

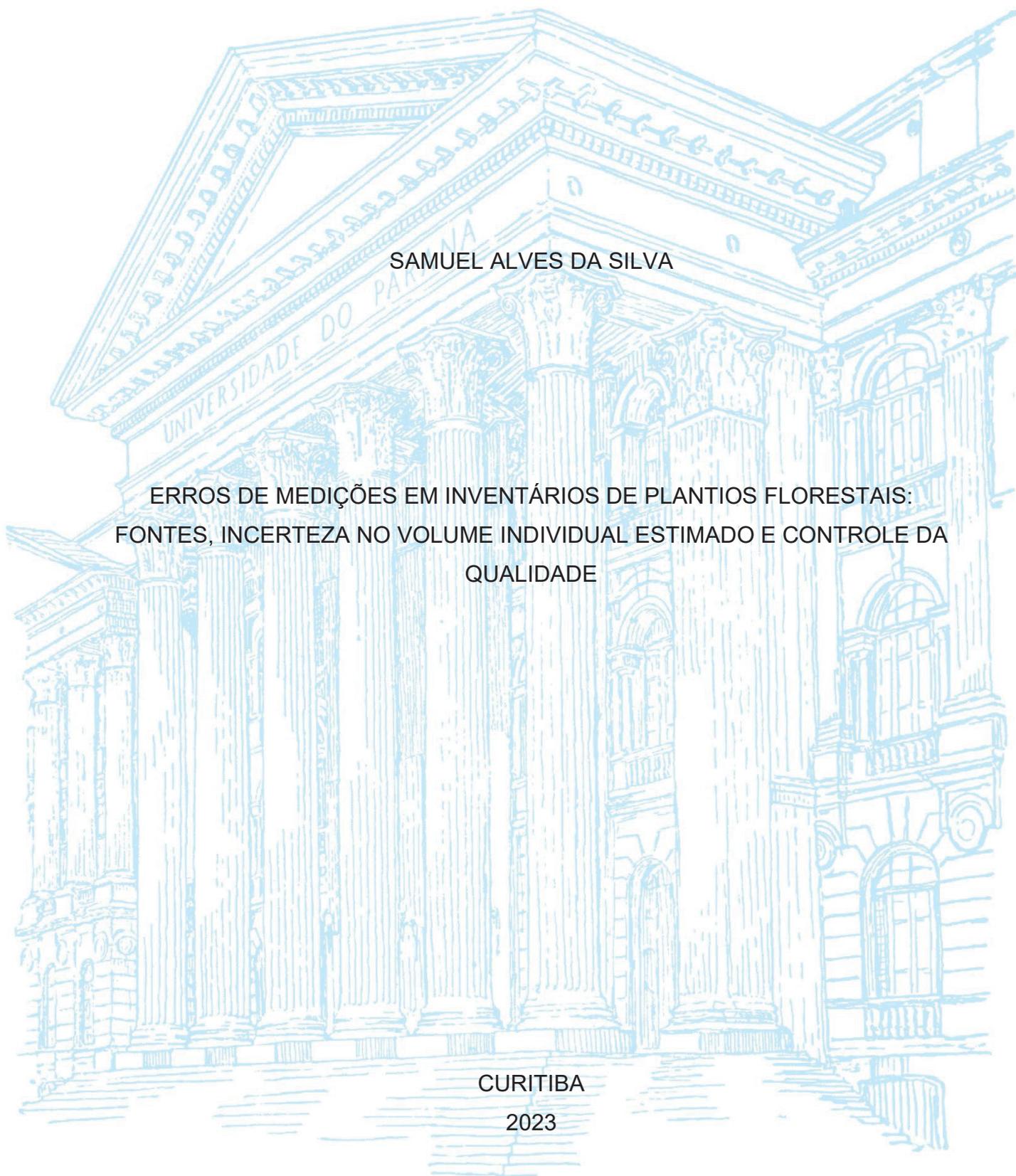
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SAMUEL ALVES DA SILVA

ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIOS DE PLANTIOS FLORESTAIS:
FONTES, INCERTEZA NO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO E CONTROLE DA
QUALIDADE

CURITIBA

2023



SAMUEL ALVES DA SILVA

ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIOS DE PLANTIOS FLORESTAIS:
FONTES, INCERTEZA NO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO E CONTROLE DA
QUALIDADE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, área de concentração em Manejo Florestal, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima

Coorientador: Prof. Dr. Júlio Eduardo Arce

Coorientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte

CURITIBA

2023

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Silva, Samuel Alves da

Erros de medições em inventários de plantios florestais: fontes, incerteza no volume individual estimado e controle da qualidade / Samuel Alves da Silva. - Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF

Orientador: Prof. Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima

Coorientadores: Prof. Dr. Júlio Eduardo Arce

Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 23/01/2023.

1. Levantamentos florestais. 2. Levantamentos florestais - Controle de qualidade. 3. Levantamentos florestais - Modelos matemáticos. 4. Árvores - Medição. 5. Florestas - Medição. 6. Eucalipto - Medição. 7. Incerteza de medição (Estatística). I. Nakajima, Nelson Yoshihiro. II. Arce, Júlio Eduardo. III. Dalla Corte, Ana Paula. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD - 634.9285
CDU - 634.0.524.6
630*5

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga - CRB9/424



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **SAMUEL ALVES DA SILVA** intitulada: **ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIO DE PLANTIOS FLORESTAIS: FONTES, INCERTEZA NO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO E CONTROLE DA QUALIDADE**, sob orientação do Prof. Dr. NELSON YOSHIHIRO NAKAJIMA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 23 de Janeiro de 2023.

Assinatura Eletrônica

11/02/2023 14:32:49.0

NELSON YOSHIHIRO NAKAJIMA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

31/01/2023 09:38:24.0

ANDREA NOGUEIRA DIAS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica

01/02/2023 08:13:08.0

ALEXANDRE BEHLING

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/02/2023 08:16:45.0

CARLOS ROBERTO SANQUETTA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

03/02/2023 09:07:56.0

MAURICIO ROMERO GORENSTEIN

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ - CAMPUS DOIS VIZINHOS)

Avenida Lothário Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 80210-170 - Tel: (41) 3360-4212 - E-mail: pgfloresta@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 252351

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 252351

À minha amada esposa Bruna

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo intelecto, saúde e por conceder toda a capacitação para o desenvolvimento dessa tese.

Ao meu orientador e amigo, Professor Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima, pelos conselhos, paciência, oportunidade, liberdade, confiança e exemplo.

Ao meu co-orientador, Professor Dr. Julio Eduardo Arce, pela dedicação, atenção e imensa contribuição para a realização deste trabalho.

À minha co-orientadora, Professora Dra. Ana Paula Dalla Corte, pela contribuição, sugestões e grande aprendizado desde o meu primeiro trabalho de iniciação científica.

Ao meu co-orientador, Professor Dr. Sebastião do Amaral Machado, pela imensa contribuição, ensinamentos, dedicação à Ciência Florestal e grande exemplo humano e profissional.

Ao professor Msc. Décio José de Figueiredo, pela amizade e imenso conhecimento transmitido.

À minha esposa Bruna, pelo amor, carinho, dedicação, companheirismo, compreensão e apoio em todos os momentos. E aos meus fiéis companheiros Boris e Amora, que me fazem sorrir todos os dias.

Ao meu pai, Wilson, e à minha mãe, Neuci, pelos ensinamentos valiosos, exemplo de vida e minha criação.

À minha irmã, Karen, e ao meu cunhado, Athos, pelo imenso apoio.

À minha sogra, Ana Celia, pela grande compreensão, apoio e amizade.

À minha amiga e madrinha de casamento, Akemi, pela confiança e amizade.

À TTG Brasil, pelo fornecimento dos dados, em especial ao Engenheiro Florestal M.Sc. Leonardo Machado Pires, pela atenção e auxílio.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos amigos da graduação, pelo companheirismo, boas conversas e amizade, em especial João Labres pelo auxílio.

Aos amigos da pós-graduação, Gabriel Orso, Luan, Maurício, Rafael, Lucas, Eduardo, Diego, Clebson, Antônio, Cícero, Carlos, Jorge, Gabriel, Tiago e Hudson.

Aos meus amigos da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de São José dos Pinhais, em especial Wagner Luiz Zacliffevis, Lucas Umbria, Diógenes Moreira Menon e Daniel Vicente de Carvalho, pela oportunidade e companheirismo.

*“...Bendito o homem que confia no Senhor, e cuja
confiança é o Senhor.
Porque será como a árvore plantada junto às águas,
que estende as suas raízes para o ribeiro, e não
receia quando vem o calor, mas a sua folha fica
verde; e no ano de sequeidão não se afadiga, nem
deixa de dar fruto.”*

(Jeremias 17:7,8).

RESUMO

O inventário florestal é a principal fonte primária de informações quantitativas e qualitativas dos recursos florestais. Dada a dependência entre a tomada de decisão e as estimativas dos inventários florestais em empreendimentos florestais, informações inexatas podem constituir em uma fonte de risco e incertezas para negócios florestais. Sendo assim, analisar as prováveis fontes dos erros de medições e métodos que auxiliem o controle da qualidade de coleta de dados é de suma importância para diminuir possíveis tendenciosidades nas estimativas de inventários florestais. Dessa forma, a presente tese foi dividida em quatro capítulos, sendo o primeiro dedicado a uma análise das variáveis genéricas que influenciam a ocorrência de erros de medições, o segundo dedicado aos elementos do clima que influenciam a ocorrência de erros de medições, o terceiro a um programa de controle da qualidade para inventários em plantações florestais e, finalmente, um quarto capítulo, dedicado à estimativa das incertezas do volume individual em função dos erros de medições de dap e altura total. Por meio de análise de regressão, os resultados sugerem que os erros de medição de cap tiveram como principais fontes as equipes de medição, as coordenadas, parcelas de remedição, idade dos plantios, espécies, espaçamento, dias de fim de semana, regiões dos plantios e as covas de cada árvore, enquanto os erros de medição de altura total, apenas as equipes e regiões. Quanto aos elementos do clima, os erros de medição de cap tiveram como principais fontes as temperaturas média, máxima e mínima, assim como a velocidade do vento e a latitude, enquanto os erros de medição de altura, as temperaturas média e máxima, insolação, velocidade do vento e longitude. Além disso, foi observada tendência à subestimativa da média dos erros de medição de cap em umidade relativa abaixo de 45%. Os erros de medições de dap e altura total apresentaram relação positiva com as incertezas do volume individual estimado, sendo assim, foi possível ajustar modelos com precisão satisfatória. Por fim, com destaque para as cartas de controle que possibilitaram a realização de uma análise detalhada do comportamento, intensidade e características dos erros de medições, as ferramentas da qualidade utilizadas se mostraram eficazes no que diz respeito à identificação das fontes e priorização dos erros de medições, elaboração e implementação de ações mitigatórias para melhoria contínua do processo de coleta de dados do inventário florestal.

Palavras-chave: Erros não-amostrais. Acuracidade. Propagação. Controle da qualidade. Checagem de parcelas.

ABSTRACT

The forest inventory is the main primary source of quantitative and qualitative information on forest resources. Given the dependence between decision making and estimates of forest inventories in forestry enterprises, inaccurate information can constitute a source of risk and uncertainty for forestry businesses. Therefore, analyzing the probable sources of measurement errors and methods that help control the quality of data collection is of paramount importance to reduce possible biases in forest inventory estimates. Thus, the present thesis was divided into four chapters, the first being dedicated to an analysis of the generic factors that influence the occurrence of measurement errors, the second dedicated to the climate elements that influence the occurrence of measurement errors, the third to a quality control program for inventories in forest plantations and finally a fourth chapter, dedicated to the estimation of individual volume differences as a function of dbh and total height measurement errors. Through regression analysis, the results suggest that cbh measurement errors had as main sources the measurement teams, coordinates, remeasurement plots, plantation age, species, spacing, weekend days, plantation regions and the pits of each tree, while the total height measurement errors, only teams and regions. As for the climate elements, the cbh measurement errors had as main sources the average, maximum and minimum temperatures, as well as the wind speed and latitude, while the height measurement errors the average and maximum temperatures, insolation, wind speed wind and longitude. In addition, there was a tendency to underestimate the average of cbh measurement errors in relative humidity below 45%. The measurement errors of dbh and total height showed a positive relationship with the differences in the estimated individual volume, thus, it was possible to fit models with satisfactory accuracy. Finally, with emphasis on the control charts that made it possible to carry out a detailed analysis of the behavior, intensity and characteristics of measurement errors, the quality tools used proved to be effective in terms of identifying the sources and prioritizing measurement errors, elaboration, and implementation of mitigating actions for continuous improvement of the forest inventory data collection process.

Keywords: Non-sampling errors. Accuracy. Propagation. Quality control. Checking plots.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESUMO DESCRITIVO DO BANCO DE DADOS UTILIZADOS COM ÊNFASE NAS QUANTIDADES DE OBSERVAÇÕES DE ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA PARA AS VARIÁVEIS DISCRETAS E CATEGÓRICAS ANALISADAS.....	43
TABELA 2 - RESUMO DESCRITIVO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.....	45
TABELA 3 - RESUMO ESTATÍSTICO DOS AJUSTES DOS MODELOS COM OS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. COMO VARIÁVEIS REPOSTAS, EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS.....	56
TABELA 4 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS.....	56
TABELA 5 - ESTATÍSTICAS RESULTANTES DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS.....	57
TABELA 6 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS.....	58
TABELA 7 - ESTATÍSTICAS RESULTANTES DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS.....	59
TABELA 8 - RESUMO DESCRITIVO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DAS PARCELAS DO INVENTÁRIO FLORESTAL REALIZADO EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.	77
TABELA 9 - RESUMO ESTATÍSTICO DOS AJUSTES DOS MODELOS COM OS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. COMO VARIÁVEIS REPOSTAS, EM FUNÇÃO DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO.....	83
TABELA 10 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i>	

SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS RELACIONADAS AOS ELEMENTOS DO CLIMA	83
TABELA 11 - ESTATÍSTICAS RESULTANTES DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP., EM FUNÇÃO DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO	84
TABELA 12 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS.....	85
TABELA 13 - ESTATÍSTICAS RESULTANTES DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP., EM FUNÇÃO DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO.....	85
TABELA 14 - LIMITES DE TOLERÂNCIA E FREQUÊNCIA DE AFERIÇÃO DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS NOS PROCEDIMENTOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL	100
TABELA 15 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS CAP, ALTURA E VOLUME E DOS ERROS DE MEDIÇÕES	107
TABELA 16 - INFORMAÇÕES DAS CARTAS DE CONTROLE DE CONSTRUÍDAS PARA O MONITORAMENTO DOS ERROS DE MEDIÇÕES NO INVENTÁRIO FLORESTAL	113
TABELA 17 - RESULTADO DO AJUSTE DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE DAP E H.....	132

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO ONDE SE ENCONTRAM OS PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP., MESORREGIÕES DO VALE DO JEQUITINHONHA E REGIÃO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS	41
FIGURA 2 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.	46
FIGURA 3 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS COM PROVÁVEL INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.	47
FIGURA 4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS COM PROVÁVEL INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.	48
FIGURA 5 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP., EM FUNÇÃO DAS LINHAS, POSIÇÃO NAS LINHAS E TRONCOS	49
FIGURA 6 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DOS PERÍODOS DA SEMANA, TIPOS DE PARCELAS E ESQUIPES DE MEDIÇÃO.....	50
FIGURA 7 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS TEXTURAS DO SOLO E REGIÕES DOS PLANTIOS	51
FIGURA 8 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO COORDENADAS GEOGRÁFICAS	52
FIGURA 9 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP., EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E QUALIDADE DO FUSTE.....	53
FIGURA 10 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE	

INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO E DA IDADE DO PLANTIO.....	54
FIGURA 11 - GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA EM FUNÇÃO DOS VALORES DE CAP E ALTURA OBTIDOS NAS MEDIÇÕES E NA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.....	55
FIGURA 12 - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO E HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS.....	58
FIGURA 13 - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO E HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS.....	60
FIGURA 14 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NAS ÁREAS DE ESTUDO NAS MESORREGIÕES DO VALE DO JEQUITINHONHA E REGIÃO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS	74
FIGURA 15 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS REALIZADOS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.	78
FIGURA 16 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO COM PROVÁVEL INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.	79
FIGURA 17 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO COM PROVÁVEL INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP.	80
FIGURA 18 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA POR COORDENADAS GEOGRÁFICAS. A LINHA SÓLIDA EM VERMELHO É UMA CURVA SUAVIZADA LOCALMENTE.....	81
FIGURA 19 - GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DO TEMPO.....	82
FIGURA 20 - GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DO TEMPO	82

