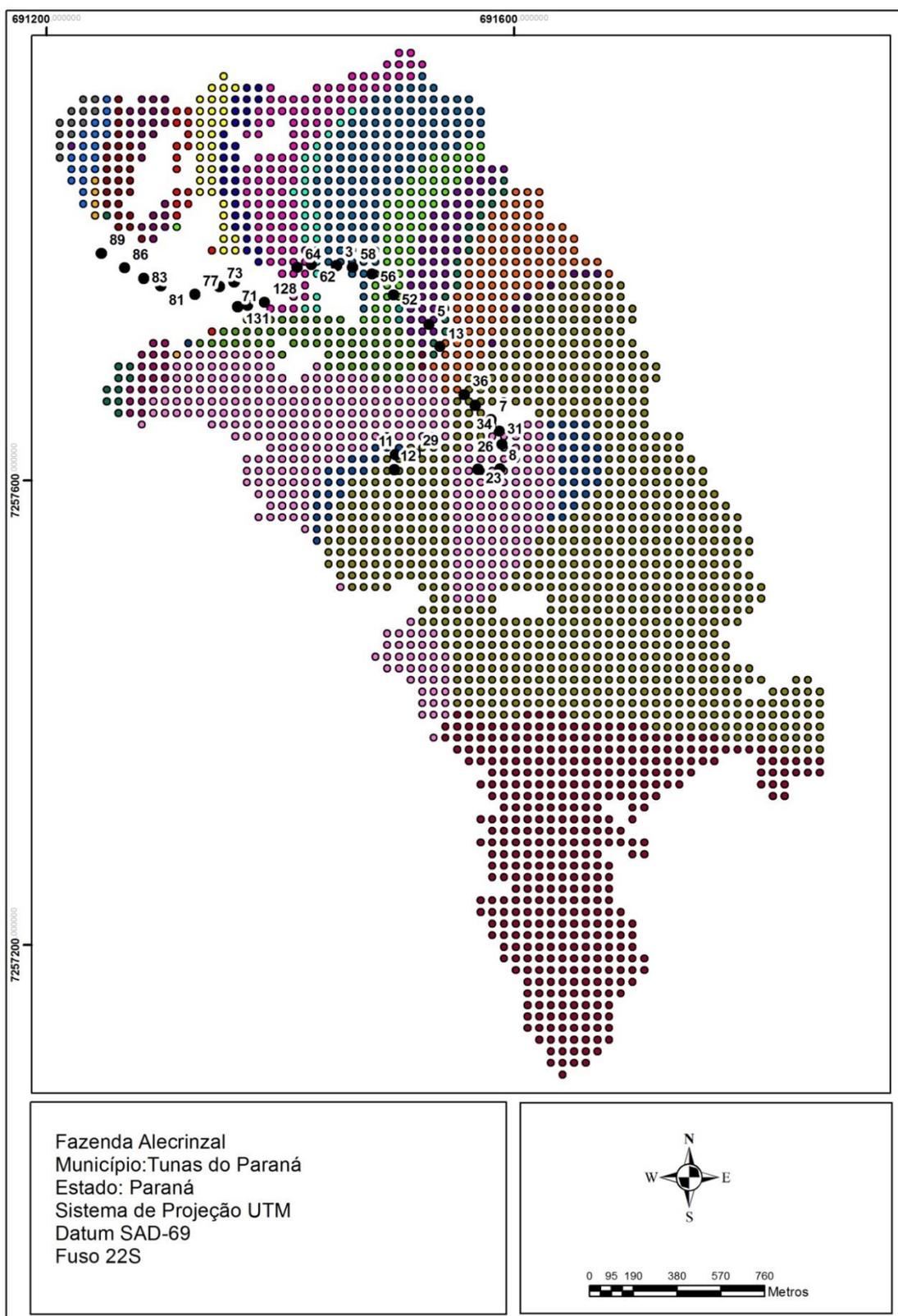


Figura 22. Ilustração dos resultados encontrados para o cenário que visa à minimização do tempo de extração de madeira utilizando o sistema de cabos aéreos.

A área estudada foi fragmentada, apresentando os resultados para cada torre (Figura 23), incluindo a área a ser colhida e a localização do ponto a ser instalada a torre.

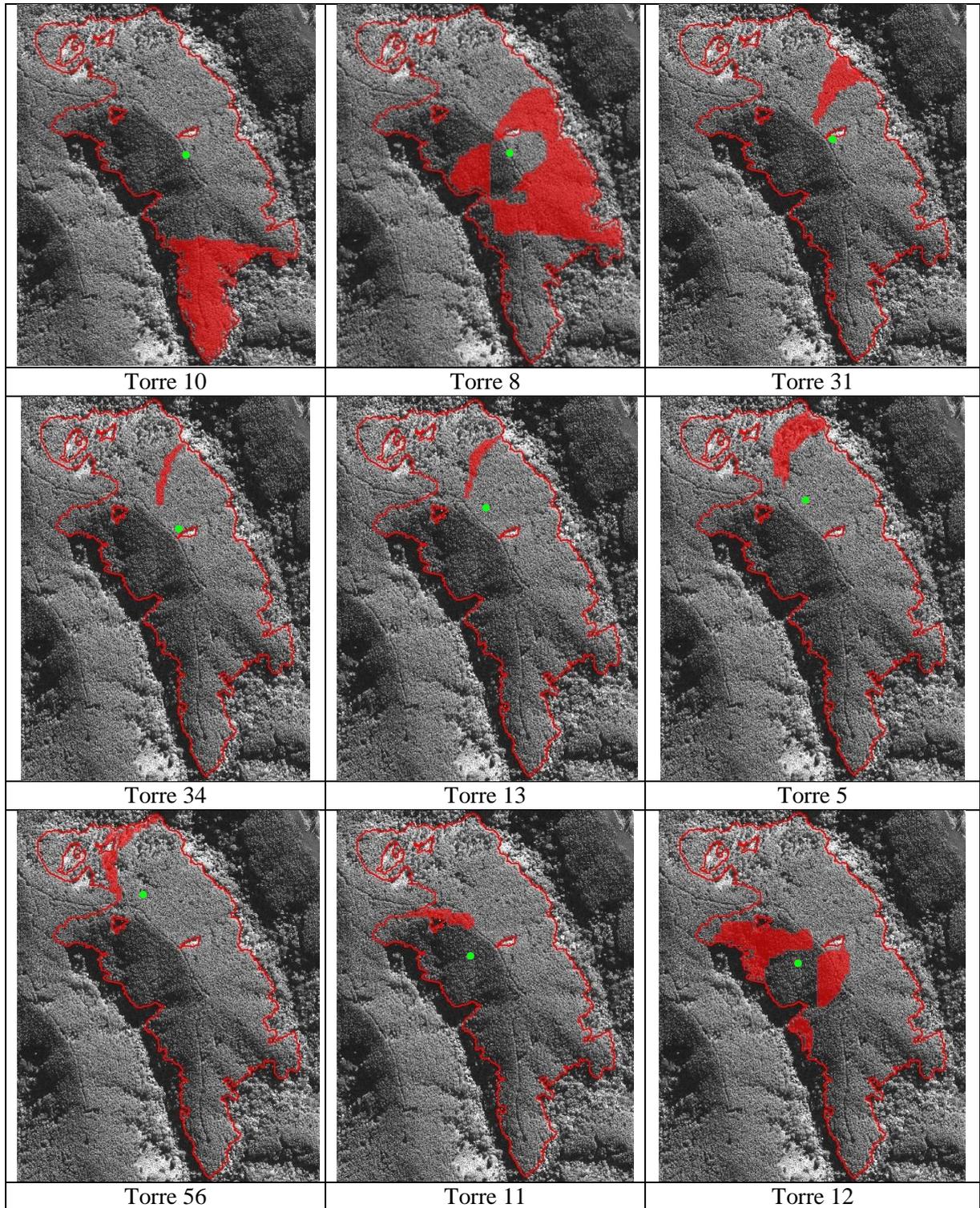


Figura 23. Setorização da área a ser colhida utilizando cabos aéreos, em função das posições a serem ocupadas pelas torres, determinadas pelo modelo que visa minimizar o tempo de extração.