FIGURA 21 - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO E HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP., DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO.....	84
FIGURA 22 - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO E HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE <i>EUCALYPTUS</i> SP., DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO	86
FIGURA 23 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, VALE DO JEQUITINHONHA, REGIÃO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS	97
FIGURA 24 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE INVENTÁRIO FLORESTAL COM ETAPAS DO PROGRAMA DE CONTROLE DA QUALIDADE.....	99
FIGURA 25 - GRÁFICO DE PARETO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE ERROS OBSERVADOS NAS PARCELAS DO INVENTÁRIO FLORESTAL	107
FIGURA 26 - GRÁFICOS DE DISPERSÃO DOS ERROS DE VOLUME EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP (A) E ALTURA (B) COM SUAS RESPECTIVAS LINHAS DE TENDÊNCIA	108
FIGURA 27 - HISTOGRAMAS (A, B, C) E GRÁFICOS BOXPLOT (D, E, F) DOS ERROS DE MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS CAP E ALTURA E DOS ERROS DO VOLUME ESTIMADO, RESPECTIVAMENTE	108
FIGURA 28 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP PARA CADA PARCELA CHECADA NO INVENTÁRIO FLORESTAL	110
FIGURA 29 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA PARA CADA PARCELA CHECADA NO INVENTÁRIO FLORESTAL	111
FIGURA 30 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO DE CADA PARCELA CHECADA NO INVENTÁRIO FLORESTAL	112
FIGURA 31 - GRÁFICOS Q-Q (A, B, C) E GRÁFICOS DE FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (D, E, F) PARA OS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP, ALTURA E ERROS DE VOLUME, RESPECTIVAMENTE.....	113
FIGURA 32 - CARTA DE CONTROLE MULTIVARIADA T^2 DE HOTELLING (A) E GRÁFICO ELÍPTICO (B) PARA A AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE CAP E ALTURA	114
FIGURA 33 - CARTAS DE CONTROLE \bar{x} DE SHEWHART PARA ERROS DE MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS CAP (A) E ALTURA (B) E, ERROS DE VOLUME (C).....	115
FIGURA 34 - CARTAS DE CONTROLE s DE SHEWHART PARA ERROS DE MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS CAP (A) E ALTURA (B) E, ERROS DE VOLUME (C).....	117
FIGURA 35 - DIAGRAMA DE CAUSA-EFEITO COM AS POSSÍVEIS FONTES DE ERROS DE MEDIÇÕES OCORRIDOS NO INVENTÁRIO FLORESTAL	118

FIGURA 36 - GRÁFICOS DE DISPERSÃO DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE DAP (A) E HT (B), ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE DAP (C)	131
FIGURA 37 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS ORDINÁRIOS RESULTANTE DOS MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE DAP E H	133
FIGURA 38 - HISTOGRAMAS DOS RESÍDUOS ORDINÁRIOS RESULTANTES DOS MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE DAP E H	134

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	HIPÓTESES	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	OBJETIVO GERAL	23
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1	INVENTÁRIOS FLORESTAIS	24
3.2	IMPORTÂNCIA DOS INVENTÁRIOS	25
3.3	ERROS EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS	27
3.4	ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS	28
3.5	IMPACTO DOS ERROS DE MEDIÇÕES	30
3.6	CONTROLE DA QUALIDADE EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS	31
3.7	REFERÊNCIAS	33
4	VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A OCORRÊNCIA DE ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS	37
4.1	RESUMO	37
4.2	ABSTRACT	37
4.3	INTRODUÇÃO	38
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	40
4.4.1	Área de estudo	40
4.4.2	Inventário florestal e procedimentos de coleta de dados	41
4.4.3	Procedimentos de checagem e informações coletadas	42
4.4.4	Variáveis analisadas	43
4.4.5	Análise estatística	44
4.5	RESULTADOS	45
4.6	DISCUSSÃO	60
4.7	CONCLUSÃO	66
4.8	REFERÊNCIAS	67
5	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DO CLIMA NA OCORRÊNCIA DE ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS	71
5.1	RESUMO	71
5.2	ABSTRACT	71
5.3	INTRODUÇÃO	72
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	73
5.4.1	Área de estudo	73
5.4.2	Inventário florestal e procedimentos de coleta de dados	74
5.4.3	Procedimentos de checagem e informações coletadas	75
5.4.4	Análise estatística	76

5.5	RESULTADOS	77
5.6	DISCUSSÃO	86
5.7	CONCLUSÃO.....	89
5.8	REFERÊNCIAS.....	90
6	UM PROGRAMA DE CONTROLE DA QUALIDADE PARA INVENTÁRIOS EM PLANTAIOS FLORESTAIS E SUA RELAÇÃO COM ERROS DE MEDIÇÕES.....	93
6.1	RESUMO.....	93
6.2	ABSTRACT	93
6.3	INTRODUÇÃO	94
6.4	MATERIAIS E MÉTODOS	96
6.4.1	Área de estudo	96
6.4.2	Inventário florestal, procedimentos de coleta de dados e protocolo de medição.....	97
6.4.3	Modelagem estatística	98
6.4.4	Programa de controle da qualidade	98
6.4.5	Treinamentos e instruções.....	100
6.4.6	Aferição de instrumentos	100
6.4.7	Checagem das parcelas	101
6.4.8	Folha de verificação	101
6.4.9	Diagrama de Pareto	101
6.4.10	Diagrama de causa-efeito	102
6.4.11	Análise descritiva dos dados.....	102
6.4.12	Cartas de controle	103
6.4.13	Carta de controle multivariada (Carta T^2 de Hotelling)	103
6.4.14	Cartas de controle univariadas (cartas de Shewhart).....	104
6.4.15	Padrão de qualidade	106
6.5	RESULTADOS	106
6.6	DISCUSSÃO	119
6.7	CONCLUSÃO.....	122
6.8	REFERÊNCIAS.....	123
7	ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES	126
7.1	RESUMO.....	126
7.2	ABSTRACT	126
7.3	INTRODUÇÃO	127
7.4	MATERIAIS E MÉTODOS	128
7.4.1	Área de estudo	128
7.4.2	Inventário florestal e procedimentos	129
7.4.3	Estimativa do volume individual	129
7.4.4	Checagem das parcelas	129
7.4.5	Modelos ajustados	130

7.5	RESULTADOS	131
7.6	DISCUSSÃO	134
7.7	CONCLUSÃO.....	136
7.8	REFERÊNCIAS.....	136
8	RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	139
9	REFERÊNCIAS GERAIS.....	140

1 INTRODUÇÃO

Informações são vitais para o processo de tomada de decisão, para planejar e compreender qualquer tipo de empreendimento. Quando se trata de empreendimentos florestais, o inventário florestal é a principal fonte primária de informações quantitativas e qualitativas dos recursos florestais, isso quer dizer que a maioria das decisões são tomadas com base nas informações provenientes dos inventários florestais, seja de forma direta ou indireta (PUKKALA, 2013; KERSHAW JR *et al.*, 2016; LIN *et al.*, 2020).

Realizar o censo em grandes áreas de florestas é quase sempre inviável, sendo assim, técnicas de amostragem são largamente utilizadas para a estimativa das variáveis de interesse, o que implica na admissão do erro de amostragem. Em contraste com o erro de amostragem, os demais erros que acometem os inventários florestais são denominados erros não-amostrais e podem ter fontes de diversas naturezas (LOETSCH; ZÖHRER; HALLER, 1973).

Devido ao fato de que qualquer medição física estar associada a incertezas, os erros de medições assumem particular importância entre os erros não-amostrais (RABINOVICH, 2006; TRAN; TRAN; RAKITZIS, 2019). Uma vez que as atividades relacionadas à coleta de dados em inventários florestais se resumem a uma exaustiva sequência de medições de variáveis dendrométricas, a presença de erros de medições na coleta de dados é inevitável, sendo que os erros de medições podem estar relacionados a três principais fatores: as características dos indivíduos arbóreos; os instrumentos utilizados nas medições; as pessoas que tomam as medidas (LOETSCH; ZÖHRER; HALLER, 1973; OMULE, 1980).

Dependendo da magnitude, tanto os erros não-amostrais, como os erros de medições podem prejudicar a acuracidade e provocar tendenciosidades nas estimativas de inventários florestais, até mesmo quando o erro de amostragem calculado é baixo. Dada a dependência entre a tomada de decisão e as estimativas dos inventários florestais em empreendimentos florestais, informações inexatas podem constituir em uma fonte de risco e incertezas para negócios florestais e tendem a ser agravadas pelo longo horizonte de planejamento da produção florestal (MCROBERTS; WESTFALL, 2014).

Tendenciosidades nas estimativas do inventário florestal podem provocar situações em que exista a necessidade de adaptação à falta ou sobra de madeira nas

indústrias (KANGAS; KANGAS, 1999), intervenções silviculturais e colheitas fora dos períodos que proporcionariam a otimização dos recursos florestais (MÄKINEN KANGAS; MEHTÄTALO, 2010) e, negociações desvantajosas devido à maior ou menor quantidade de matéria-prima negociada (SILVA *et al.*, 2019).

Embora o efeito dos erros de medições nas estimativas de inventários florestais já venha sendo estudado há algum tempo, ainda é dada pouca importância em muitos casos, ou até mesmo considerada sua inexistência em muitas situações (CUNIA, 1965; GERTNER, 1990; BERGER *et al.*, 2012). Porém, inventários florestais de relevância regional ou nacional, com é o caso de inventários nacionais, contam com programas de garantia e controle da qualidade bem desenvolvidos (GASPARINI *et al.*, 2009; BERGER *et al.*, 2012; BERGER *et al.*, 2014; GSCHWANTNER *et al.*, 2022), assim como também é o caso dos inventários que envolvem grandes quantias de dinheiro, seja na contratação da atividade ou na negociação de recursos florestais, dos quais raramente se tem acesso às informações dos programas de controle da qualidade por se tratar de empresas privadas (SILVA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019).

Embora programas de controle da qualidade sejam constantemente estudados e aperfeiçoados, ainda existem diversas lacunas do conhecimento a serem preenchidas, principalmente no que diz respeito à eficiência e aplicabilidade dos métodos adotados para aferir qualidade à coleta dos dados. Embora os programas de controle da qualidade de inventários florestais apresentem grande utilidade para definição de estratégias de mitigação e prevenção de erros de medições, ferramentas e métodos específicos de controle de processo e gestão da qualidade raramente foram utilizados.

Ainda referente aos programas de controle da qualidade, no que diz respeito ao efetivo impacto dos erros de medições, a estimativa da variação do volume decorrente dos erros de medições das variáveis coletadas nas parcelas e utilizadas como variáveis preditoras em modelos de volume individual pode trazer expressivo ganho na agilidade do processamento de dados de checagens de parcelas e tomada de decisão, todavia, são raros os estudos com essa finalidade.

Por outro lado, conhecer a relação das prováveis fontes com os erros de medições pode trazer informações que proporcionem diversas melhorias no que se refere à prevenção e otimização de recursos para atividades de planejamento e treinamento de inventários florestais, assim como conhecer a influência de variáveis relacionadas aos elementos do clima nos erros de medições é de grande valia no que

diz respeito ao planejamento de períodos e jornadas de coleta de dados em inventários florestais.

Dessa forma, visando os plantios florestais do Brasil, o presente trabalho buscou estudar as prováveis fontes dos erros de medições de variáveis dendrométricas em um inventário realizado em plantios de espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus* e, apresentar métodos que auxiliem o controle da qualidade dos dados coletados em inventários florestais.

No que diz respeito à estrutura do trabalho, foram desenvolvidos quatro capítulos, nos quais foram abordados diferentes temas e objetivos relacionados aos erros de medição:

- i) análise das variáveis genéricas que influenciam a ocorrência de erros de medições das variáveis cap e altura;
- ii) análise dos elementos do clima que influenciam a ocorrência de erros de medições das variáveis cap e altura;
- iii) validação de um programa de controle da qualidade para inventários em plantações florestais;
- iv) validação de um método para a estimativa das diferenças do volume individual em função dos erros de medições de dap e altura total.
- v) recomendações e considerações finais.

1.1 HIPÓTESES

Todo o estudo foi desenvolvido com base em informações provenientes de checagem de parcelas de inventário florestal em plantios de *Eucalyptus* sp., sendo que, as medições realizadas na checagem foram consideradas como os valores verdadeiros das variáveis mensuradas. Nesse contexto, os capítulos que desenvolvidos na presente tese abordam as seguintes hipóteses:

- i) “A existência de relação entre os erros de medições das variáveis cap e altura e diversas outras obtidas nas atividades de coleta de dados do inventário florestal pode trazer informações que proporcionem melhorias na prevenção e otimização de recursos para atividades de planejamento e treinamento para coleta de dados”.

- ii) “A existência de relação entre os erros de medições das variáveis cap e altura e variáveis relacionadas aos elementos do clima pode trazer informações que proporcionem mitigar influências negativas por meio da adaptação dos períodos e jornadas de trabalho, a fim de evitar que as atividades de coleta de dados sejam realizadas em condições de tempo, consideradas extremas”.
- iii) “Um programa de controle da qualidade aplicado ao processo de coleta de dados de inventários florestais pode ser eficaz na identificação das fontes dos erros de medições, priorização, elaboração e implementação de ações mitigatórias para melhoria contínua do processo de coleta de dados do inventário florestal”.
- iv) “A variação do volume decorrente dos erros de medições das variáveis coletadas nas parcelas pode ser estimada por meio de análise de regressão e dessa forma trazer expressivo ganho na agilidade do processamento de dados de checagens de parcelas”.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi analisar as prováveis fontes dos erros de medições de variáveis dendrométricas em um inventário florestal realizado em plantios de espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus* e, apresentar métodos que auxiliem o controle da qualidade e a estimativa do impacto de tais erros nas estimativas da variável de interesse.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- analisar a qualidade das medições quanto à tendenciosidade e aleatoriedade;
- analisar possíveis relações entre os erros de medições e diversas prováveis fontes observadas e obtidas junto às atividades de coleta de dados;
- analisar possíveis relações entre os erros de medições e diversas prováveis fontes (variáveis) relacionadas aos elementos do clima;
- desenvolver e aplicar um programa de controle da qualidade ao processo de coleta de dados de inventários florestais com o intuito de atingir a melhoria contínua.
- ajustar modelos matemáticos para a estimativa das variações dos volumes individuais de cada árvore em função dos erros de medições de dap e altura total.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INVENTÁRIOS FLORESTAIS

O inventário florestal é o procedimento responsável pela obtenção das informações qualitativas e quantitativas dos recursos florestais, associados à vegetação e componentes, além de outras características das áreas onde estão localizados os povoamentos florestais (KERSHAW JR *et al.*, 2016).

Com uma intensa exploração desordenada dos recursos florestais já na idade média, a escassez de madeira provocou a necessidade de estudos relacionados à silvicultura e manejo das florestas, conseqüentemente, para o planejamento de todas essas atividades se fez necessárias avaliações e estimativas do estoque e crescimento das florestas (GABLER; SCHADAUER, 2007).

Mais especificamente, o objetivo dos inventários florestais é estimar valores médios e totais para variáveis e características florestais de interesse em uma área definida. Ou seja, além de variáveis de interesse tradicionais como o crescimento e estoques de madeira e carbono, os inventários também podem ter outros objetivos como a estimativa da cobertura de uma determinada tipologia florestal ou até mesmo indicadores relacionados à biodiversidade florestal (KANGAS; MALTAMO, 2006).

De acordo com Péllico Netto e Brena (1997), os inventários florestais podem variar de acordo com o nível de abrangência, podendo ser realizados a nível de áreas restritas, nível regional e nacional. Principalmente devido à relevância de assuntos relacionados às mudanças climáticas, inventários a nível global também passaram a ser realidade, os quais também podem servir a certos propósitos na política em nível global, como acordos internacionais sobre ações relacionadas à biodiversidade ou ao aquecimento global (KANGAS; MALTAMO, 2006).

Um inventário florestal pode ser realizado como censo, ou seja, a enumeração completa e medição de todas as árvores de uma determinada área de interesse, todavia, devido às grandes dimensões das áreas de floresta e plantios, o censo geralmente é inviável na silvicultura, por causa das grandes áreas envolvidas. Portanto, na maioria dos inventários florestais são utilizados processo de amostragem, no qual são obtidas informações de parte da população e posteriormente são feitas inferências para toda ela (AVERY; BURKHART, 1994).

Embora métodos baseados em amostragem já tenham sido utilizados pelo menos um século antes que os fundamentos matemáticos das técnicas de amostragem fossem descritos oficialmente, até o século XIX os inventários florestais ainda eram realizados com base na estimativa visual e na enumeração completa, até que então, percebeu-se a possibilidade de reduzir custos usando amostras representativas por meio do conhecimento estatístico, quando então, entre os anos 1900 e 1920 foram destinados esforços para introdução desse conhecimento na literatura florestal (LOETSCH; ZÖHRER; HALLER, 1973).

É importante mencionar que os métodos estatísticos aplicados aos inventários florestais excedem aos processos de amostragem. De forma resumida, com o uso da análise de regressão, o volume, biomassa ou carbono de árvores individuais geralmente são estimados em função de variáveis de mais fácil obtenção como os diâmetros e as alturas das árvores. As estimativas dos valores das árvores individuais são agregadas ao nível de parcelas e posteriormente ao nível de povoamento, os quais podem compor grandes extensões de áreas de florestas (MCROBERTS; WESTFALL, 2016).

Os inventários florestais apresentam contínua evolução, sendo objeto de estudo e pesquisa a nível global, pois existem sistemas avançados de inventário florestal estabelecidos em todo o mundo. Tendo em vista o crescente interesse mundial pelo desenvolvimento sustentável e importância dada aos recursos naturais, além da abordagem metodológica, conforme a necessidade, os inventários florestais podem evoluir em termos de conteúdo, conceito e definições (TOMPPO *et al.*, 2010).

3.2 IMPORTÂNCIA DOS INVENTÁRIOS

Como principal fonte primária de informações quantitativas e qualitativas dos recursos florestais, dependendo do objetivo, os inventários podem subsidiar o planejamento de políticas públicas e o ordenamento territorial de um país ou região quando de cunho tático. Assim como fornecer informações fundamentais para o funcionamento de todo setor de base florestal quando de cunho tático, o que inclui a avaliação de ativos, compra e venda de madeira e outros recursos (SANQUETTA *et al.*, 2009).