Para o cenário que visa minimizar o tempo de ciclo operacional, foi observado que as áreas de colheita apontadas pelo modelo não se localizaram imediatamente após o início do eito, tendo sido verificado que há uma área que não será colhida pela referida torre, entre o ponto de torre e a área do eito. Considerando que estas áreas localizam-se nos pontos com maior elevação e conseqüentemente relevo de suave a ondulado (EMBRAPA, 1999), torna-se viável econômica e operacionalmente a utilização do sistema de guincho arrastador para a colheita nestes locais, sugerindo a combinação entre os dois sistemas de colheita numa mesma área, de acordo com as características do relevo e as variáveis avaliadas pelo modelo de alocação.

Na Figura 23 é possível observar que o modelo não foi capaz de espacializar os eitos em faixas retangulares estreitas ao longo de toda a área estudada, da mesma forma como ocorre a extração em campo.

Considerando que este cenário visa minimizar o tempo total para a realização da operação para a referida área, é possível observar eitos maiores, cobrindo extensas áreas de extração, ou seja, um número reduzido de pontos de alocação de torres realizam a cobertura de áreas mais abrangentes. Neste caso, a desvantagem deste cenário é a distância máxima de deslocamento lateral para o cabo de arraste, a qual pode comprometer a aplicação em campo de cenários que propõem faixas com larguras superiores a 50 m.

O modelo não apontou resultados para divisão dos eitos das torres aplicáveis em campo para os casos onde as distâncias de extração foram superiores a 200 m (Figura 23). Tal resultado é atribuído às características do relevo, as quais não favorecem a espacialização adequada dos eitos, devido às irregularidades presentes no terreno ao longo da área a ser extraída, as quais o modelo não é capaz de diferenciá-las de forma viável operacionalmente.

A Tabela 10 apresenta os resultados para o cenário de minimização do tempo de ciclo, considerando: o tempo de ciclo total para extração da madeira para cada ponto de torre, ou seja, o tempo de permanência da torre em um mesmo local; a distância média de deslocamento efetuada pelo transportador autopropelido para extrair a madeira existente ao longo do eito, por ponto de alocação da torre; o número de células que cada torre é capaz de cobrir e a sua respectiva área de atuação; o volume de madeira a ser extraído por ponto de torre; a declividade média do eito e a respectiva produtividade média, conforme a declividade e a distância de extração.

Os resultados encontrados para todas as torres selecionadas para este cenário são apresentados no Anexo I.

Tabela 10. Resultado parcial para o cenário de minimização de tempo de ciclo.

Torre	Tempo (horas)	Distância média (m)	Volume/Torre (m ³)	Área (ha)	Declividade média (Graus)	Produtividade (m ³ h ⁻¹)
5	8,92	153,59	723,71	1,30	12,60	18,92
8	64,60	171,09	4.436,90	7,97	18,64	17,80
10	49,02	361,25	2.271,34	4,08	18,83	14,29
11	2,05	119,51	345,15	0,62	6,81	22,12
12	18,87	117,40	1.937,32	3,48	7,86	20,22
13	3,35	117,00	322,89	0,58	10,31	19,90
31	6,23	139,79	567,83	1,02	9,43	19,60
34	2,80	138,72	283,92	0,51	5,37	20,15
56	6,72	133,08	573,40	1,03	13,14	19,23
Média	18,06	161,27	1.273,61	2,29	11,44	19,14
Desvio Padrão	22,87				4,84	2,16

Conforme apresentado na Tabela 10, os resultados demonstraram que os eitos com menor declividade e distâncias de extração contribuíram para uma maior produtividade do sistema de cabos aéreos em relação aos locais de maior declividade e distâncias de extração, devido à ausência de barreiras que dificultam o guinchamento da madeira, o fácil deslocamento dos operadores ao longo do eito e ao menor tempo de ciclo operacional.

Analisando a torre 5 é verificada a diminuição da distância de extração acompanhada pela redução da declividade e o consequente aumento da produtividade do sistema. Comparando à torre 5, a torre 12 apresenta menor distância de extração e declividade, apesar da sua área de cobertura ser 2,18 ha superior, a sua produtividade 1,3 m³ h⁻¹ superior. Assim, é verificado que a declividade exerce influencia superior á da área de cobertura sobre a produtividade do sistema.

A torre 34 apresenta a menor declividade, no entanto a sua produtividade não é a maior quando comparada às demais torres, considerando que a sua distância média de extração equivale a 138,72 metros, confirmando a influência da distância de extração sobre a produtividade do sistema.

As torres 13 e 31 apresentam produtividades semelhantes, porém a torre 13 possui menor distância média de extração enquanto a torre 31 apresenta menor declividade média.

As torres 8 e 10 possuem a maior área de cobertura e conseqüentemente a maior distância média de extração. Considerando que estas áreas possuem a maior declividade média quando comparadas às demais áreas, a produtividade do sistema para as torres 8 e 10 é a menor, comparada com as demais torres.

A declividade média observada na área apresenta valores baixos devido à conformação do relevo, em que as entradas dos talhões são representadas por declives acentuados variando para ondulado à suave ondulado ao longo dos talhões e o fundo dos mesmos com declividade levemente acentuada. Na maioria dos casos, com o declive acentuado na entrada dos talhões, torna-se difícil o acesso das máquinas como o conjunto *harvester + forwarder* ao interior dos talhões, justificando assim o uso do sistema de cabos aéreos para a realização da colheita florestal nestas áreas.

No cenário que propôs a minimização do tempo de duração do ciclo operacional, o modelo apontou um número reduzido de pontos para alocação do sistema de cabos aéreos, resultando em maiores áreas a serem colhidas por torre, uma menor movimentação da torre ao longo da área de colheita, sendo ainda possível observar eitos com maior volume total de madeira.