A indústria florestal apresenta características específicas no que se refere à heterogeneidade da matéria-prima, além da madeira proveniente dos povoamentos

florestais possuir sortimentos destinados a diferentes segmentos, existe a transformações da madeira ao longo dos processos na cadeia produtiva, quando para a produção de um produto são gerados subprodutos, também com diferentes finalidades. Essas particularidades tornam o planejamento e controle da produção florestal uma tarefa complexa, na qual as informações sobre a disponibilidade, qualidade da oferta (todas obtidas por meio de inventários florestais), produção e demanda ao longo de toda a cadeia de abastecimento são fundamentais para sustentabilidade da produção (FRAYRET *et al.*, 2008).

Segundo D'Amours, Ronnqvist e Weintraub (2008), devido a alguns fatores como os longos ciclos de rotação dos povoamentos florestais e o longo período de depreciação das fábricas, o planejamento estratégico da produção florestal realmente é de longo prazo, isso intensifica a necessidade de informações precisas para a tomada de decisões relacionadas ao manejo florestal, silvicultura, conservação da natureza, infraestrutura, investimentos e desenvolvimento de produtos.

De acordo com Pukkala (1998), o longo horizonte de planejamento da produção florestal implica na susceptibilidade dos empreendimentos florestais à influência de variáveis de pouco ou nenhum controle e, conseqüentemente, a riscos e incertezas decorrentes delas. Os fatores de difícil controle mais importantes possuem naturezas climáticas, econômicas e biológicas, sendo assim, devido à profunda relação com a produção florestal dos povoamentos, a precisão das informações provenientes dos inventários não é só fundamental, como a má qualidade deles pode agravar os riscos e incertezas dos empreendimentos.

O principal objetivo do planejamento da produção florestal é otimizar a alocação de fatores de produção, ou seja, indicar a melhor destinação, visando a maximização das utilidades dos recursos florestais. Embora simulações e uma diversidade de ferramentas possam ser utilizadas para subsidiar a tomada de decisão nas diferentes áreas da produção florestal, o uso de tais ferramentas só é viável mediante às estimativas obtidas por meio de inventários florestais (PUKKALA, 2013).

3.3 ERROS EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS

Segundo Cunia (1965), as estimativas provenientes de inventários florestais realizados por meio de processos de amostragem estão sujeitas a três fontes de erros, os provenientes do processo de amostragem, os relacionados ao método estimativo do volume individual ou por unidade de área e os erros de medições das variáveis dendrométricas.

De acordo com Westfall e Patterson (2007), a adoção de processos de amostragem para a estimativa dos parâmetros estatísticos de toda a população implica diretamente na admissão do chamado erro amostral ou de amostragem, devido ao fato de parte da população não ser mensurada. É importante mencionar que o erro de amostragem é um componente aleatório, que, assim como as estimativas, também pode ser calculado (BRASSEL; LISCHKE, 2001).

Em contraste com o erro de amostragem, os demais erros que acometem os inventários florestais são denominados erros não-amostrais e geralmente podem ocorrer mesmo que seja adotado o censo (LOETSCH; ZÖHRER, F.; HALLER, 1973). De acordo com Sanquetta *et al.* (2009), os erros não-amostrais podem ser caracterizados como um engano, ou seja, consiste na caracterização imprópria, incompleta e contraditória de alguma coisa, a qual pode ser avaliada. Dessa forma, os erros não amostrais podem ter fontes de diversas naturezas, como os erros cometidos na definição das áreas e formas das parcelas no momento da alocação, na determinação precisa da área da população, na identificação das espécies quando se trata de florestas naturais ou talhões mistos, erros de medições das circunferências/diâmetros e alturas das árvores, erros cometidos na cubagem das árvores, no processamento dos dados, no ajuste de modelos de regressão e agrupamento em classes.

Segundo McRoberts e Westfall (2016), os erros das estimativas de um modelo estatístico são frequentemente ignorados, muitas vezes fazendo com que a precisão do inventário florestal expresso pelo erro amostral seja otimista. A incerteza relacionada às estimativas de modelos estatísticos pode ser atribuída a especificação do modelo; incertezas nos valores das variáveis independentes; incertezas nas estimativas dos parâmetros do modelo e; variabilidade residual em torno das estimativas do modelo.

De acordo com Gertner (1991), as estimativas dos inventários florestais ainda podem ser acometidas por erros de agrupamento dos dados em classes e erros de medições, os quais podem afetar a acuracidade das variáveis independentes de modelos e funções estatísticas. Segundo Machado e Figueiredo Filho (2006), “erro” significa desvio do valor real, o que está associado à falta de acuracidade e exatidão, sendo as principais fontes de erros de medições: a falta de acuracidade de instrumentos, influência da topografia do terreno, fatores físicos e do tempo e imperfeição humana.

Todavia, embora o conhecimento das demais fontes de erros seja conhecida, raramente são quantificadas na apresentação dos resultados de inventários florestais, sendo assim, estimativas tendenciosas podem ocorrer mesmo quando o erro de amostragem se encontra dentro dos limites aceitáveis (COCHRAN, 1977). Dessa forma, Gertner e Khöl (1992) salientam a necessidade de quantificar a contribuição proporcional de cada fonte, assim de apresentar um erro global do inventário a qual além de fornecer uma informação mais realista da precisão do inventário, também pode proporcionar a revisão de métodos, verificar a necessidade de treinamento das equipes de campo, corrigir tendenciosidades e verificar a consistência dos dados.

3.4 ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS

Não existem sistemas de medição perfeitos, sendo assim, qualquer medição física está associada a incertezas, ou seja, isso quer dizer que qualquer medição realizada apresenta erro de medição a um determinado nível de acuracidade, mesmo que esse seja ínfimo (RABINOVICH, 2006; TRAN; TRAN; RAKITZIS, 2019). Segundo Omule (1980), as diferenças entre o valor verdadeiro e a medição inexata de um objeto são denominadas erros de medições e podem ser mensuradas em termos de tendenciosidade e aleatoriedade.

De acordo com Machado e Figueiredo Filho (2006), de um modo geral, os erros de medições podem ser classificados como: Erros sistemáticos, os quais se repetem no mesmo sentido, sempre subestimando ou superestimando a variável mensurada, sendo que quase sempre são cumulativos; Erros compensantes, geralmente decorrentes de arredondamentos e aproximações, os quais por terem magnitude casualizada (negativa e positiva), tendem a se compensar e geralmente são independentes do instrumento e operador; e Erros acidentais, os quais são

cometidos por engano ou descuido do operadores ou do registrador das informações, sendo importante destacar que são erros cometidos esporadicamente e são evitáveis trabalhando-se cuidadosamente.

Como as atividades de coleta de dados em inventários florestais se resumem a uma exaustiva e contínua série de medição das variáveis dendrométricas das árvores localizadas nas parcelas, de acordo com Canavan e Hann (2004), a ocorrência de erros de medições na coleta de dados em inventários florestais é inevitável. Além disso, esses erros podem ter característica cumulativa, o que significa que o aumento do tamanho da amostra não implicará na diminuição da intensidade com que esses erros afetam as estimativas.

O diâmetro/circunferência à altura do peito e as alturas das árvores são as variáveis mais mensuradas em inventários florestais. Segundo Machado e Figueiredo Filho (2006), há possibilidade de ocorrência de erros relacionados ao instrumento e ao operador. Quando se trata de circunferência de fustes excêntricos, ainda existe o erro relacionado à própria conceituação matemática na transformação para diâmetros e áreas transversais. Ainda, é importante destacar que alguns erros são específicos de alguns instrumentos, como por exemplo o não paralelismo do braço das sutas, o estiramento de fitas, e erros na visada tangencial de alguns instrumentos. Enquanto outros são genéricos como a colocação do instrumento inclinado em relação ao fuste e a não observância da altura exata da medição.

De acordo com Loetsch, Zöhrer e Haller (1973), durante as medições realizadas em inventários florestais os erros de medições podem estar relacionados a três principais fatores: os objetos (variáveis/indivíduos arbóreos); os instrumentos e os observadores. Quando se trata de alturas, além da precisão do instrumento utilizado, ainda existem outras particularidades relacionadas à distância entre o observador e objeto, que tendem a aumentar as probabilidades de ocorrência de erros, como por exemplo a interferência do subosque, da vegetação herbácea na base das árvores, a própria copa, a inclinação das árvores e do terreno e a luminosidade.

Os erros de medições podem apresentar variação no que diz respeito à fonte, ao tipo da variável mensurada, ao emprego dela e à magnitude do impacto nas estimativas. De acordo Kangas e Kangas (1999), o efeito dos erros de medições dos valores de cap nas variáveis de área basal e diâmetro médio são considerados aditivos, enquanto os efeitos dos erros de medições dos valores de cap e altura total,

na estimativa do crescimento individual em diâmetro, altura total, volume e altura da copa, são considerados multiplicativos.

De acordo com Kangas (1998), os erros de medições podem afetar o ajuste de modelos estatísticos relacionados a fenômenos biológicos, devendo ser levados em consideração principalmente quando há interesse na interpretação dos coeficientes do ajuste. Segundo Stefanski (2000), os erros de medições podem afetar o coeficiente de inclinação em modelos ajustados por regressão linear, fazendo com que a correlação entre as variáveis preditas e preditoras aparente seja menor do que realmente é. De acordo com Kangas, (1998), quando se trata de modelos multivariados e não-lineares os reais efeitos dos erros de medições ainda podem ficar ocultos, podendo alterar até mesmo os sinais dos coeficientes estimados.

Mäkinen, Kangas e Mehtätalo (2010), ao analisarem as distribuições, correlações e tendências de erros de medições observaram que os erros tinham distribuição normal. Canavan e Hann (2004) mencionam que a distribuição dos erros de medições nem sempre é normal, principalmente quando há tendenciosidades nas medições. Além disso, os autores mencionam que os erros de medições podem ser modelados por meio da modelagem por distribuição de erros em duas etapas.

3.5 IMPACTO DOS ERROS DE MEDIÇÕES

Ao estudar a magnitude do impacto dos erros de medições nas estimativas da média e variância de volume de um povoamento florestal, Gertner (1990) observou que, embora estatisticamente significantes, os erros de medições apresentaram menor impacto quando comparados ao erro de amostragem. Já Gertner e Khöl (1992), ao desenvolver uma compilação de erros para o inventário nacional da Suíça observaram que as estimativas eram significativamente mais sensíveis a erros de medições sistemáticos que aleatórios.

Em um estudo sobre os efeitos dos erros de medições na estimativa de crescimento de variáveis dendrométricas por meio de simulação, Gertner e Dzialowy (1984) observaram que os erros de medições causaram efeitos significativos nas estimativas dos modelos ajustados, onde variações na ordem de 10 % nos valores de *dap* causaram tendenciosidades de até 25 % na estimativa da área basal.

Berger *et al.* (2014), ao buscar quantificar a propagação dos erros de medições na estimativa de volumes individuais, por meio da lei de propagação de

erros e simulação de Monte Carlo, observou que para todas as espécies estudadas, o erro padrão da estimativa por parcela foi aproximadamente 11%. Dessa forma, concluíram que embora tenha pouco impacto para inventários nacionais, os erros de medições podem impactar severamente inventários de pequena escala e informações de parcelas isoladas utilizadas para fins de validações.

Ao comparar o impacto dos erros de medições na estimativa de crescimento do volume de árvores individuais por meio da expansão de séries de Taylor no inventário nacional da Suécia, Suty, Nyström e Ståhl (2013), o qual combina parcelas permanentes e temporárias, concluíram que os dois tipos de parcelas foram pouco afetados pelos erros de medições aleatórios, sendo que as maiores variações individuais foram encontradas nas estimativas do volume das árvores de maiores diâmetros, a qual pode ter sido causada pelo baixo número de amostras para o ajuste do modelo na classe de diâmetro.

McRoberts e Westfall (2016) também estudaram a propagação de incertezas (erros de medições de diâmetro e altura, desvio padrão dos parâmetros estimados e variância residual do modelo) de estimativas de volumes individuais para a estimativa de volume de grandes áreas por meio de simulação pelo método de Monte Carlo. Os autores observaram que o efeito das incertezas apresentou maior impacto nas variáveis estimadas por estimadores estratificados, sendo que os efeitos dos erros de medições do diâmetro e da altura foi o de menor magnitude.

3.6 CONTROLE DA QUALIDADE EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS

Devido à complexidade e diversidade de conceitos intrínsecos, a definição de qualidade é subjetiva e dinâmica, dessa maneira, apresenta variações até mesmo entre autoridades no assunto (GOETSCH; DAVIS, 2014). De acordo com Juran e De Feo (2010), a maioria das definições de qualidade estão relacionadas à adequação ao uso, ou seja, às características de um determinado bem ou serviço, esperadas e perceptíveis por seus consumidores. Também é importante destacar que processos organizacionais subsequentes dependentes dos anteriores são considerados clientes internos daqueles que os antecedem, sendo assim, aspectos relacionados à uniformidade, ausência de erros e retrabalho também fazem parte de algumas definições (JURAN; DE FEO, 2010; GOETSCH; DAVIS, 2014).

Compreender e melhorar a qualidade dos processos é fundamental para o sucesso, crescimento e aumento da competitividade dos negócios. Sendo assim, é de interesse das organizações que a melhoria contínua da qualidade alcance todos os níveis organizacionais (GOETSCH; DAVIS, 2014). Os métodos e ferramentas técnicas para controle e melhoria da qualidade podem ser utilizados para definir, mensurar, analisar e propor soluções aos problemas que interferem no desempenho de processos em qualquer área dentro de uma organização e, quando utilizados adequadamente, podem ser fundamentais para o alcance da melhoria contínua (MONTGOMERY, 2020).

Dessa forma, a maioria dos estudos que abordam os erros de medições em inventários florestais estão relacionados ao controle da qualidade, sendo a maior fonte de dados primários os treinamentos e as checagens das parcelas, previstas nos programas de controle e garantia da qualidade, principalmente de grandes inventários florestais. De acordo com Gschwantner *et al.* (2022), os inventários nacionais geralmente possuem programas de Garantia de Qualidade e Controle da Qualidade (GQ/CQ) consolidados, os quais incluem atividades em diversas etapas dos inventários como instruções detalhadas em campo, treinamento de pessoal, controle das medições, testes de instrumentos de medição, avaliação e atualização de modelos e investigação da influência de erros de medições e incertezas de modelos nas estimativas de volume de grandes áreas.

Estudos sobre a quantificação dos erros de diversas fontes em inventários florestais, incluindo os erros de medições, foram desenvolvidos por Gertner e Khöl (1992), com base no primeiro inventário florestal nacional da Suíça. Enquanto uma análise dos procedimentos de controle da qualidade do inventário florestal da Itália foi apresentada por Gasparini *et al.* (2009). Já Berger *et al.* (2014) realizaram estudos a respeito da quantificação da propagação dos erros de medições nas estimativas de volumes individuais nas estimativas do inventário florestal nacional da Áustria.

Diversos estudos foram desenvolvidos com base nos dados provenientes das checagens do programa de garantia da qualidade do inventário nacional dos Estados Unidos da América, como é o caso de Elzinga, Shearer e Elzinga (2005), que estudou a qualidade das medições no estado de Montana, McRoberts *et al.* (1994) no estado do Michigan e, Westfall e Patterson (2007), nos estados do Maine, New Hampshire, Pennsylvania e Ohio, enquanto McRoberts e Westfall (2014) estudaram a propagação

de incertezas, incluindo os erros de medições com base nos dados obtidos nos estados de Minnesota, Wisconsin e Michigan.

Referente ao estudo de erros de medições em processos de treinamento, destacam-se os desenvolvidos por Kitahara, Mizoue e Yoshida (2010) no Japão, em plantios florestais das espécies *Cryptomeria japonica* e *Chamaecyparis obtusa* assim como em florestas naturais, que além de comparar o desempenho de equipes com diversos graus de experiência também avaliou o comportamento dos erros de medições entre espécies coníferas e folhosas e, Paudel, Beckschäfer e Kleinn (2021), que estudou a qualidade das medições de equipes experientes e equipes sem treinamento em uma floresta manejada no estado da Baixa Saxônia, Alemanha.

Quanto à avaliação da qualidade de inventários florestais realizados com a finalidade de subsidiar projetos relacionados a programas de combate às mudanças climáticas, destaca-se o realizado por Theilade, Rutishauser e Poulsen (2015), em uma floresta tropical da Indonésia. Por fim, com relação aos trabalhos realizados com o intuito de desenvolver metodologias para auditoria e checagem de parcelas de inventários florestais realizados em plantios comerciais no Brasil, destacam-se os desenvolvidos por Silva *et al.* (2019), que estudaram a aplicação de ferramentas estatísticas para avaliação da checagem de parcelas e o desenvolvido por Silva *et al.* (2018), no qual os autores focaram os estudos nos aspectos qualitativos das informações coletadas no inventário florestal.

3.7 REFERÊNCIAS

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest Measurements**. 4th Ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.

BERGER, A. *et al.* Analysis of tree measurement errors in the Austrian National Forest Inventory. **Aust. J. For. Sci.**, v. 129, n. 3, p. 149-177, 2012.

BERGER, A. *et al.* Effects of measurement errors on individual tree stem volume estimates for the Austrian National Forest Inventory. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 14-24, 2014.

BRASSEL, P.; LISCHKE, H. **Swiss national forest inventory: methods and models of the second assessment**. WSL, 2001.