São representados no gráfico a seguir (Figura 24) os dados mostrados na Tabela 10, referentes à declividade da área estudada, produtividade média do sistema e distância de extração, pertencentes aos resultados apontados pelo modelo para o cenário de minimização do tempo de ciclo operacional:

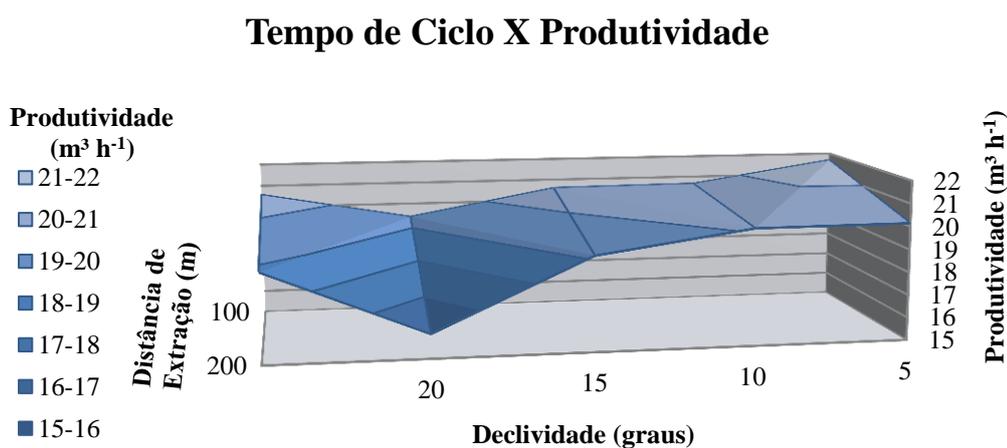


Figura 24. Comportamento da produtividade nas diferentes classes de declividade e distância de extração, para o cenário de minimização do tempo de ciclo operacional para a operação de colheita de madeira utilizando cabos aéreos.

No gráfico é possível observar a redução da produtividade da operação de colheita com cabos aéreos na proporção em que aumenta a declividade da área e a distância de extração. A produtividade do sistema variou entre $21,68 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $16,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, nas classes de distância com intervalo entre 100 m e 200 m, respectivamente. Ao variar a declividade entre 5° e 20° , a produtividade teve variação entre $20,57 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $18,86 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ respectivamente.

Tal fato é explicado pela dificuldade de extração encontrada em declividades superiores, representada por obstáculos, como tocos, buracos presentes ao longo da linha por onde o transportador autopropelido que realiza a extração da madeira desloca-se, além de empecilhos ao deslocamento encontrados pelos colaboradores que fazem o engate da madeira ao longo do eito. As longas distâncias de extração afetam a produtividade do sistema através da redução do volume de madeira que o sistema é capaz de extrair a cada ciclo.

Na Figura 25 é apresentada a alocação das torres e a divisão dos eitos para o cenário de minimização do somatório das distâncias de extração. Os conjuntos de pontos que apresentam a mesma coloração representam um eito. Os pontos em preto, com as suas respectivas numerações, representam os pontos de torre selecionados pelo modelo para o cenário de minimização da distância de extração.

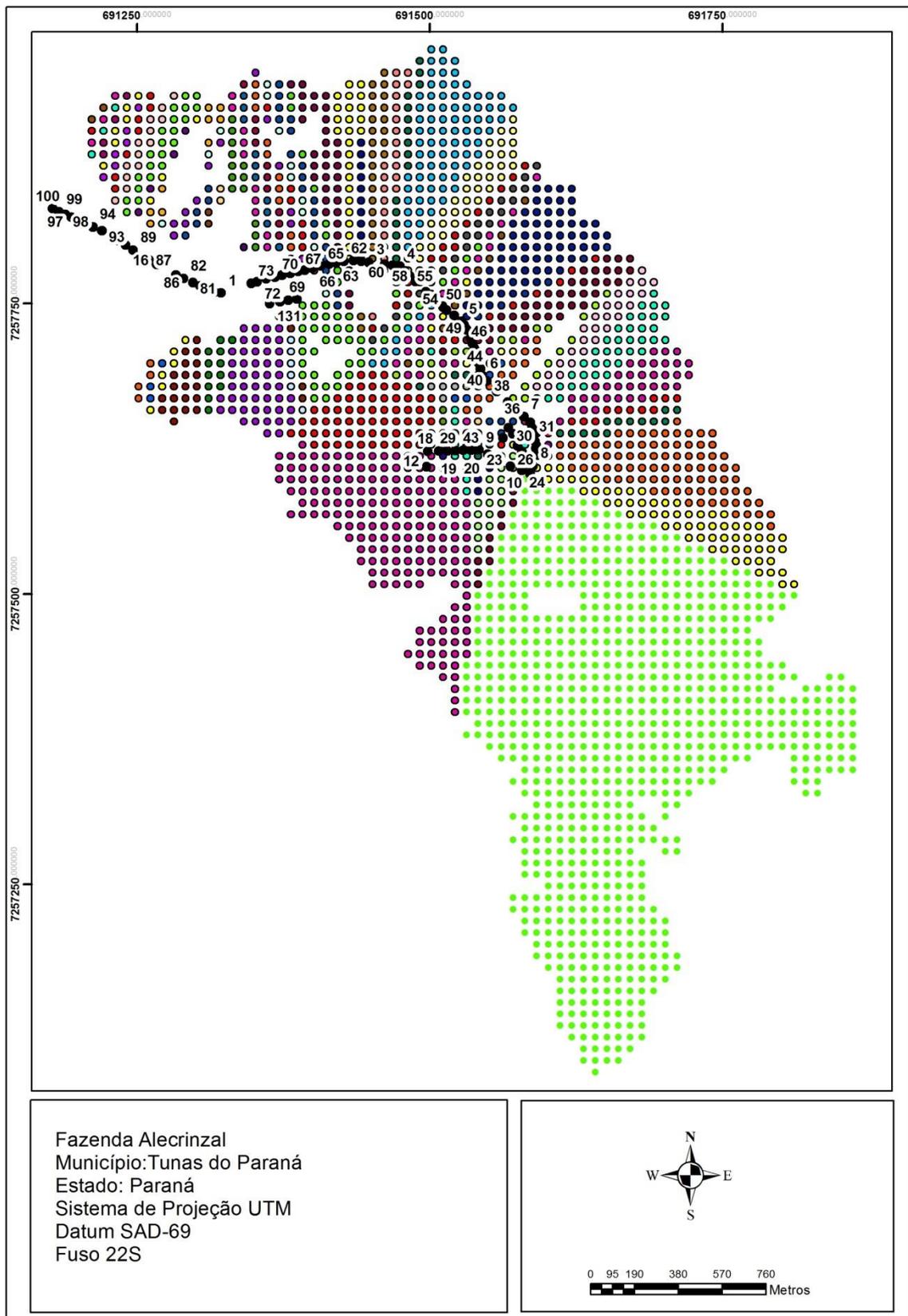


Figura 25. Ilustração dos resultados encontrados para o cenário que visa à minimização da distância de extração de madeira utilizando o sistema de cabos aéreos.

A área estudada foi fragmentada, apresentando os resultados para cada torre (Figura 26), incluindo a área a ser colhida e a localização do ponto a ser instalada a torre.