CANAVAN, S. J.; HANN, D. W. The two-stage method for measurement error characterization. **Forest Science**, v. 50, n. 6, p. 743-756, 2004.

COCHRAN, W. G. **Sampling Techniques**. 3th Ed. Wiley, 1977.

- CUNIA, T. Some theory on reliability of volume estimates in a forest inventory sample. **Forest Science**, v. 11, n. 1, p. 115-128, 1965.
- D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. **Infor. Information Systems And Operational Research**, v. 46, n. 4, p. 265, 2008.
- ELZINGA, C.; SHEARER, R. C.; ELZINGA, G. Observer variation in tree diameter measurements. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 20, n. 2, p. 134-137, 2005.
- FRAYRET, J. M. *et al.* Agent-based supply-chain planning in the forest products industry. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 19, n. 4, p. 358-391, 2008.
- GABLER, K.; SCHADAUER, K. Some approaches and designs of sample-based national forest inventories. **Austrian J For Sci**, v. 124, n. 2, p. 105-133, 2007.
- GASPARINI, P. *et al.* Quality control procedures in the Italian national forest inventory. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 11, n. 4, p. 761-768, 2009.
- GERTNER, G. Z.; DZIALOWY, P. J. Effects of measurement errors on an individual tree-based growth projection system. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, n. 3, p. 311-316, 1984.
- GERTNER, G. Z. The sensitivity of measurement error in stand volume estimation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 20, n. 6, p. 800-804, 1990.
- GERTNER, G. Z. Prediction bias and response surface curvature. **Forest Science**, v. 37, n. 3, p. 755-765, 1991.
- GERTNER, G. Z.; KÖHL, M. An assessment of some nonsampling errors in a national survey using an error budget. **Forest Science**, v. 38, n. 3, p. 525-538, 1992.
- GOETSCH, D. L.; DAVIS, S. B. **Quality management for organizational excellence**. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.
- GSCHWANTNER, T. *et al.* Growing stock monitoring by European National Forest Inventories: Historical origins, current methods and harmonisation. **Forest Ecology and Management**, v. 505, p. 119-868, 2022.
- JURAN, J. M.; DE FEO, J. A. **Juran's quality handbook: the complete guide to performance excellence**. McGraw-Hill Education, 2010.
- KANGAS, A S. Effect of errors-in-variables on coefficients of a growth model and on prediction of growth. **Forest Ecology and Management**, v. 102, n. 2, p. 203-212, 1998.
- KANGAS, A. S.; KANGAS, J. Optimization bias in forest management planning solutions due to errors in forest variables. **Silva Fennica**, v. 33, n. 4, p. 303-315, 1999.
- KANGAS, A; MALTAMO, M. (Ed.). **Forest inventory: methodology and applications**. Springer Science & Business Media, 2006.

KERSHAW JR, J. A. *et al.* **Forest mensuration**. 5th Ed., West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2016.

KITAHARA, F.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements. **Silva Fennica**, v. 44, n. 4, p. 657-667, 2010.

LIN, H. T. *et al.* Effects of nested plot designs on assessing stand attributes, species diversity, and spatial forest structures. **Forest Ecology and Management**, v. 457, p. 117658, 2020.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV. Verlagsgesellschaft, 1973. v.2, 469 p.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2006.

MÄKINEN, A.; KANGAS, A.; MEHTÄTALO, L. Correlations, distributions, and trends in forest inventory errors and their effects on forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 7, p. 1386-1396, 2010.

MCROBERTS, R. E. *et al.* Variation in forest inventory field measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 24, n. 9, p. 1766-1770, 1994.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 34-42, 2014.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Propagating uncertainty through individual tree volume model predictions to large-area volume estimates. **Annals of Forest Science**, v. 73, n. 3, p. 625-633, 2016.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. John Wiley & Sons, 2020.

OMULE, S. A. Y. Personal bias in forest measurements. **The Forestry Chronicle**, v. 56, n. 5, p. 222-224, 1980.

PAUDEL, P.; BECKSCHÄFER, P.; KLEINN, C. Impact of training on different observers in forest inventory. **Banko Janakari**, v. 31, n. 1, p. 12-22, 2021.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. v 1. Curitiba, 1997.

PUKKALA, T. Multiple risks in multi-objective forest planning: integration and importance. **Forest Ecology and Management**, v. 111, n. 2, p. 265-284, 1998.

PUKKALA, T. Multi-objective forest planning. **Springer Science & Business Media**, 2013.

RABINOVICH, S. G. Measurement errors and uncertainties: theory and practice. **Springer Science & Business Media**, 2006.

SANQUETTA, C. R. *et al.* **Inventários florestais: planejamento e execução**. Curitiba: Multi-Graphic, v. 2, 2009.

SILVA, S. A. *et al.* Methodology for the assessment of aspects and qualitative data in forest inventory audit. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 453-459, 2018.

SILVA, S. A. *et al.* Ferramentas estatísticas para auditoria de inventários florestais em povoamentos de Eucalyptus spp. **Scientia Forestalis**, n. 121, p. 59-70, 2019.

SUTY, N.; NYSTRÖM, K.; STÅHL, G. Assessment of bias due to random measurement errors in stem volume growth estimation by the Swedish National Forest Inventory. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 28, n. 2, p. 174-183, 2013.

STEFANSKI, L. A. Measurement error models. **Journal of the American Statistical Association**, v. 95, n. 452, p. 1353-1358, 2000.

THEILADE, I.; RUTISHAUSER, E.; POULSEN, M. K. Community assessment of tropical tree biomass: challenges and opportunities for REDD+. **Carbon Balance and Management**, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2015.

TOMPPO, E. *et al.* National forest inventories. Pathways for Common Reporting. **European Science Foundation**, p. 541-553, 2010.

TRAN, P. H.; TRAN, K. P.; RAKITZIS, A. A synthetic median control chart for monitoring the process mean with measurement errors. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 35, n. 4, p. 1100-1116, 2019.

WESTFALL, J. A.; PATTERSON, P. L. Measurement variability error for estimates of volume change. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 11, p. 2201-2210, 2007.

4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A OCORRÊNCIA DE ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS¹

4.1 RESUMO

Conhecer a relação entre os erros de medições e suas prováveis fontes pode proporcionar diversas melhorias no que diz respeito à prevenção e otimização de recursos para atividades de planejamento e treinamento de inventários florestais. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo analisar possíveis relações entre os erros de medições das variáveis cap e altura e diversas variáveis obtidas nas atividades de coleta de dados de um inventário florestal em plantios de *Eucalyptus* sp., além de analisar a qualidade das medições. Por meio de análise de regressão, foi possível constatar que os erros de medição de cap são suscetíveis a uma maior quantidade de fonte de erros quando comparados aos erros de medição de altura, tendo como fontes as equipes de medição, as coordenadas, parcelas de remedição, idade dos plantios, espécies, espaçamento, dias de fim de semana, regiões dos plantios e as covas de cada árvore, enquanto os erros de medição de altura, apenas as equipes e regiões. Por fim, os erros de ambas as variáveis analisadas não aparentaram tendências significativas, podendo ser caracterizados como aleatórios e compensantes.

Palavras-chave: Erros-não amostrais. Acuracidade. Propagação.

4.2 ABSTRACT

Knowing the relationship between measurement errors and their probable sources can provide several improvements about prevention and optimization of resources for planning and training activities on forest inventories. Thus, the present study aimed to analyze possible relationships between the measurement errors of cbh and height and several variables obtained in the activities of collecting data from a forest inventory in *Eucalyptus* sp. plantations, in addition to analyzing the quality of the measurements. Through regression analysis, it was possible to verify that cbh measurement errors are susceptible to a greater amount of error source when

¹ VARIABLES THAT INFLUENCE THE OCCURRENCE OF MEASUREMENT ERRORS IN FOREST INVENTORIES

compared to height measurement errors, having as sources the measurement teams, coordinates, remeasurement plots, age of plantations, species, spacing, weekend days, regions of plantations and the holes of each tree, while measurement errors only teams and regions. Finally, the errors of both analyzed variables did not appear to have significant bias and can be characterized as random and compensating.

Keywords: Non-sampling errors. Accuracy. Propagation.

4.3 INTRODUÇÃO

Informações são vitais para o processo de tomada de decisão, para planejar e compreender qualquer tipo de empreendimento. Quando se trata de empreendimentos florestais, muitas das decisões são tomadas com base nas informações provenientes dos inventários florestais (PUKKALA, 2013).

Majoritariamente relativas a recursos madeireiros, as informações obtidas por meio de inventários florestais e programas de monitoramento variam de acordo com o objetivo do planejamento e, geralmente, são obtidas por meio de procedimentos estatísticos, como técnicas de regressão e amostragem, nas quais variáveis de interesse como volume, biomassa e carbono são estimadas para árvores individuais e depois agregadas ao nível de unidades amostrais e por fim são realizadas estimativas para todo o povoamento florestal em questão (KERSHAW JR *et al.*, 2016; MCROBERTS; WESTFALL, 2016).

Informações inexatas podem constituir em uma fonte de risco e incertezas para negócios florestais. Embora se espere que as estimativas sejam sempre representativas dos povoamentos florestais, a ocorrência de erros nas diferentes etapas dos inventários pode prejudicar a confiabilidade dos resultados e tendenciosidades podem ocorrer mesmo quando o erro de amostragem é baixo e os resultados aparentam ser confiáveis (MCROBERTS; WESTFALL, 2014).

De forma resumida, os erros que acometem inventários florestais são classificados como amostral e não amostrais. O erro de amostragem é considerado o mais importante e é resultante da adoção de técnicas de amostragem em detrimento da mensuração de todos os indivíduos da população alvo. Já os demais tipos de erros são classificados como não amostrais (LOETSCH; ZÖHRER; HALLER 1973).

Estreitamente atrelado à má qualidade dos dados coletados, entre os erros não amostrais se destaca o erro de medição, frequentemente relacionado a restrições

de tempo, recursos técnicos e financeiros na etapa de coleta de dados do inventário florestal (GERTNER, 1991).

Um erro de medição é a diferença entre o verdadeiro valor e a medição inexata de um objeto qualquer, podendo ser mensurado em termos de tendenciosidade, que é uma distorção sistemática de uma medida a partir do valor verdadeiro e, aleatoriedade, que é a difusão de várias medições do mesmo objeto em torno de sua média (OMULE, 1980).

Embora o efeito dos erros de medições em inventários florestais já tenha sido identificado há algum tempo (CUNIA, 1965; GERTNER, 1990), ainda é negligenciado ou dada pouca importância em muitos casos (BERGER *et al.*, 2012). Projetos que envolvem grandes áreas, como é o caso de inventários nacionais, geralmente contam com rigorosos e bem desenvolvidos programas de controle da qualidade (GASPARINI *et al.*, 2009; BERGER *et al.*, 2012; BERGER *et al.*, 2014; GSCHWANTNER *et al.*, 2022), todavia, por se tratar de empresas privadas, informações sobre a qualidade da coleta de dados de inventários em plantios florestais raramente são divulgadas (SILVA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019).

Embora informações provenientes de florestas nativas proporcionem uma maior riqueza de informações, a variabilidade relacionada aos ambientes, espécies e idades (THEILADE; RUTISHAUSER; POULSEN, 2015) acaba dificultando a observação de relações entre os erros de medições e suas prováveis fontes. Assim, dados provenientes de povoamentos equiâneos e homogêneos podem trazer um maior controle dessas relações, devido à menor variabilidade e conseqüente maior quantidade de indivíduos com características semelhantes.

Por mais que sejam mencionadas outras fontes de erros de medições e tendenciosidades em inventários florestais, equipamentos e aspectos relacionados às equipes, em especial ao treinamento, são os mais enfatizados (KITAHARA; MIZOUE; YOSHIDA, 2009; KITAHARA; MIZOUE; YOSHIDA, 2010; PAUDEL; BECKSCHÄFER; KLEINN, 2021). Dessa maneira, conhecer a relação das prováveis fontes com os erros de medições pode trazer informações que proporcionem diversas melhorias no que diz respeito à prevenção e otimização de recursos para atividades de planejamento e treinamento de inventários florestais.

Sendo assim, além de analisar a qualidade das medições quanto à tendenciosidade e aleatoriedade, o presente estudo teve como objetivo encontrar relações entre os erros de medições e diversas prováveis fontes (variáveis)

observadas e obtidas junto às atividades de coleta de dados de um inventário florestal realizado em plantios de *Eucalyptus* sp.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Área de estudo

O inventário florestal utilizado como fonte de informações para o presente estudo foi realizado em aproximadamente 6200 hectares de plantios das espécies *Eucalyptus* sp., *Eucalyptus cloeziana* F. Muell, *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e *Eucalyptus urograndis*, localizados em seis microrregiões (Carbonita, Curvelo, João Pinheiro, Juramento, Montes Claros e Pirapora) distribuídas nas mesorregiões do Vale do Jequitinhonha e Norte do estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1).

A idade dos plantios mensurados variou entre 27 e 152 meses e foram implantados com 10 diferentes espaçamentos que resultam em 5 dimensões de área útil por árvore (7,5 m², 9,0 m², 9,1 m², 12m² e 18 m²). Estabelecidos em terrenos predominantemente planos com solos arenosos e argilosos, onde a vegetação nativa é o Cerrado, segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Aw (clima tropical de savana), com precipitação média anual de 1000 mm e temperatura média de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO ONDE SE ENCONTRAM OS PLANTIOS DE *EUCALYPTUS SP.*, MESORREGIÕES DO VALE DO JEQUITINHONHA E REGIÃO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS



FONTE:O autor (2022).

4.4.2 Inventário florestal e procedimentos de coleta de dados

O processo de amostragem utilizado foi o sistemático, com fração amostral de 0,5%. As parcelas são permanentes, de forma circular com área de aproximadamente 500 m² (raio de 12,62 m), as quais foram distribuídas conforme um grid amostral de 1 parcela para cada 10 hectares de plantio.

O inventário foi realizado em aglomerados de 20 unidades amostrais mensuradas em sequência, todas identificadas com relação à equipe, talhão e data de medição (agrupadas em dias de semana e fim de semana). Ainda, para que a checagem fosse realizada a nível de árvores, foram adotados procedimentos como a enumeração das linhas, das covas de plantio e dos fustes das árvores. É importante relatar que as parcelas foram mensuradas por 13 equipes diferentes e algumas delas haviam sido mensuradas mais de uma vez, enquanto outras uma única vez, o que resultou em dois tipos (instalação e remedição).

Após a coleta das coordenadas UTM do ponto central (latitude e longitude) com aparelho GPS Garmin eTrex® 30, em cada parcela foram mensuradas as circunferências dos fustes a altura do peito, 1,3 m de altura (cap) de todas as árvores

utilizando baliza e fita métrica de aço (modelo Lufkin W606PM) e, os valores de altura total das 7 primeiras árvores da primeira linha, das 3 árvores com os menores valores de cap, das 5 árvores com os maiores valores de cap e, das árvores mortas, quebradas e com ponta seca, com o uso do clinômetro digital (modelo ECII – D Haglöf). Por fim, também foi atribuída qualidade ao fuste de cada árvore como: Defeituosas (árvores com defeitos no fuste como tortuosidades e inclinações), Normais (árvores sem defeitos, porém não dominantes) e Dominantes (as cinco árvores sem defeitos e com os maiores valores de cap de cada parcela). O número total de valores de cap e altura total coletados foi de respectivamente 14743 e 5155.

4.4.3 Procedimentos de checagem e informações coletadas

Para prevenir erros sistemáticos e acidentais de maiores magnitudes, uma etapa de aferição dos instrumentos utilizados foi acrescentada ao processo de inventário florestal e checagem das parcelas, assim todos os instrumentos (fita métrica, hipsômetro, trena e baliza) fora da especificação e limite de tolerância foram substituídos antes da coleta dos dados.

A checagem do inventário florestal foi realizada por uma equipe qualificada, seguindo exatamente os mesmos métodos e, utilizando os mesmos instrumentos do inventário florestal, dentro do prazo de 7 dias, para minimizar diferença entre as medições devido ao desenvolvimento dos indivíduos. Para o presente estudo, foram sorteadas e remedidas 336, de um total de aproximadamente 6720 parcelas, o equivalente a 5% do número de parcelas. Nessas parcelas, foram realizadas remedições completas, com acesso aos dados das medições realizadas no inventário. Para a obtenção dos erros, os valores das medições da checagem foram tomados como verdadeiros (Equação 1).

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i \quad (1)$$

Onde \hat{e}_i é o i -ésimo erro de cada medição, y_i é a i -ésima medição obtida na checagem e \hat{y}_i a i -ésima medição obtida no inventário.

4.4.4 Variáveis analisadas

As variáveis das quais foram analisadas as associações com os erros de medições possuem diversas naturezas e podem ser classificadas como relacionadas às atividades de mensuração no interior das parcelas, ao desempenho das equipes de medições, aos locais dos plantios, as características dos indivíduos arbóreos, silviculturais e as variáveis dendrométricas mensuradas. Na Tabela 1 é possível observar o detalhamento do banco de dados com ênfase nas variáveis discretas e categóricas.