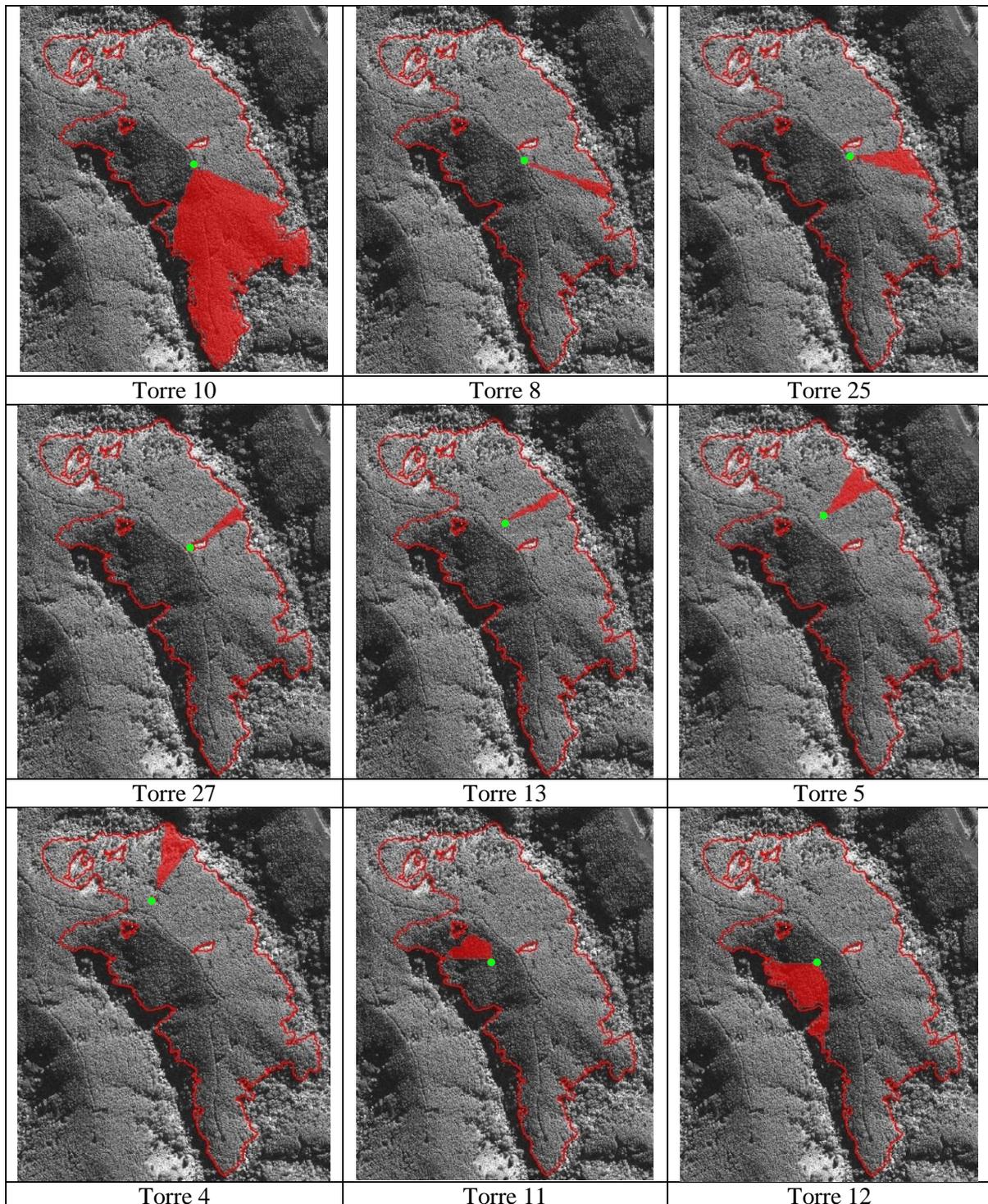


Figura 26. Setorização da área a ser colhida utilizando cabos aéreos, em função das posições a serem ocupadas pelas torres, determinadas pelo modelo que visa minimizar a distância de extração.

No cenário de minimização da distância de extração foi observado um maior número de pontos de alocação de torre, o que pode ser explicado através do objetivo principal do modelo, que buscou como solução ideal as células mais próximas para cada ponto de torre, de modo a reduzir a distância de extração, utilizando o maior número de pontos de alocação de torres possíveis, apontados pelo modelo.

Sendo assim, o sistema de cabos aéreos, quando alocado em distâncias de extração muito curtas, pode apresentar uma redução em seu rendimento, pois durante parte significativa do tempo operacional o mesmo tem a sua produção interrompida devido ao deslocamento, montagem e remontagem da torre. Tal condição implica na menor produção do sistema e aumento dos custos de extração.

Na Figura 26 é possível observar que da mesma forma como ocorre a extração em campo, a partir de eitos com espacialização em faixas retangulares estreitas, assim também o modelo foi capaz de separar os eitos em faixas de extração estreitas para a maior parte da área de estudo.

Para o cenário que visa minimizar a distância de extração, foi observado que as áreas de colheita apontadas pelo modelo localizam-se imediatamente após o início do eito. Sendo assim, não há uma área que não será colhida pela referida torre, entre o ponto de torre e a área do eito, evitando assim que o transportador autopropelido desloque-se ao longo de áreas aonde não há madeira a ser extraída.

Condição diferente é observada nos resultados do cenário que visa à minimização do tempo de ciclo operacional, onde o ponto de torre não está localizado próximo à área a ser colhida. Situações como esta devem ser evitadas, pois o deslocamento do transportador autopropelido sobre áreas aonde não há madeira a ser colhida representa em desperdício de combustível, maior tempo de permanência da torre no mesmo eito de extração, resultando no aumento dos custos da operação.

A Torre 10 é o ponto de alocação de torre, sugerido pelo modelo, que está mais próximo de todos os pontos localizados ao sul da área estudada. Sendo assim, este ponto realiza a cobertura da maior área a ser colhida, apontado pelo cenário que visa a minimização da distância de extração.

No entanto, o modelo não apontou uma divisão otimizada dos eitos que possa ser executada em campo para os casos onde as distâncias de extração foram superiores a 200 m.

Isso se deve à distância de extração e principalmente ao relevo (Figura 27). Nesse caso, a divisão do eito sugerida pelo modelo tem a sua aplicação inviável em campo.

Em condições de relevo como esta, o formato ideal dos eitos é triangular, apresentando uma base mais larga, com até 50 metros de largura e ápice estreito. Nessa condição, com eitos em formato triangular, embora a extração de madeira seja realizada a distâncias maiores, tendo em vista que o transportador autopropelido desloca-se ao longo de uma grande área em que a madeira foi retirada nos eitos anteriores, a cobertura da área é maior, resultando em menor movimentação das torres.



Figura 27. Vista lateral do bloco onde foi realizado o teste do modelo para alocação de torres. A seta em vermelho representa o sentido de extração da madeira, em direção à torre.

Para que a alocação dos resultados apontados pelo modelo possa ser executada em campo deve-se considerar a necessidade de eitos com faixas estreitas para extração de madeira, devido à limitação imposta pelo comprimento do cabo de guinchamento do transportador autopropelido, impedindo que a extração seja feita em distâncias de deslocamento lateral superiores a 25 metros, para ambos os lados do cabo mestre.