TABELA 1 - RESUMO DESCRITIVO DO BANCO DE DADOS UTILIZADOS COM ÊNFASE NAS QUANTIDADES DE OBSERVAÇÕES DE ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA PARA AS VARIÁVEIS DISCRETAS E CATEGÓRICAS ANALISADAS

Variável		Erro de medições		Variável		Erro de medições	
		cap (n)	altura (n)			cap (n)	altura (n)
Tipo de parcela	Instalação	2895	1013	7,5 m ²	240	60	
	Remedição	11848	4142	9 m ²	4254	1338	
Espécie	<i>E. cloeziana</i>	56	23	Espaçamento	9,1 m ²	1304	425
	<i>E. sp</i>	129	42		12 m ²	8916	3317
	<i>E. urograndis</i>	11649	3911		18 m ²	29	15
	<i>E. urophylla</i>	2909	1179	Qualidade do fuste	Defeituosa	1114	398
	A	1285	433		Normal	597	4160
	B	550	170		Dominante	13032	597
	C	1147	405		Dia da semana	Semana	12877
D	3798	1391	Final	1866		628	
E	1434	508	Carbonita	2103		623	
Equipe	F	4397	1563	Região	Curvelo	605	187
	G	538	157		J. Pinheiro	2206	720
	H	868	296		Juramento	379	132
	I	107	44		M. Claros	8647	3187
	J	109	36		Pirapora	803	306
	K	49	15		1	2227	1040
	L	379	108		2	2193	925
Textura do solo	M	82	29	3	2125	820	
	Arenoso	9829	3625	4	1991	730	
	Argiloso	4914	1530	5	1800	561	
	1	1288	1276	6	1634	457	
	2	2273	1463	7	1218	288	
	3	2607	654	Posição nas linhas	8	858	180
4	2689	576	9		397	85	
Linhas	5	2371	487		10	189	43
	6	1938	380		11	69	14
	7	1097	237		12	31	8
	8	441	74		13	7	2
	9	39	8		14	2	1
Tronco	1	14475	5105		15	1	-
	2	263	50	16	1	1	
	3	5	-	-	-	-	

FONTE: O autor (2022).

4.4.5 Análise estatística

Tendo em vista os diferentes tipos de variáveis, a análise estatística foi realizada em duas etapas, uma análise exploratória e uma análise de regressão. Embora a análise exploratória tenha abordado todas as variáveis, o principal intuito dela foi a observação do possível efeito das covariáveis sobre o erro de medição das variáveis circunferência à altura do peito (cap) e à altura total (ht).

Para a observação do comportamento dos erros de medições em termos de tendenciosidade e aleatoriedade, nos gráficos das variáveis categóricas, a média da categoria foi representada por um círculo sólido em vermelho, enquanto nos gráficos das variáveis contínuas, foi representada por uma curva suavizada localmente (LOESS) (Equação 2).

$$y_i = g(x_i) + \varepsilon_i \quad (2)$$

Onde y é a variável dependente (resposta), x_n é a descrição de cada variável independente, g é a função na vizinhança de cada ponto de interesse $x = x_0$, ε_i é o erro independente e identicamente distribuído com distribuição normal, média zero e variância constante.

Por meio de um modelo de regressão linear (Equação 3), considerando nível de significância $\alpha = 5\%$ (0,05), posteriormente, as variáveis contínuas foram separadas e testado o efeito nas variáveis respostas. As variáveis preditoras foram selecionadas por meio do método de seleção *Stepwise* em um processo iterativo e o critério de penalização utilizado foi o logaritmo do tamanho da amostra ($\log(n)$), também conhecido como Critério de Informação Bayesiano (*BIC*) (Equação 4).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \dots + \beta_k \cdot x_{ki} + \varepsilon_i \quad (3)$$

Onde y é a variável dependente (resposta), β_0 é o coeficiente linear (constante), β_k é o coeficiente relacionado a cada variável independente (coeficientes angulares), x_k é a descrição de cada variável independente, ε_i é o resíduo aleatório, i representa cada uma das variáveis da amostra e, n é o tamanho da amostra.

$$BIC = -2 \log f(x_k | \theta) + p \log n \quad (4)$$

Onde $f(x_n|\theta)$ é o modelo escolhido (log-verossimilhança do modelo ajustado), p é o número de parâmetros a serem estimados e n o número de observações da amostra.

Além do BIC, a qualidade do ajuste foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa e de gráficos de resíduos, com finalidade de verificar uma possível não homogeneidade, além de histogramas para verificar a normalidade dos resíduos. Os modelos de regressão linear foram ajustados por meio de funções disponíveis no pacote base do programa estatístico R (R CORE TEAM, 2020). Os gráficos foram construídos usando o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016).

4.5 RESULTADOS

Como pode ser observado na Tabela 2, os valores máximos e mínimos de cada variável estudada são similares em termos absolutos. As medianas indicam que metade das observações possui valor de erro menor ou igual a zero, enquanto as médias possuem valores muito próximos a zero, indicando que não há tendenciosidade na maioria das medições.

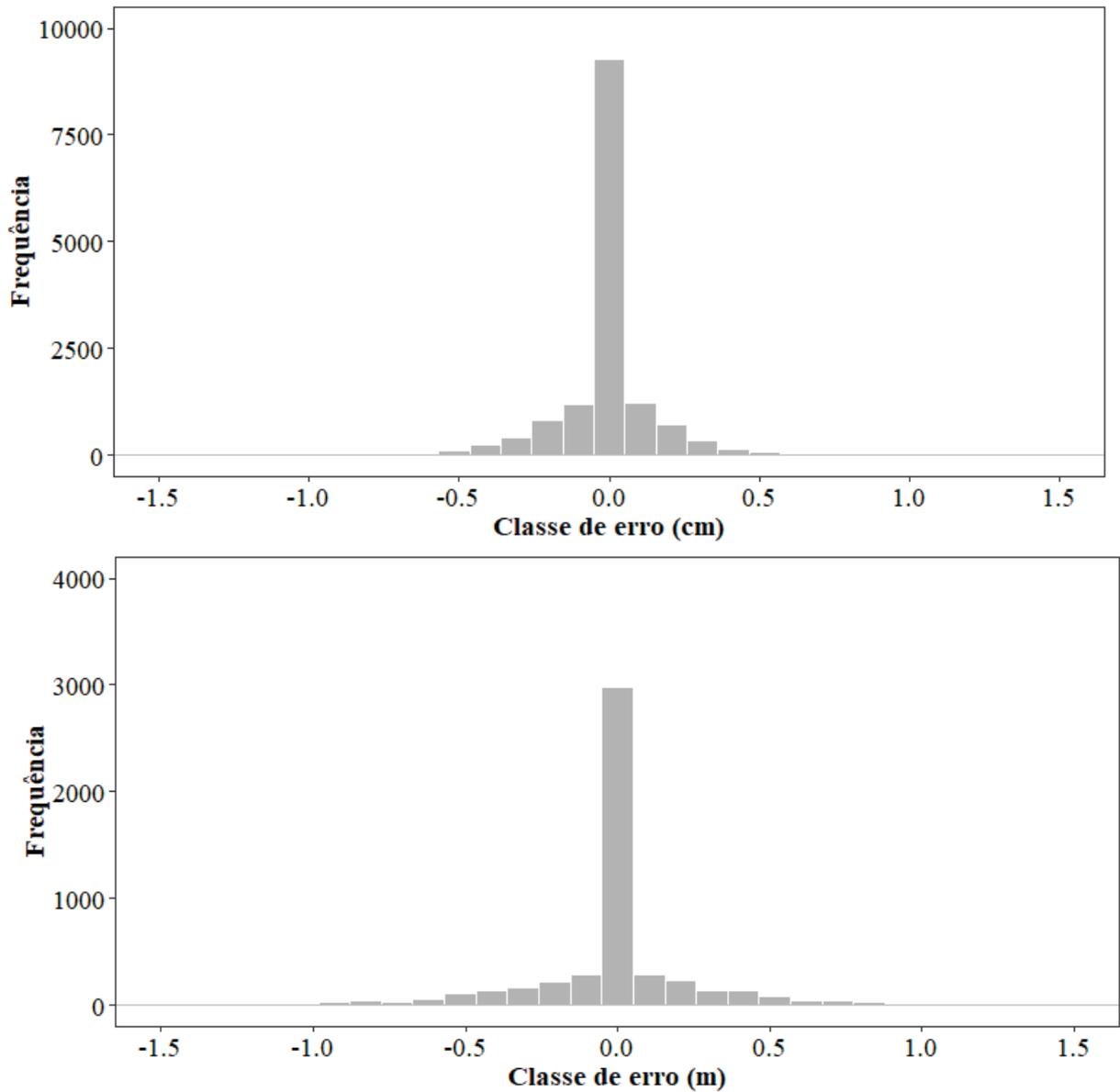
TABELA 2 - RESUMO DESCRITIVO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP.

Erros de medições	n	Mínimo	Mediana	Média	Máximo
Cap	14743	-1,30	0,00	-0,007	1,40
Altura	5155	-1,80	0,00	-0,006	1,80

FONTE: O autor (2022).

Com médias e medianas próximas de zero, os histogramas de frequência dos erros de medições de cap e altura apresentaram unimodalidade e simetria, sugerindo tendência à normalidade dos dados. Embora a grande maioria dos dados de ambos os histogramas esteja concentrada na classe central, cujo centro de classe é igual a zero, o que sugere distribuições leptocúrticas, o histograma dos erros de medição de altura apresenta uma distribuição mais bem distribuída entre as classes, o que indica uma maior variabilidade nas medições.

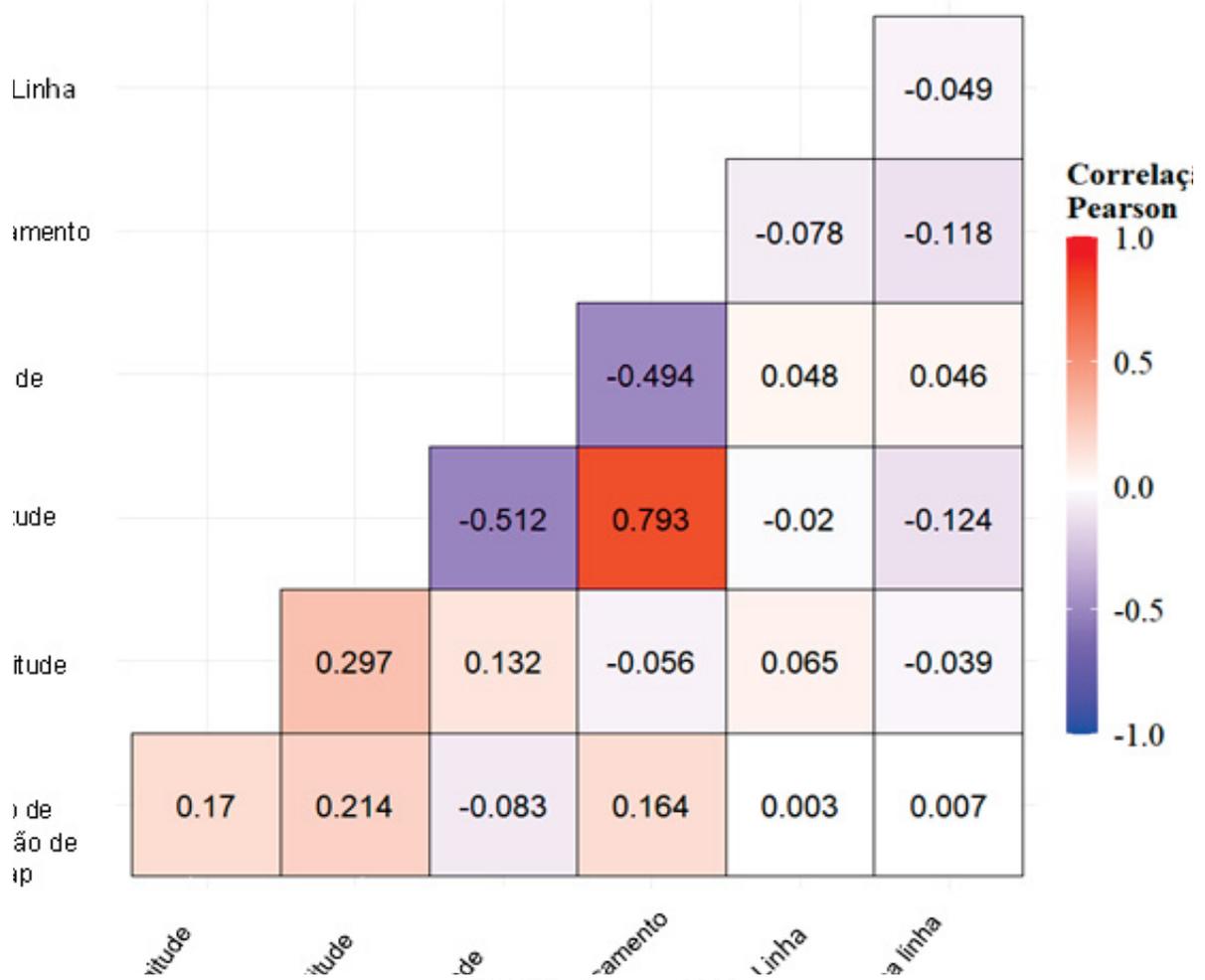
FIGURA 2 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP.



FONTE: O autor (2022).

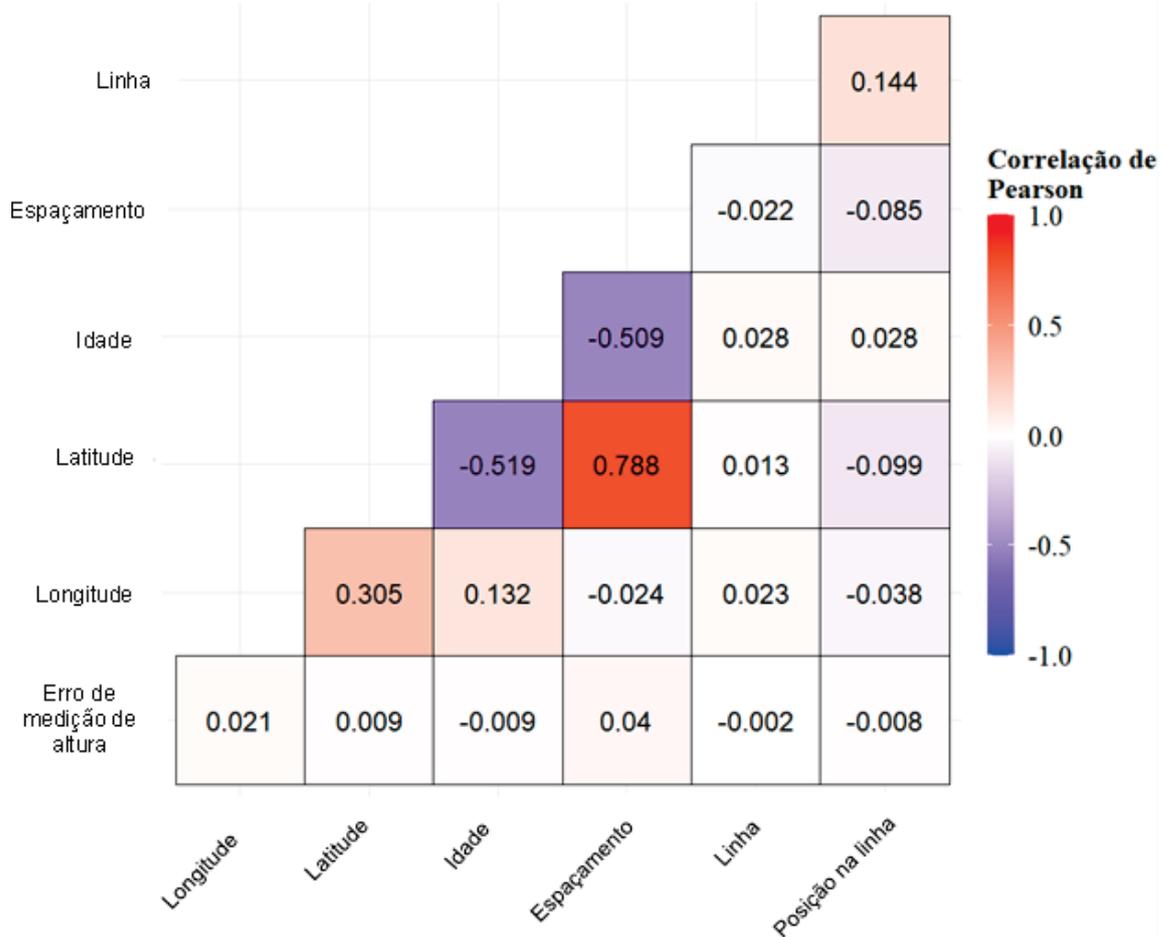
Como pode ser observado na Figura 3, as correlações lineares de Pearson entre os erros de medição de cap e as variáveis contínuas foram baixas. As maiores correlações dos erros de medição de cap foram observadas com as coordenadas e o espaçamento. Os maiores valores de correlação foram observados entre as demais variáveis analisadas, ou seja, não foram observadas entre os erros de medição de cap.

FIGURA 3 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS COM PROVÁVEL INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP.



Na Figura 4 são apresentadas as correlações de Pearson entre os erros de medição de altura e as variáveis contínuas. Os valores foram tão baixos, ao ponto de se desconsiderar a existência de correlação entre os erros de medição de altura e as variáveis analisadas. Por outro lado, a exemplo dos valores observados entre a latitude, idade e espaçamento, houve correlações moderadas e altas, assim como positivas e negativas entre as demais variáveis.

FIGURA 4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS COM PROVÁVEL INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHEGAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP.