A Tabela 11 apresenta os resultados para o cenário de minimização da distância de extração de madeira, considerando: o tempo de ciclo total para extração da madeira para cada ponto de torre; a distância média de deslocamento do transportador autopropelido para extrair toda a madeira existente ao longo do eito, por ponto de alocação da torre; o número de células que cada torre é capaz de cobrir e a sua respectiva área de atuação; o volume de madeira a ser extraído por ponto de torre; a declividade média do eito e a respectiva produtividade média, conforme a declividade e a distância de extração.

Os resultados encontrados para todas as torres selecionadas para este cenário são apresentados no Anexo II.

Tabela 11. Resultado parcial para o cenário de minimização da distância de extração.

Torre	Tempo (horas)	Distância média (m)	Volume/Torre (m ³)	Área (ha)	Declividade média (Graus)	Produtividade (m ³ h ⁻¹)
4	6,80	132,07	462,06	0,83	24,68	17,72
5	5,28	100,54	384,12	0,69	25,45	18,19
8	5,28	152,61	356,29	0,64	22,29	17,66
10	90,52	270,02	4.876,69	8,76	20,06	15,80
11	2,72	62,36	361,86	0,65	7,18	21,31
12	13,77	95,28	1.013,19	1,82	25,46	18,29
13	2,92	93,83	211,55	0,38	26,55	18,17
25	7,20	125,97	495,46	0,89	24,79	17,82
27	2,82	112,20	200,41	0,36	25,11	18,02
Média	15,26	127,21	929,01	1,67	22,40	18,11
Desvio Padrão	28,43				6,03	1,42

O cenário que visa minimizar as distâncias de extração apresentou em seu somatório valor inferior para a distância total, quando comparado com o cenário que objetiva minimizar o tempo de extração, como pode ser observado na Tabela 11. O mesmo ocorreu para o somatório do tempo de ciclo total; o somatório dos tempos para o cenário de minimização dos tempos apresentou valor inferior ao valor encontrado para o cenário de minimização das distâncias de extração.

A torre 11 apresenta a menor distância média de extração, acompanhada pela menor declividade média e conseqüentemente a maior produtividade para este cenário. Em comparação, a torre 10 apresenta a menor produtividade do cenário, justificada pela maior área de cobertura e maior distância média de extração, ratificando assim a influência que a distância de extração exerce sobre a produtividade do sistema de cabos aéreos.

Os resultados encontrados comprovam a eficiência do modelo desenvolvido para alocação de torres para a extração de madeira utilizando cabo aéreo.

São representados no gráfico a seguir (Figura 28) os dados mostrados na Tabela 11, referentes à declividade da área estudada, produtividade média do sistema e distância de extração, pertencentes aos resultados apontados pelo modelo para o cenário de minimização da distância de extração:

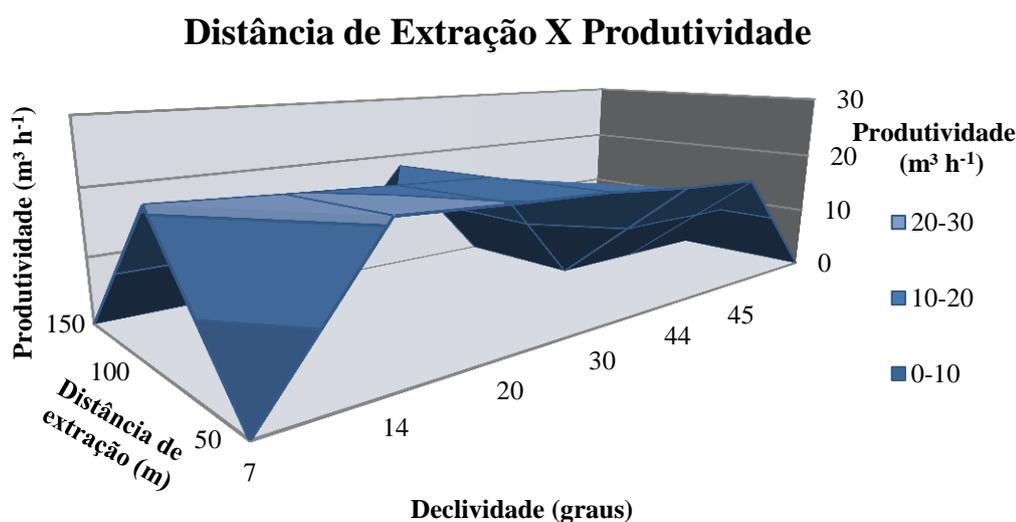


Figura 28. Comportamento da produtividade nas diferentes classes de declividade e distância de extração, para o cenário de minimização da distância de extração para a operação de colheita de madeira utilizando cabos aéreos.

Na figura 28, é apresentada a influência da distância de extração e da declividade sobre a produtividade da operação de colheita com cabos aéreos. A produtividade do sistema variou entre $21,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $18,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, nas classes de distância com intervalo de 50 m e 150 m, respectivamente. Ao variar a declividade entre 7° e 45° , a produtividade teve variação entre $21,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $17,27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ respectivamente.

O modelo ajustado poderá ser usado como uma ferramenta de decisão, pois através dele o usuário estimará o tempo total do ciclo operacional e a distância total de extração em uma situação operacional, podendo decidir antecipadamente, pelo melhor layout de alocação das torres para colheita de madeira através de cabos aéreos, além de obter a melhor cobertura da área, menor movimentação de máquinas com a mudança de eitos e o equilíbrio entre distância de extração e produtividade.

Comparando os resultados parciais para os dois cenários, foi observado que as torres 5, 8, 10, 11, 12 e 13 foram selecionadas nos dois cenários como os melhores pontos para alocação das torres para colheita com o sistema de cabos aéreos.

No cenário de minimização dos tempos de extração estas torres apresentam maior área de cobertura. No entanto a declividade média para extração é inferior em todos os casos, quando comparado com o cenário de minimização da distância de extração.

No cenário de minimização dos tempos de extração o modelo penalizou a área de cobertura, determinando que as torres tivessem uma maior área de cobertura, reduzindo assim os tempos improdutivos com mudanças de posição das torres.

No cenário de minimização de distância de extração o modelo penalizou a declividade, definindo os eitos em locais com maiores declives para que o objetivo de diminuir a distância de extração fosse atingido.

A produtividade em ambos os cenários apresentou uma semelhança considerável. Foi observado que de acordo com o objetivo do cenário o modelo penaliza as variáveis de influência de forma diferente para que o objetivo do cenário seja atingido.

6. CONCLUSÕES

- A modelagem espacial realizada no SIG possibilita a estratificação das áreas para alocação dos sistemas de colheita de madeira, nas diferentes classes de declividade e distância de extração.
- A variável “Tempo de Ciclo” afetou na definição dos pontos de alocação de torres, resultando em menor número de posições a serem ocupadas pela torre e conseqüentemente maior área de extração por torre.
- A variável “Distância de Extração” afetou na definição dos pontos de alocação da torre, resultando na seleção de maior número de locais para instalação das torres, a fim de minimizar a distância entre pontos, resultando assim na maior movimentação das torres.
- A modelagem espacial realizada mostrou-se promissora na alocação do sistema de cabos aéreos, sendo capaz de separar os eitos a serem colhidos em faixas estreitas, da mesma forma como é executado em campo, para distância de extração máxima de 200 m.
- De acordo com o objetivo do cenário, o modelo penaliza as variáveis de influência com pesos diferentes para que o objetivo do cenário seja atingido.
- O modelo computacional desenvolvido mostra-se promissor na alocação do sistema de cabos aéreos para extração de madeira em região montanhosa, porém necessita ser aperfeiçoado a fim de garantir maior precisão nos resultados.