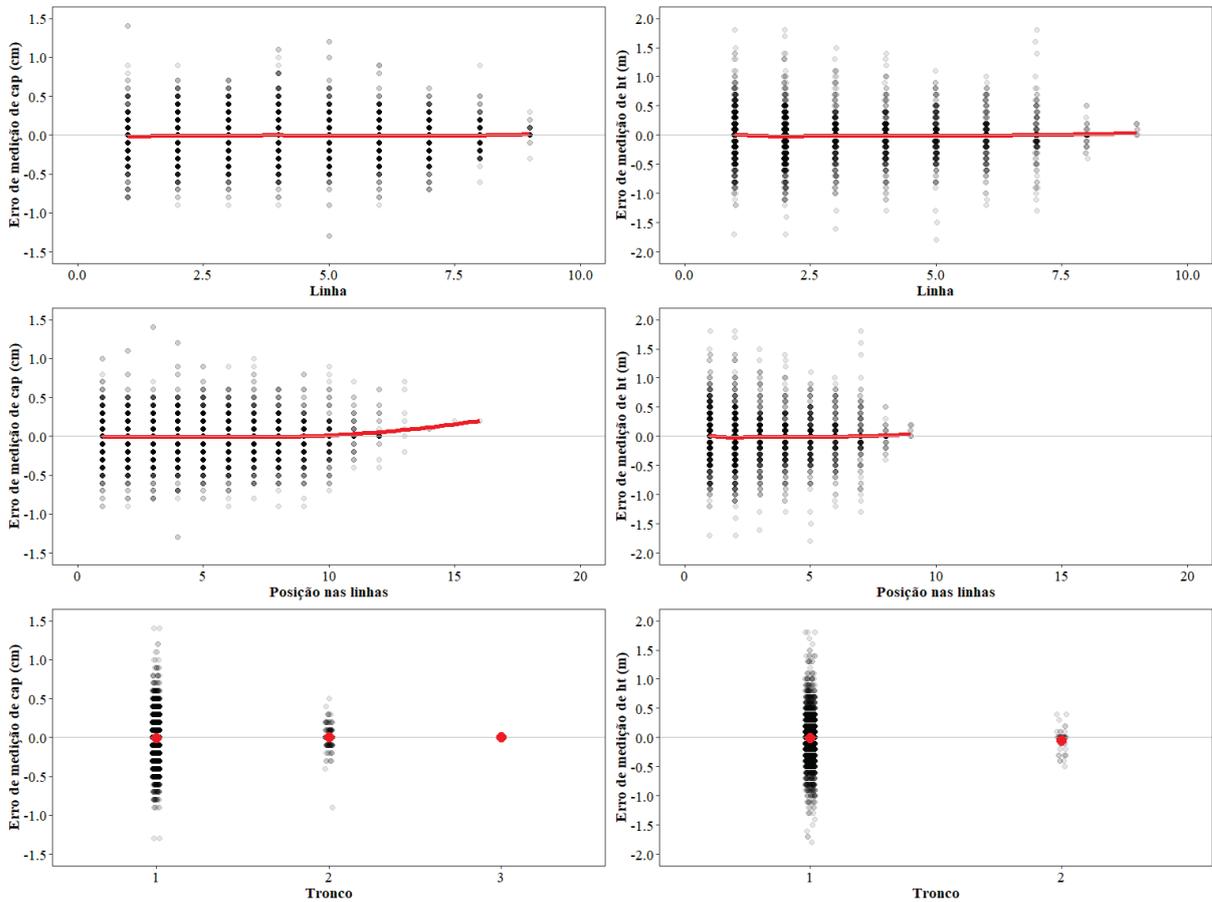
FONTE: O autor (2022).

Quanto às atividades de mensuração no interior das parcelas, os resultados sugerem que o número de linhas de plantio, covas (árvores plantadas) e troncos de uma mesma árvore apresentaram pouca influência sobre as medições de cap e altura (Figura 5).

Embora a curva suavizada localmente apresente uma inclinação positiva nas últimas covas, o que sugere a subestimativas das medições de cap, tal comportamento provavelmente está relacionado ao pequeno número de observações.

Por outro lado, para ambas as variáveis, foi possível observar a diminuição das amplitudes de variação dos erros na medida em que as medições se aproximavam das últimas linhas e covas.

FIGURA 5 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP., EM FUNÇÃO DAS LINHAS, POSIÇÃO NAS LINHAS E TRONCOS

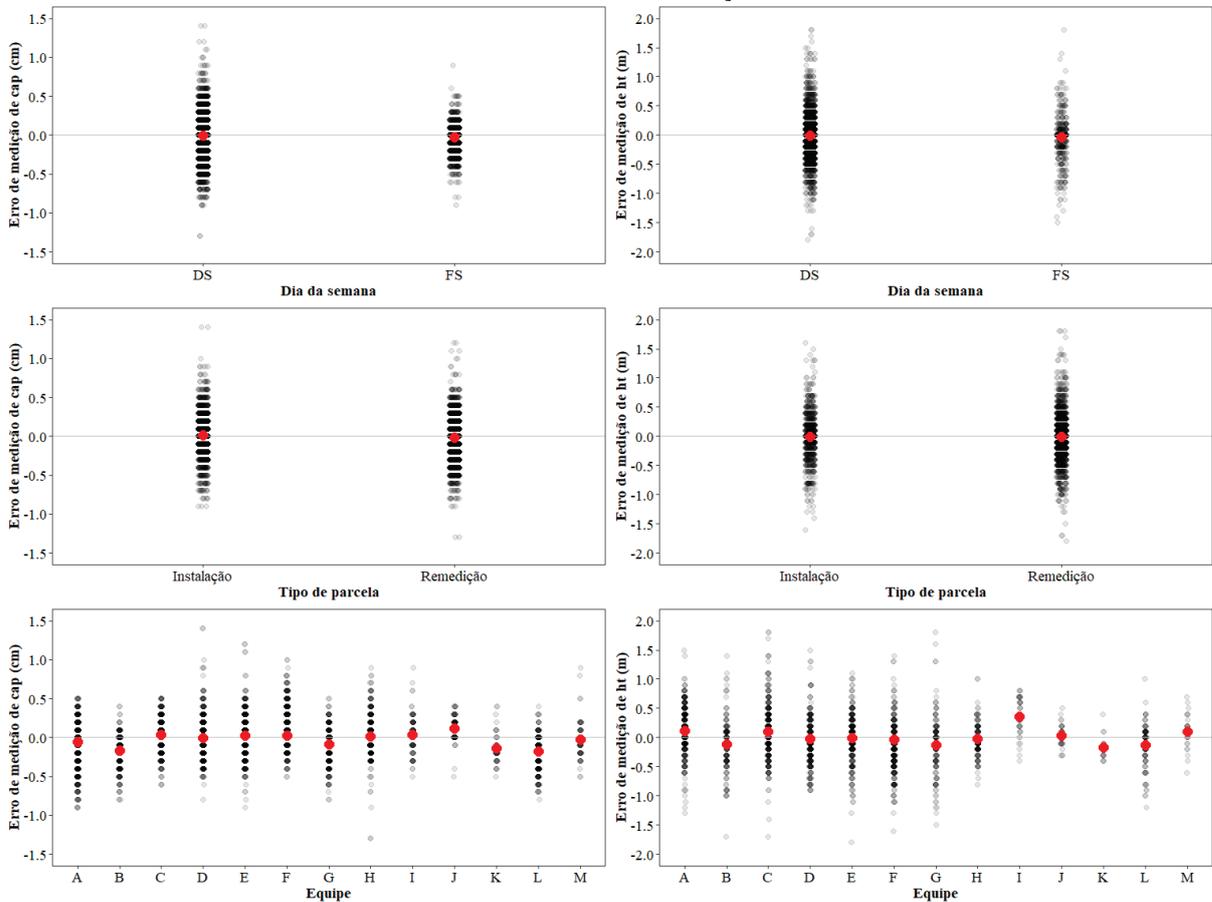


FONTE: O autor (2022).

Como pode ser observado na Figura 6, os resultados sugerem que as atividades de instalação assim como as de remedição das parcelas não aparentaram exercer influência sobre a média dos erros de medições de cap e altura. A mesma coisa pode ser dita dos períodos da semana, quando os dias úteis e de final de semana apresentaram média e variação muito semelhantes.

Todavia, foi possível observar que as equipes responsáveis pelas medições apresentaram as maiores variações das médias dos erros de medições das variáveis estudadas, assim como também foi possível constatar diferenças visíveis entre as amplitudes de variação de cada equipe.

FIGURA 6 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHÉCAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DOS PERÍODOS DA SEMANA, TIPOS DE PARCELAS E ESQUIPES DE MEDIÇÃO

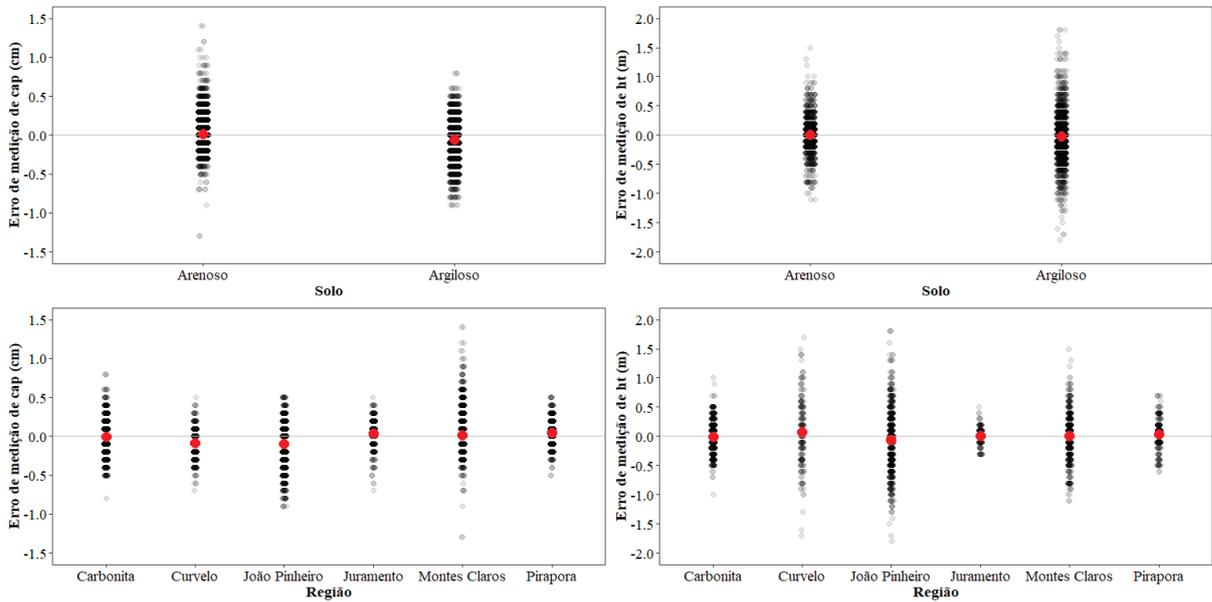


FONTE: O autor (2022).

Referente às variáveis relacionadas aos locais dos plantios, a textura dos solos das regiões apresentou uma influência insignificante sobre a média dos erros de medições, sendo que, foi possível observar uma amplitude de variação levemente maior nos erros de medição de cap em solos arenosos e nos erros de medição de altura em solos argilosos (Figura 7).

Quanto às regiões de plantio, embora a variação das médias tenha sido muito pequena, foi possível observar amplitudes de variação que sugerem a superestimativa de uma grande quantidade das medições de cap na região de João Pinheiro e a subestimativa na região de Montes Claros. Além disso, as regiões de Curvelo e João Pinheiro visivelmente apresentaram as maiores amplitudes de variação dos erros de medição de altura.

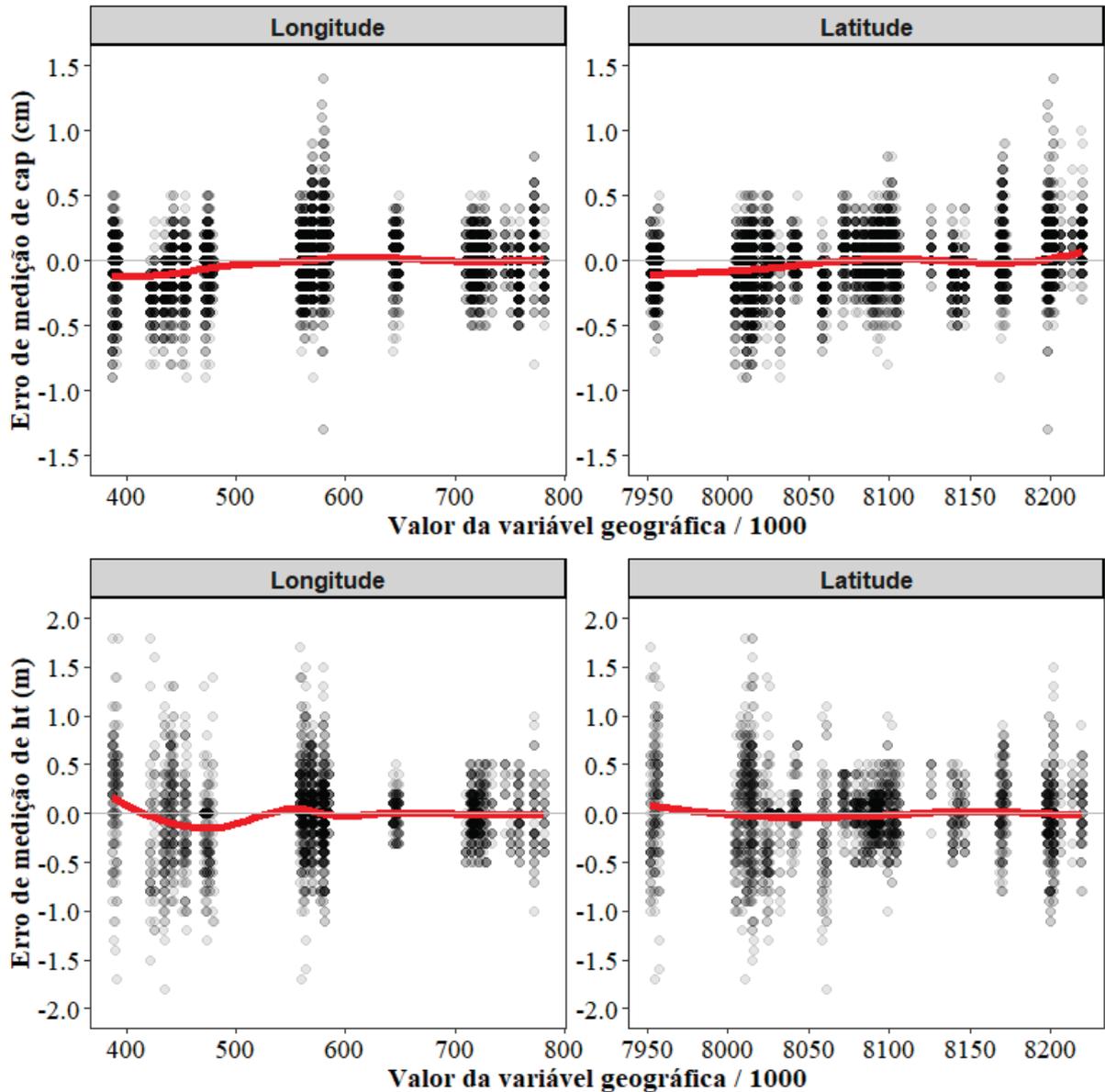
FIGURA 7 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS TEXTURAS DO SOLO E REGIÕES DOS PLANTIOS



FONTE: O autor (2022).

Quanto às coordenadas geográficas (Figura 8), foi possível observar que os erros de medição das alturas apresentaram maior amplitude de variação, enquanto existe uma leve tendência à superestimativa das medições de cap nas menores latitudes e longitudes, foi possível observar uma tendência à superestimativa dos erros de medição de altura nas longitudes próximas a 500000 m E.

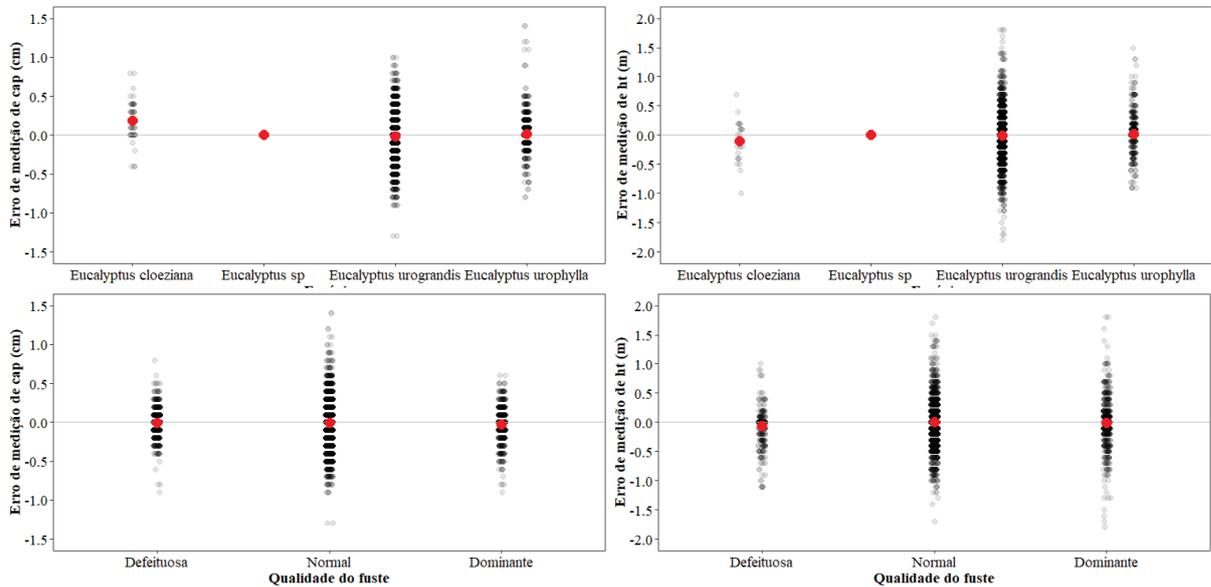
FIGURA 8 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO COORDENADAS GEOGRÁFICAS



FONTE: O autor (2022).

Quanto às características dos indivíduos (Figura 9), embora com menor número de medições, a espécie *Eucalyptus cloeziana* apresentou a maior variação da média, indicando uma pequena subestimativa das medições dos valores de cap, enquanto os erros de medição de altura não apresentaram tendenciosidade aparente. Já as características qualitativas do fuste não aparentaram exercer influência sobre a média dos erros de medições de cap e altura.

FIGURA 9 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP., EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E QUALIDADE DO FUSTE

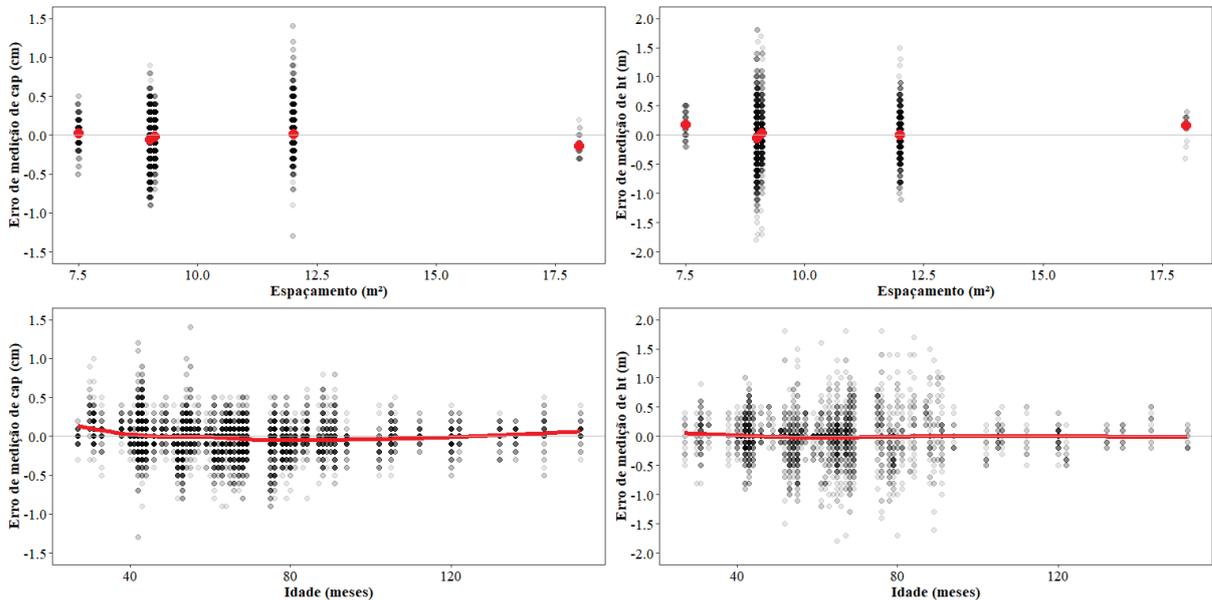


FONTE: O autor (2022).

A densidade de árvores expressa pelo espaçamento aparentou exercer pouca influência sobre a média dos erros de medição de cap, sendo possível observar uma leve tendência à superestimativa no plantio com menor número de árvores (Figura 10). Embora também pequena, foi possível notar uma leve tendência à subestimativa das medições de altura nos plantios com maior e menor número de árvores.

Foi possível observar uma pequena tendência à subestimativa da média dos erros de medição de cap nos plantios mais novos, além disso, a idade não aparentou exercer influência sobre a média dos erros de medição altura. Todavia, foi possível observar uma maior variação nos erros de medições de cap e altura nas idades iniciais, ou seja, a amplitude dos erros de medições reduz próximo dos 100 meses de idade, sendo mais evidente nos erros de medição das alturas.

FIGURA 10 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS SP.* EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO E DA IDADE DO PLANTIO

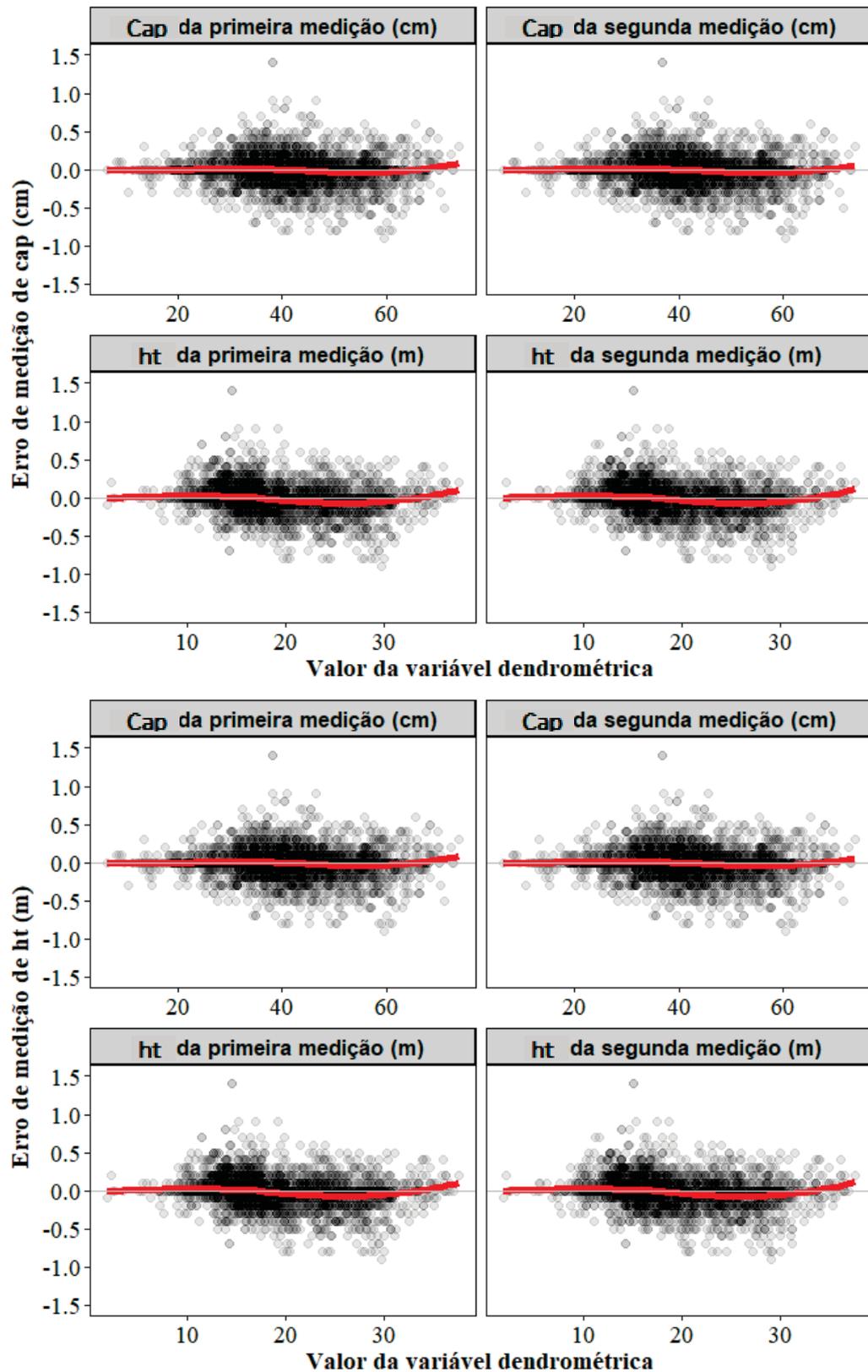


FONTE:O autor (2022).

As dimensões das árvores, assim como as medições das variáveis dendrométricas realizadas no inventário e na checagem não aparentaram exercer influência sobre os erros de medições de cap e altura. Embora a distribuição dos erros de medições aparente homoscedasticidade, nota-se uma leve tendência à superestimativa nas medições das árvores com valores de cap entre 40 e 60 cm e alturas entre 20 e 30 m, assim como a subestimativa nas árvores com valores de cap acima de 60 cm e 30 m de altura (Figura 11).

Um comportamento semelhante pode ser observado na distribuição dos erros de medição de altura, os quais aparentaram o mesmo comportamento nas árvores com dimensões semelhantes. Além disso, também foi possível observar que a amplitude de variação dos erros de medições de ambas as variáveis foi inferior nas árvores com valores de cap inferiores a 30 cm e 15 m de altura.

FIGURA 11 - GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA EM FUNÇÃO DOS VALORES DE CAP E ALTURA OBTIDOS NAS MEDIÇÕES E NA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP.



FONTE: O autor (2022).

Os resultados do ajuste do modelo com os erros de medições de cap e altura como variáveis resposta são apresentados na Tabela 3. Embora o objetivo do ajuste já não seja esse, é importante ressaltar que devido aos valores de erro padrão da estimativa e coeficiente de determinação, as equações não são capazes de estimar os erros de medições com precisão adequada.

TABELA 3 - RESUMO ESTATÍSTICO DOS AJUSTES DOS MODELOS COM OS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. COMO VARIÁVEIS REPOSTAS, EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS

Erros de medições	n	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	S	BIC	R ²
Cap (cm)	14743	-1,3	0	-0,007	1,4	0,156	-16040,17	0,20292
Altura (m)	5155	-1,8	0	-0,006	1,8	0,286	1419,205	0,08426

FONTE: O autor (2022).

A análise de variância (ANOVA) do modelo ajustado para estimativa dos erros de medição de cap pode ser observada na Tabela 4. Na tabela da ANOVA é possível observar que as variáveis significativas apresentaram p -valor menor que $\alpha = 0,05$.

TABELA 4 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F-valor	p-valor
Latitude	1	10,41844	10,41844	537,22601	0,00000
Longitude	1	10,46425	10,46425	539,58850	0,00000
Tipo de parcela	1	3,04248	3,04248	156,88522	0,00000
Idade	1	0,00215	0,00215	0,11067	0,73939
Espécie	3	2,09762	0,69921	36,05449	0,00000
Equipe	12	34,08217	2,84018	146,45376	0,00000
Espaçamento	1	0,16358	0,16358	8,43506	0,00369
Dias da semana	1	0,07238	0,07238	3,73234	0,05339
Região	5	12,69494	2,53899	130,92278	0,00000
Posição nas linhas	1	0,26946	0,26946	13,89455	0,00019
Resíduos	14.715	285,36829	0,01939	-	-

FONTE: O autor (2022).

Os parâmetros estimados para as variáveis do modelo de erros de medição de cap, erro padrão, valor- t e p -valor são apresentados na Tabela 5. É possível notar que além das coordenadas, as variáveis tipos de parcela, idade, espécies, equipes, espaçamento, dia da semana, região e cova foram estatisticamente significativos para nível de significância de 5%.

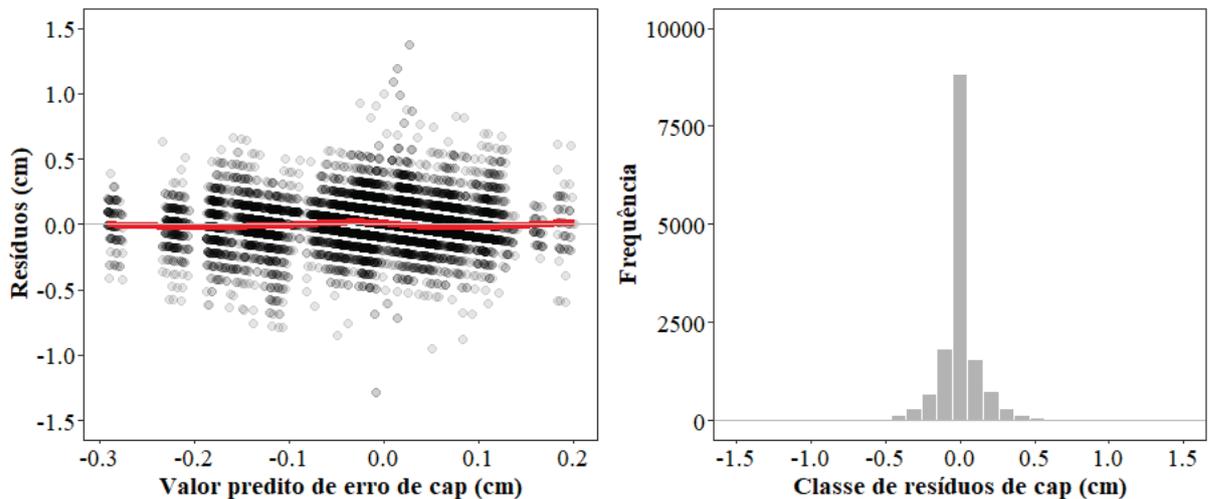
TABELA 5 - ESTATÍSTICAS RESULTANTES DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS

Variável	Parâmetro	Erro padrão	t-valor	p-valor
Intercepto	15,13429338	0,94724168	15,97722488	0,00000000
Latitude	0,00000054	0,00000010	5,21445852	0,00000019
Longitude	-0,00000189	0,00000012	-15,96509332	0,00000000
Remedição	-0,04254112	0,00311428	-13,66000818	0,00000000
Idade	0,00046283	0,00008665	5,34127185	0,00000009
<i>E. sp</i>	-0,14915934	0,02344133	-6,36309122	0,00000000
<i>E. urograndis</i>	-0,09996189	0,01962382	-5,09390475	0,00000036
<i>E. urophylla</i>	-0,10894468	0,01979712	-5,50305752	0,00000004
Equipe B	-0,09646038	0,00776653	-12,42000870	0,00000000
Equipe C	0,10326308	0,00577424	17,88339331	0,00000000
Equipe D	0,08465914	0,00695415	12,17390069	0,00000000
Equipe E	0,11084099	0,00722119	15,34941531	0,00000000
Equipe F	0,11057057	0,00681746	16,21873673	0,00000000
Equipe G	-0,01452452	0,00791534	-1,83498393	0,06652824
Equipe H	0,07922791	0,00830870	9,53553572	0,00000000
Equipe I	0,11446477	0,01575423	7,26565376	0,00000000
Equipe J	0,14349369	0,01639869	8,75031210	0,00000000
Equipe K	-0,02010799	0,02224420	-0,90396571	0,36602838
Equipe L	-0,06281188	0,00887799	-7,07501251	0,00000000
Equipe M	-0,02570533	0,01717495	-1,49667580	0,13449908
Espaçamento	-0,02247842	0,00215794	-10,41662767	0,00000000
Dias FS	-0,01145842	0,00365038	-3,13897155	0,00169877
Curvelo	-0,25866007	0,02201162	-11,75106918	0,00000000
João Pinheiro	-0,08501874	0,02964415	-2,86797676	0,00413693
Juramento	0,06967778	0,01202143	5,79613217	0,00000001
Montes Claros	0,31466728	0,02354592	13,36398385	0,00000000
Pirapora	0,11657184	0,01727095	6,74959056	0,00000000
Cova	0,00179330	0,00048109	3,72753934	0,00019408

FONTE: O autor (2022).

Os gráficos de distribuição e histograma dos resíduos do modelo ajustado para os erros de medição de cap são apresentados na Figura 12. Podemos notar que não há tendenciosidades aparentes, com os resíduos distribuídos de forma homogênea para diferentes valores preditos de erros de medição. O histograma dos resíduos sugere uma distribuição normal com alta concentração de resíduos próximos de zero, assim como observado nos valores observados.

FIGURA 12 - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO E HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS



FONTES: O autor (2022).

A análise de variância (ANOVA) do modelo ajustado para estimativa dos erros de medição de altura pode ser observada na Tabela 6. Na tabela da ANOVA é possível observar que as variáveis significativas apresentaram p -valor menor que alfa = 0,05.

TABELA 6 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F-valor	p-valor
Equipe	12	24,76701	2,06392	27,52744	0,00000
Região	5	12,06626	2,41325	32,18669	0,00000
Resíduos	5.137	385,15547	0,07498	-	-

FONTES: O autor (2022).

Os parâmetros estimados para as variáveis do modelo de erros de medição de altura, erro padrão, valor- t e p -valor são apresentados na Tabela 7. Foi possível observar que as variáveis estaticamente significativas ao nível de significância de 5% foram apenas equipes e região.