7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Aperfeiçoamento do modelo desenvolvido para alocação de torres em eitos com distância de extração acima de 200 metros.
- Definir dados de produtividade e custos compatíveis com as diferentes condições do terreno.
- Testar a influência de diferentes variáveis de operacionais sobre o sistema de alocação de torres para colheita de madeira com cabos aéreos.
- Embora este sistema apresente uma produtividade inferior à produtividade dos sistemas de colheita tradicionais, trata-se de um sistema em que não podemos analisar a produtividade isoladamente, mas devemos relacionar esta a outros ganhos que este sistema pode proporcionar, por exemplo, ganhos sociais, ergonômicos e principalmente ambientais. É também um sistema a ser melhorado, logo estas melhorias ocorrerão através do desenvolvimento de pesquisas e da prática de operação adquirida no campo.
- Em trabalhos futuros, percursos que passam por várias células deverão ser considerados. Não considerar somente percursos com origem e destino para a madeira a ser extraída. O perfil do terreno deve ser levado em consideração, a fim de gerar melhores resultados para o modelo de alocação de torres utilizando programação linear inteira e modelagem espacial.
- Utilizar malha de pontos com maior densidade de pontos atrelada a uma máquina com maior potência, capaz de processar um grande volume de dados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012. Brasília: 2013. 148 p. Disponível em: < http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf >. Acesso em: 27 Jul. 2013.

ADAMS, J. D.; VISSER, R. J. M.; PRISLEY, S. P. **Modeling steep terrain harvesting risks using GIS**. Austro. 2003.

ALVES, D. S. Sistemas de informação geográfica. In: **GEOPROCESSAMENTO**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990. p. 66-78.

ARCE, J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização de custos**. 1997. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, 1997.

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

BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; MOREIRA, J. M. A. P.; SILVA, L. M. S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 85-95, mar. 2010.

BANTEL, C. A. **Estudo de diferentes sistemas de colheita de *Eucalyptus* spp em área montanhosa**. 2010. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

BANTEL, C. A. **Colheita florestal em locais de topografia acidentada**. 2009. Disponível em: <<http://www.sbef.org.br/bantel3.html>>. Acesso em: 5 nov. 2012.

BIRRO, M. H. B.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; MINETTI, L. J. Avaliação técnica e econômica da extração de madeira de eucalipto com “track-skidder” em região montanhosa. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, n.5, p.525-532, 2002.

BONT, L.; HEINIMANN, H. R. Optimum geometric layout of a single cable road. **European Journal of Forest Research**. v. 131, p. 1439-1448. 2012.

BRAMUCCI, M. **Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de “Harvesters” na colheita de madeira**. 2001. 50 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographic information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1989. 200p.

CASTILHO, A. S.; FERNANDES, B. R.; FIRME, D. J.; AMARAL, E. J.; BORGES, S. M. **ANAIIS do XVII Seminário de atualização em sistemas de colheita de madeira e transporte florestal**. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 134 p. ISBN 978.85.89777-06-3, 2014

CHUNG, W. **Optimization of cable logging layout using a heuristic algorithm for network programming**. 2002. 206 f. Dissertation (Doctor of Philosophy in Forest Engineering) – Oregon State University, Corvallis, 2002.

CHUNG, W.; SESSIONS, J. **A computerized method for determining cable logging feasibility using a DEM**. In 2003 Council on Forest Engineering (COFE) Conference Proceedings: “Forest Operations Among Competing Forest Uses”. Bar Harbr, September 7-10, 2003.

CHUNG, W.; SESSIONS, J. **Designing a forest road network using heuristic optimization techniques**. In 2001 Council on Forest Engineering (COFE) Conference Proceedings: “Appalachian Hardwoods: Managing Change”. Snowshoe, July 15-18, 2001.

CHUNG, W.; SESSIONS, J.; HEINIMANN, H. R. An application of a heuristic network algorithm to cable logging layout design. **Journal of Forest Engineering**. v.15, n.1, 2004.

CONAW, P. L. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. 264p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1999. 412p.

EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A.; SAPUNAR, P.; NIETO, E.; SESSIONS, J. B.; SESSIONS, J.; BUSTAMANTE, F.; MUSANTE, H. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. **Operations Research**, v.54, n.6, p.1017-1027, 2006.

FARIA, F. N. **Estudo do sistema cabo aéreo como alternativa de colheita em áreas de declividade acentuada**. 2009. 32 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

FARIA, T. T. **Microplanejamento da colheita de uma floresta plantada utilizando tecnologias de geoprocessamento**. 2012. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

FERNANDES, A. P. D.; GUIMARÃES, P. P.; BRAZ, E. M.; HOEFLICH, V. A.; ARCE, J. E. Alternativas de planejamento para a exploração florestal. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p, 339-350, 2013.

FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A.; OLIVEIRA, A.; MACHADO, R. V. Dinâmica do uso e cobertura da terra no *campus* da Universidade Federal de Lavras de 1964 a 2009. **Revista Cerne**, Lavras, v. 19, n.1, p. 35-42, 2013.

FREITAS, K. E. **Análise técnica e econômica da colheita florestal mecanizada**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia de Produção. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2005. 27 f.

IPEF Notícias. **Estratégia de colheita por cabo aéreo ganha cada vez mais espaço**. Nº 196. Janeiro/Fevereiro/Março – 2009. Ano 35.

IPEF Série Técnica. Sistemas de informações geográficas: Aplicações florestais. Piracicaba, v.9, n.28, p.1-18, 1993.

KÜHMAIER, M.; STAMPFER, K. Development of a Multi-Attribute Spatial Decision Support System in Selecting Timber Harvesting Systems. **Croatian Journal of Forest Engineering**, Austria, v.31, n.2, p.75-88. 2010.

LEGÜES, A. D.; FERLAND, J. A.; RIBEIRO, C. C.; VERA, J. R. WEINTRAUB, A. A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. **European Journal of Operational Research**. p. 788-805. 2007.

LIMA, J. S.S., LEITE, A. M. P. Mecanização. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**, Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 2008. p. 43-65.

LISBOA, E. F. **Apostila do curso de pesquisa operacional**. RIO DE JANEIRO, 2002.

LO, C. P.; YEUNG, A. K. W. **Concepts and Techniques of Geographic Information Systems**. 2ª ed. Prentice Hall Publisher, 2007.

LOPES, E. S. **Métodos de Colheita Florestal**. Notas de aula. 2011

LOPES, E. S.; MISSEL, J. W. P; DIAS, A. N.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica do trator florestal arrastador “skidder” com diferentes tipos de rodados na extração de madeira em povoamentos de pinus. **Revista Árvore**, Viçosa, v.31, n.6, p.1053-1061, 2007.

LOPES, E. S.; RODRIGUES, C. K.; CARMO, F. C.; FIEDLER, N. C.; OLIVEIRA, D. Avaliação técnica e de custos de um sistema de cabos aéreos na extração de *Pinus taeda* L. em região montanhosa. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 387-394, 2011.

LOPES, E. S.; RUDEK, A.; OLIVEIRA, D.; GONÇALVES, S. B. Influência da distância de guinchamento e de extração na produtividade de um sistema de cabos aéreos em região montanhosa. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1696-1704, 2013.

LOPES, E. S. **Aplicação do programa SNAP III (Scheduling and Network Analysis Program) no planejamento da colheita e do transporte florestal**. 2001. 129 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2014.

MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2008.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 185-230.

MALINOVSKI, Jorge R. *et al.* **ANAIS do XV Seminário de atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal**. São Paulo: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 286 p. ISBN 978-85-99592-77-9, 2011.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A. Sistemas. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 161-184.

MALINOVSKI, R. A. **Otimização da distância de extração de madeira com forwarder**. 2007. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

MALINOVSKI, R. A. **Programa computacional de simulação para análise de sistemas de colheita de madeira**. 1999. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R.; YAMAJI, F. M. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 169-182, 2006.

MARAN, J. C.; RAMOS, J. A. M.; ROBERT, R. C. G. Extração florestal. In ROBERT, R. C. G. **Guia prático de operações florestais na colheita de madeira**. 1ª edição. Curitiba: Editora Imprensa UFPR, 2012.

MARQUES, G. M.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; FONTES, A. A. Aplicação da programação dinâmica na substituição de equipamentos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.5, p.749-756, 2005.

MARQUES, R. T. M.; MACHADO, C. C.; BARROS, A. A. A.; SOUZA, A. P. Planejamento de um sistema de transporte florestal rodoviário com as técnicas de PERT/COM. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 19, n. 4, p. 540-547, 1995.

MARTINI, A. J. **O plantador de eucaliptos: A questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade**. 2004. 320 f. Dissertação (Mestrado em História Social) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MINETTE, L. J. **Avaliação técnica e econômica dos tratores florestais transportadores (forwarders), na extração de madeira de eucalipto**. Viçosa: UFV, 1988. 77 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1988.

MORAES, E. F. **Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD**. 2005. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

NASCIMENTO, F. A. F.; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MIRANDA, G. M. Uso da meta-heurística otimização por exame de partículas no planejamento florestal. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 557-565, 2012.

NETELER, M. E.; MITASOVA, H.; Open Source GIS: a GRASS GIS Approach. In: MALINOVSKI, R. A. **Otimização da distância de extração de madeira com forwarder**. 2007. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

NOGUEIRA, F. **Pesquisa Operacional** – PERT/CPM. Notas de aula. S/D.

OLIVEIRA, R. J.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; LEITE, H. G. Avaliação técnica e econômica da extração de madeira de eucalipto com “*clambunk skidder*”. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 267-275, 2006.

PENNA, E. S. **Avaliação ergonômica e ambiental de cabos aéreos na colheita de pinus em Cerro Azul, PR**. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

PENZSAUR. Dados técnicos do K-301-T: cabos aéreos PENZSAUR. In: BANTEL, C. A. **Estudo de diferentes sistemas de colheita de *Eucalyptus spp* em área montanhosa**. 2010. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

PIRES, J. V. G. **Colheita florestal em áreas montanhosas**. In: III Simpósio brasileiro sobre colheita e transporte florestal. De 8 a 12 de dezembro. 1997. Vitória – ES. p. 176-182. ANAIS.

ROBERT, R. C. G. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita mecanizada em plantios de *Eucalyptus spp* em duas condições de relevo acidentado**. 2013. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ROBERT, R. C. G.; ANDREATA, H. K. Sistemas de colheita de madeira. In ROBERT, R. C. G. **Guia prático de operações florestais na colheita de madeira**. 1ª edição. Curitiba: Editora Imprensa UFPR, 2012.

SANCHEZ, M.L.; CARBALLO, R.V.; BAÑOS, P.R. Modelo de programación linear para la planeación de labores de abastecimento florestal. In: FENNER, M. I. **O fator tributário no planejamento estratégico para povoamentos de *Pinus taeda***. 2006. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SANT’ANNA, C. M. Corte florestal. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 66-96.

SEIXAS, F. Extração. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 97-145.

SILVA, C. B.; SANT'ANNA, C. M.; MINETTI, L. J. Avaliação ergonômica do “*feller-buncher*” utilizado na colheita de eucalipto. **Revista Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 109-118, 2003.

SILVA, J. R. **Compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas na colheita de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2003. 138 f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

SIMÕES, D. **Avaliação econômica de dois sistemas de colheita florestal mecanizada de eucalipto**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

SOLMIE, D. K. **Comparing Field Measurement Strategies for Operational Planning and Layout**. 2003. 75 f. Master of Forestry paper (Master of Forestry) - Oregon State University, 2003.

SOUZA, M. A.; PIRES, C. B. Colheita florestal: mensuração e análise dos custos incorridos na atividade mecanizada de extração. **Custos e @negócios on line**. V. 5, n. 2, p. 104-132, Mai/Ago/2009.

SOARES, S. S.; SILVA, M. L.; CORDEIRO, S. A. Produto interno bruto do setor florestal brasileiro, 1994 a 2008. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 4, p.725-732, 2014.

ANEXO I

Resultados para o cenário de minimização do tempo de ciclo.

Torre	Tempo (horas)	Distância média (m)	Volume/Torre (m ³)	Área (ha)	Declividade (Graus)	Produtividade (m ³ h ⁻¹)
3	2,13	148	183,71	0,33	10,89	19,26
5	8,92	154	723,71	1,30	12,60	18,92
7	1,15	145	105,77	0,19	6,16	19,94
8	64,60	171	4436,90	7,97	18,64	17,80
10	49,02	361	2271,34	4,08	18,83	14,29
11	2,05	120	345,15	0,62	6,81	22,12
12	18,87	117	1937,32	3,48	7,86	20,22
13	3,35	117	322,89	0,58	10,31	19,90
23	3,32	104	289,48	0,52	16,22	19,36
26	0,48	144	38,97	0,07	14,29	18,87
29	0,07	81	11,13	0,02	3,21	22,35
31	6,23	140	567,83	1,02	9,43	19,60
34	2,80	139	283,92	0,51	5,37	20,15
36	0,07	89	11,13	0,02	0,67	21,87
52	1,33	111	133,61	0,24	9,81	20,08
56	6,72	133	573,40	1,03	13,14	19,23
58	1,83	138	161,44	0,29	11,04	19,42
62	1,00	142	89,07	0,16	10,05	19,48
64	0,05	110	5,57	0,01	7,22	20,44
71	1,43	138	128,04	0,23	10,67	19,46
73	1,45	131	144,74	0,26	7,00	20,07
77	0,48	104	55,67	0,10	5,28	20,81
81	0,20	95	22,27	0,04	7,75	20,63
83	1,07	121	105,77	0,19	8,74	20,04
86	0,05	116	5,57	0,01	8,33	20,18
89	0,68	118	66,80	0,12	10,12	19,91
128	0,05	75	5,57	0,01	10,32	20,66
130	0,05	76	5,57	0,01	10,82	20,59
131	0,88	99	100,21	0,18	7,10	20,65
Média	6,22	128,78	452,85	0,81	9,61	19,87
Desvio Padrão	14,67	50,75	933,11	1,68	4,08	1,44

ANEXO II

Resultados para o cenário de minimização da distância de extração.

Torre	Tempo (horas)	Distância média (m)	Volume/Torre (m³)	Área (ha)	Declividade (Graus)	Produtividade (m³ h⁻¹)
1	0,72	71	66,80	0,12	18,75	19,63
3	1,97	102	144,74	0,26	24,61	18,28
4	6,80	132	462,06	0,83	24,68	17,72
5	5,28	101	384,12	0,69	25,45	18,19
6	0,35	31	33,40	0,06	23,60	19,71
7	2,02	108	150,31	0,27	23,09	18,37
8	5,28	153	356,29	0,64	22,29	17,66
9	0,20	20	16,70	0,03	31,98	18,81
10	90,52	270	4876,69	8,76	20,06	15,80
11	2,72	62	361,86	0,65	7,18	21,31
12	13,77	95	1013,19	1,82	25,46	18,29
13	2,92	94	211,55	0,38	26,55	18,17
14	0,62	40	55,67	0,10	24,30	19,45
15	0,43	92	33,40	0,06	24,51	18,48
16	0,20	86	16,70	0,03	23,10	18,78
18	0,08	15	5,57	0,01	42,66	17,49
19	0,67	24	55,67	0,10	29,32	19,08
20	0,12	22	11,13	0,02	23,94	19,83
21	0,32	17	22,27	0,04	40,30	17,77
22	0,30	26	22,27	0,04	36,53	18,10
23	1,15	43	89,07	0,16	30,52	18,58
24	0,88	64	66,80	0,12	29,09	18,38
25	7,20	126	495,46	0,89	24,79	17,82
26	1,05	81	77,94	0,14	27,69	18,25
27	2,82	112	200,41	0,36	25,11	18,02
28	1,02	83	72,37	0,13	28,68	18,09
29	0,20	23	22,27	0,04	18,52	20,54
30	0,07	19	5,57	0,01	39,07	17,88
31	2,92	104	205,98	0,37	26,52	17,99
33	0,80	62	61,24	0,11	28,50	18,49
34	0,82	52	66,80	0,12	26,58	18,94
36	0,88	31	72,37	0,13	29,61	18,92
38	0,33	23	27,84	0,05	31,37	18,83
39	0,25	29	22,27	0,04	27,19	19,27
40	0,40	29	33,40	0,06	28,65	19,09
41	0,42	36	38,97	0,07	23,66	19,62
42	0,53	45	50,10	0,09	22,41	19,62
43	0,08	15	5,57	0,01	42,62	17,49
44	0,03	36	5,57	0,01	13,33	20,98
45	0,75	60	55,67	0,10	30,32	18,30
46	0,47	86	33,40	0,06	28,19	18,10
48	0,63	53	55,67	0,10	23,88	19,28
49	0,20	25	16,70	0,03	32,01	18,72
50	1,12	55	94,64	0,17	24,78	19,11

51	0,43	48	44,54	0,08	17,53	20,20
52	1,47	79	116,91	0,21	24,14	18,77
54	1,30	60	100,21	0,18	28,34	18,56
55	0,05	21	5,57	0,01	23,77	19,87
56	2,95	97	211,55	0,38	26,91	18,08
57	1,27	105	89,07	0,16	26,54	17,96
58	1,82	95	133,61	0,24	25,82	18,24
60	0,82	61	61,24	0,11	29,46	18,38
61	1,95	107	139,18	0,25	25,84	18,02
62	2,55	93	194,85	0,35	24,21	18,50
63	0,63	71	50,10	0,09	25,27	18,75
64	1,35	82	105,77	0,19	24,57	18,65
65	0,78	78	61,24	0,11	25,57	18,59
66	0,50	60	38,97	0,07	28,23	18,57
67	0,78	95	61,24	0,11	23,21	18,58
68	0,68	100	55,67	0,10	20,81	18,82
69	0,68	99	55,67	0,10	20,50	18,88
70	0,67	99	55,67	0,10	19,87	18,96
71	0,85	95	72,37	0,13	18,99	19,15
72	0,05	35	5,57	0,01	22,71	19,76
73	0,12	85	11,13	0,02	17,06	19,60
78	1,12	87	111,34	0,20	13,71	20,00
79	0,30	80	33,40	0,06	10,81	20,52
80	0,00	93	16,70	0,03	8,41	20,59
81	0,18	95	22,27	0,04	6,93	20,75
82	0,12	62	11,13	0,02	22,54	19,29
83	0,32	63	27,84	0,05	22,77	19,23
86	0,47	70	38,97	0,07	24,05	18,94
87	0,22	96	16,70	0,03	23,06	18,59
89	0,65	99	50,10	0,09	22,92	18,55
90	0,27	78	22,27	0,04	24,12	18,79
91	1,47	96	116,91	0,21	21,87	18,76
93	0,87	87	72,37	0,13	21,31	18,99
94	0,45	89	38,97	0,07	19,83	19,16
95	0,37	78	33,40	0,06	19,26	19,43
96	0,37	93	33,40	0,06	17,21	19,43
97	0,23	88	22,27	0,04	16,50	19,60
98	0,17	82	16,70	0,03	15,90	19,79
99	0,17	91	16,70	0,03	14,70	19,79
100	0,05	78	5,57	0,01	14,29	20,09
105	0,12	92	11,13	0,02	14,35	19,82
126	0,30	15	22,27	0,04	36,57	18,28
128	2,08	57	178,14	0,32	23,66	19,23
129	0,27	57	22,27	0,04	27,50	18,73
130	0,47	61	38,97	0,07	25,46	18,93
131	3,23	76	272,78	0,49	21,73	19,14
132	0,08	14	5,57	0,01	43,91	17,33
133	0,17	14	11,13	0,02	42,27	17,55
134	0,08	14	5,57	0,01	44,95	17,21
135	0,15	17	11,13	0,02	39,30	17,89
Média	2,09	69,52	139,71	0,25	24,90	18,84
Desvio Padrão	9,41				7,60	0,90

ANEXO III

Teste estatístico realizado para os dados de campo referentes à operação de extração de madeira com cabos aéreos, a fim de verificar a influência da distância de extração sobre a produtividade do sistema. Foram utilizadas classes com intervalo de 200 metros.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	1889.69374	944.84687	15.4908 **
Resíduo	520	31716.95191	60.99414	
Total	522	33606.64565		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
2	520	4.628	15.4908	<0.001

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	17.88942 a	nr = 292
2	15.49431 b	nr = 148
3	12.72567 c	nr = 83

$$dms = 18.36225 \times \text{RaizQuadrada}(1/nr1 + 1/nr2)$$

Onde nr1 e nr2 são os números de repetições de duas médias comparadas

nr = número de repetições do tratamento

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

MG = 16.39216

CV% = 47.64

Ponto médio = 30.60709