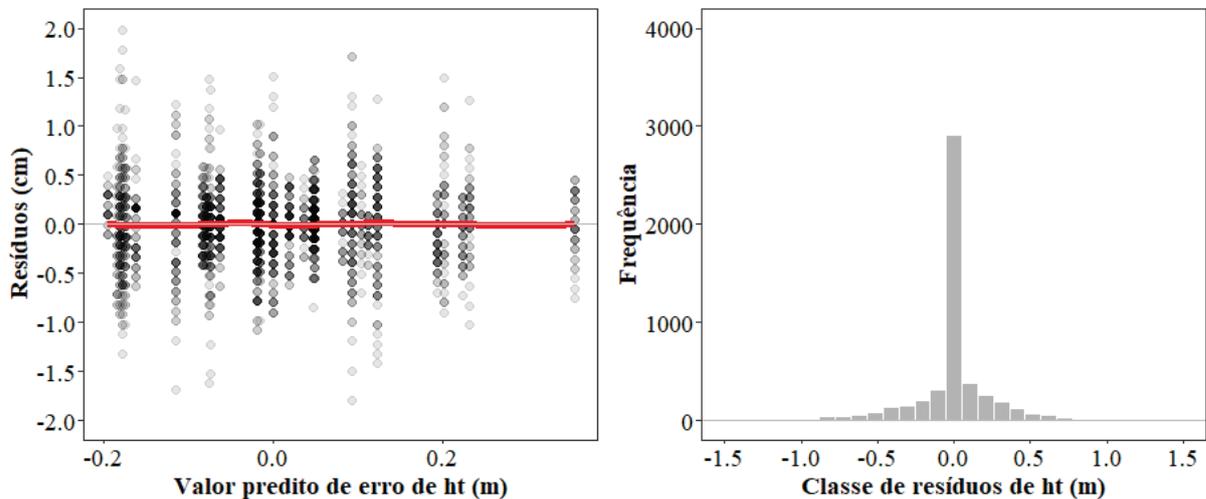
TABELA 7 - ESTATÍSTICAS RESULTANTES DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS

Variável	Parâmetro	Erro padrão	t-valor	p-valor
Intercepto	0,22242452	0,01972542	11,27603601	0,00000000
Equipe B	-0,30706686	0,02653390	-11,57262326	0,00000000
Equipe C	-0,02949611	0,01907301	-1,54648408	0,12204930
Equipe D	-0,28556654	0,02113519	-13,51142599	0,00000000
Equipe E	-0,23865751	0,02171647	-10,98970016	0,00000000
Equipe F	-0,30467370	0,02098385	-14,51943724	0,00000000
Equipe G	-0,30146722	0,02768668	-10,88853104	0,00000000
Equipe H	-0,30439950	0,02619739	-11,61945961	0,00000000
Equipe I	0,06940271	0,04622791	1,50131605	0,13333530
Equipe J	-0,07472763	0,05496496	-1,35955032	0,17403194
Equipe K	-0,39575786	0,07339987	-5,39180599	0,00000007
Equipe L	-0,29749594	0,03127525	-9,51218276	0,00000000
Equipe M	-0,18169447	0,05494004	-3,30714123	0,00094901
Curvelo	0,00791577	0,02419087	0,32722115	0,74351395
João Pinheiro	-0,09987560	0,01537583	-6,49562372	0,00000000
Juramento	-0,11158579	0,03200218	-3,48681868	0,00049289
Montes Claros	0,06271822	0,01488747	4,21282057	0,00002565
Pirapora	-0,17485094	0,02308176	-7,57528501	0,00000000

FONTE: O autor (2022).

Os gráficos de distribuição e histograma dos resíduos do modelo ajustado para estimativa dos erros de medição de altura em função das variáveis preditoras são apresentados na Figura 13. Assim como observado para o modelo de erros de medição de cap, podemos notar que não há tendenciosidades aparentes, com os resíduos distribuídos de forma homogênea para diferentes valores preditos de erros de medição, todavia, com maior amplitude de variação. O histograma dos resíduos também sugere uma distribuição normal, com alta concentração de resíduos próximos de zero, assim como observado nos valores observados.

FIGURA 13 - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO E HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS SP.* EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS



FONTE: O autor (2022).

4.6 DISCUSSÃO

Quando comparados com os observados por diversos outros autores, foi possível afirmar que os valores observados no presente estudo são mais acurados (Tabela 1). Paudel, Beckschäfer e Kleinn (2021) em uma floresta manejada no estado da Baixa Saxônia, Alemanha, observaram erros com uma amplitude de $\pm 2,5$ cm para as medições de dap, enquanto Theilade, Rutishauser, Poulsen (2015), em uma floresta tropical da indonésia, observaram que 95% das árvores mensuradas em seu estudo apresentavam erros máximo de ± 6 cm, sendo encontrados erros maiores em árvores com diâmetros avantajados.

Sendo todos estudos realizados em florestas naturais localizadas nos Estados Unidos da América, Elzinga, Shearer e Elzinga (2005), no estado de Montana, considerando uma média de erro próxima a zero, observaram variações máximas entre -3,5 cm e 2,8 cm. Já McRoberts *et al.* (1994), estado do Michigan, observaram um erro médio próximo de 0,13 cm para equipes experientes e, Westfall e Patterson (2007), nos estados do Maine, New Hampshire, Pennsylvania e Ohio, observaram um erro médio de 0,02 cm.

É importante mencionar que a maioria dos trabalhos apresentou os erros de medição relacionados diretamente ao dap. Para que seja tratada como uma medida direta e assim evitar algumas fontes de erros como de transformação, arredondamento e excentricidade (LOETSCH; ZÖHRER; HALLER, 1973; MACHADO;

FIGUEIREDO FILHO, 2006), optou-se por apresentar todos os valores e ajustes relacionados aos valores de cap.

Para as medições de alturas, Paudel, Beckschäfer e Kleinn (2021) observaram erros médios de -0,06 m e 0,77 m, respectivamente, para equipes experientes e inexperientes. Já Westfall e Patterson (2007) observaram erro médio de 0,29 m, enquanto Kitahara, Mizoue e Yoshida (2010) no Japão, em plantios florestais das espécies *Cryptomeria japonica* e *Chamaecyparis obtusa* assim como em florestas naturais, observaram medianas de erros de medição de -0,10 m e 0,00 m respectivamente para espécies coníferas e folhosas.

É importante mencionar que os estudos comparados foram desenvolvidos em áreas com vegetação nativa ou plantios muito mais antigos que o do presente estudo, o que facilita a ocorrência de erros de medições devido principalmente à simultaneidade de fontes de influência no mesmo ambiente e principalmente devido à heterogeneidade dos indivíduos arbóreos.

Um trabalho desenvolvido em uma situação muito semelhante ao do presente estudo foi realizado por Silva *et al.* (2019), no qual os autores observaram erros médios de 0,085 cm para a medição do cap (cap médio = 61,54 cm) e -0,2253 m para as medições das alturas (altura média = 27,37) em plantios de *Eucalyptus spp.* localizados no estado do Mato Grosso do Sul, Brasil. Embora sejam dados provenientes de checagem, é importante mencionar que diferentemente do presente estudo, a checagem das parcelas foi realizada às cegas, isto é, sem conhecimento dos valores da mensuração do inventário florestal, e as equipes de campo não possuíam um protocolo de controle da qualidade estabelecido.

Como pode ser observado nos histogramas de frequência dos erros de medições de cap e altura (Figura 2), na maioria das medições não foi constatada ocorrência de erros, ou seja, aproximadamente em 62,89 % das medições de cap e 57,79 % das medições de altura, o que significa a existência de uma única moda central, cujo centro de classe é o valor zero, sendo assim, corroborando o comportamento já mencionado por Gertner (1991), McRoberts *et al.* (1994), Kangas (1996), Kangas (1998) e Kangas e Kangas (1999).

De acordo com Canavan e Hann (2004), existe uma série de variáveis capazes de influenciar a acuracidade das medições em inventários florestais e, conseqüentemente, a normalidade dos erros de medições. Tendo em vista as variáveis capazes de exercer influência sobre a ocorrência de erros de medições

analisadas no presente estudo, foi possível constatar que não foram capazes de influenciar a unimodalidade e simetria da distribuição dos erros de medições de cada variável.

Por fim, como os histogramas sugerem que os erros de medições de cap e altura estão mais sujeitos a amplitudes de variações maiores do que a variações da média (tendenciosidade), as quais embora perceptíveis, foram, de forma geral, relativamente pequenas. Dessa forma, por tais características, assim como observado por Gertner e Köhl (1992), os erros de medição analisados tendem a ser aleatórios e compensantes.

A unimodalidade também confirma a suposição apresentada por Loetsch, Zöhrer e Haller (1973), os quais sugerem que pequenas tendenciosidades positivas e negativas tendem a se balancearem em inventários com grande quantidade de medições, desde que as fontes de tendenciosidade tenham sido eliminadas, sendo o controle dos instrumentos o principal responsável por tal eliminação de tendenciosidade no presente estudo.

Além do percentual de medições sem erros, quando comparado ao histograma dos erros de medição de cap, foi possível observar maiores frequências nas caudas do histograma dos erros de medição das alturas, o que é outro indicador da maior ocorrência de erros na mensuração de tal variável. Porém, é importante salientar que tal característica não necessariamente está relacionada à qualidade das medições, mas provavelmente à precisão do aparelho (hipsômetro) utilizado (SILVA *et al.*, 2019).

Diversos estudos mencionam que por se tratar de uma medição indireta, quando comparada ao cap, a altura das árvores é uma variável de mais difícil obtenção e, conseqüentemente, sujeita a mais fontes de erros (MCROBERTS *et al.*, 1994, CASTAÑO-SANTAMARÍA *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2019; MAGNUSSEN; KLEINN; FEHRMANN, 2020). Todavia, conforme as variáveis estatisticamente significativas (Tabelas 5 e 7), embora o efeito da influência das variáveis estudadas sobre a precisão da medição de alturas seja maior, a medição de cap é sujeita à influência de uma maior quantidade de fontes (variáveis).

Devido às atividades repetitivas do procedimento de medição no interior de cada parcela, esperava-se tendenciosidades e maior amplitude de variação nas medições nas últimas linhas e árvores de cada parcela. Embora tênue, a diminuição da amplitude de variação nas últimas linhas e árvores das parcelas pode estar

relacionada a uma dimensão eficiente da parcela utilizada e, conseqüentemente, a um número de árvores adequado, ao ponto de evitar os efeitos do cansaço das equipes sobre as medições, podendo esse ser mais um fator relacionado aos erros não amostrais e à escolha de um tamanho de parcela adequado, além da inclusão ou não de árvores limítrofes, mencionada por Kershaw Jr et al. (2016).

Embora já se esperasse uma queda na qualidade das medições realizadas nos dias de sábado e domingo devido à motivação das equipes, os dias de fim de semana foram uma variável estatisticamente significativa apenas no modelo dos erros de medição de cap, além disso, não foi possível identificar tendências na média, nem mesmo diferenças aparentes na amplitude de variação dos erros de medições (Figura 6).

Embora não tenha aparentado diferenças nos gráficos, as parcelas remediadas foram uma variável estatisticamente significativa no modelo ajustado para os erros de medição de cap. Como pode ser observado na Tabela 5, o efeito de tal variável é negativo, o que sugere uma leve superestimativa das medições nas parcelas nas quais não foi realizada a atividade de instalação. Tal fenômeno pode estar relacionado ao maior cuidado e atenção na medição das parcelas que estão sendo instaladas no momento.

Variável estatisticamente significativa em ambos os modelos ajustados (Tabelas 5 e 7), a variação da média dos erros de medições entre as equipes de medição pode ter diversos motivos como treinamento, motivação, uso adequado dos instrumentos, ou até mesmo falta de atenção (PAUDEL; BECKSCHÄFER; KLEINN 2021). Embora seja de baixa magnitude, um fator de preocupação é a tendência das médias nos mesmos sentidos para os erros de medição de cap e altura por algumas equipes, o que pode maximizar a tendência na estimativa do volume de madeira, variável de interesse do inventário florestal.

Como pode ser observado na Figura 6, o bom desempenho das equipes C a H na medição de ambas as variáveis provavelmente está relacionado ao seu treinamento e qualificação, o que reforça a importância das checagens e treinamento periódico contínuo para padronização da qualidade das medições (KITAHARA; MIZOUE; YOSHIDA, 2009; KITAHARA; MIZOUE; YOSHIDA 2010; PAUDEL; BECKSCHÄFER; KLEINN, 2021).

Embora a textura do solo não tenha sido uma variável estatisticamente significativa, a maior amplitude de variação nas medições de cap em solos arenosos

(Figura 7) pode estar relacionada ao crescimento de vegetação gramínea e subarbustiva (ANDRADE; ASSIS; SALES, 2010), as quais se adaptam facilmente às características naturais de alta porosidade e baixa fertilidade destes solos e podem influenciar na altura da medição dos diâmetros quando o medidor despercebidamente realizar a medição em cima de moitas desta vegetação, ou até mesmo com a baliza de 1,3 m.

Por outro lado, a maior fertilidade dos solos argilosos em relação aos arenosos pode proporcionar o desenvolvimento de um subosque com maior riqueza de biodiversidade e espécies arbustivas e arbóreas como já observado por Vieira *et al.* (2017) em áreas de plantio onde a vegetação nativa da região é o Cerrado e o clima é semelhante ao do presente estudo e, Soares e Nunes (2013), no município de Montes Claros, uma das regiões do presente estudo. Dessa forma, o desenvolvimento do subosque, assim como a regeneração do próprio plantio, pode dificultar a visada do topo das árvores no momento da medição da altura total, o que pode ser o motivo da maior amplitude de variação dos erros de medição da altura.

Quanto às regiões de plantio, assim como as coordenadas, além da atuação das equipes limitadas a determinadas regiões, o comportamento da ocorrência de erros de medições com tais variáveis tem explicação na associação delas com a maioria das demais variáveis independentes estudadas, como pode ser observado pelos valores de correlação entre as variáveis coordenadas, espaçamento e idade para os erros de medição de cap (Figura 5) e altura (Figura 6). Tais correlações podem ser explicadas pela expansão das áreas de plantio com a compra de novas propriedades, assim como a consolidação dos sistemas silviculturais e de manejo da empresa, o que coincidiu com áreas em uma mesma direção geográfica.

Além disso, a correlação entre as coordenadas e os erros de medições de cap e altura é um forte indicativo de dependência espacial dessas variáveis. Considerando a grande quantidade de estudos que buscam a compreensão da dependência espacial de variáveis dendrométricas em povoamentos do gênero *Eucalyptus* sp. (MELLO *et al.*, 2009; LUNDGREN; SILVA; FERREIRA, 2016; GOERGEN *et al.*, 2020; ATAÍDE *et al.*, 2021), é possível afirmar que a aplicação de métodos geoestatísticos para compreensão da estrutura da dependência espacial dos erros de medições pode provavelmente trazer resultados relevantes, como a possibilidade de distinção das áreas de plantio com maior e menor qualidade de medições no inventário florestal.

Quanto às características individuais de cada árvore estudada, a espécie *Eucalyptus cloeziana* apresentou a maior variação da média dos erros de medição de cap (Figura 9), além disso, as espécies foram estatisticamente significativas no ajuste (Tabela 4). Dessa forma, é importante mencionar que embora se trate do mesmo gênero, as espécies apresentam diferenças morfológicas, sendo nesse caso as características de tronco e casca as de maior influência sobre os erros de medição de cap.

A espécie *Eucalyptus cloeziana* apresenta uma casca grossa com profundas fissuras longitudinais, diferente da espécie *Eucalyptus grandis* que apresenta cascas mais finas, lisas e que se destacam do fuste e, da espécie *Eucalyptus urophylla*, a qual apresenta casca ligeiramente fibrosa com pequenas fissuras longitudinais (FLORES *et al.*, 2016). Também é importante mencionar que as folhas, característica com maior potencial de influência na medição das alturas (por compor a copa), apresentam dimensões e formas semelhantes nas espécies estudadas, podendo ser o motivo das espécies não serem estatisticamente significativas na estimativa dos erros de medição de alturas.

Devido ao pequeno número de observações (uma parcela com 29 árvores), a leve tendência à superestimativa observada na média dos erros de medição de cap e subestimativa das alturas no plantio com menor número de árvores (Figura 10) pode estar relacionada a diversos outros fatores. Todavia, embora não tenha sido uma variável estatisticamente significativa, a subestimativa observada na média dos erros de medição de altura dos plantios mais adensados pode estar relacionada à sobreposição das copas das árvores, onde, a determinadas distâncias, o topo da árvore alvo de medição pode ser facilmente confundida com a da árvore seguinte.

A leve tendência à subestimativa das medições nos plantios mais novos provavelmente está relacionada à altura da copa nesse período. Além da dificuldade de aproximação das árvores devido aos galhos, o posicionamento da fita, assim como a correta alocação na altura do cap, pode ser dificultada devido aos verticilos, a inserção dos galhos no fuste.

Quanto à amplitude de variação, enquanto os fustes se tornam mais definidos e apresentam uma forma mais cilíndrica, facilitando assim a tomada da circunferência na altura correta, na medida que as árvores do plantio se desenvolvem, existe um distanciamento gradual das copas, o que torna o topo das árvores mais visível nos plantios mais maduros, facilitando visada final na medição, assim como a

padronização da distância horizontal entre o medidor e as árvores, dessa forma, a precisão das medições de ambas as variáveis tende a aumentar, o que pode ter resultado na redução da amplitude dos erros de medições.

As sutis tendenciosidades observadas nas médias dos erros de medições de ambas as variáveis (Figura 11), assim como o aumento da amplitude de variação dos erros na medida em que as dimensões das árvores aumentaram, corroboram a hipótese de que erros de maior magnitude tendem a ocorrer em árvores de maiores dimensões, como já relatado por Suty, Nyström e Ståhl (2013) e Theilade, Rutishauser e Poulsen (2015) em árvores de maiores diâmetros para a medição do cap e, mencionado por Kangas e Kangas (1999) em árvores mais altas para a medição das alturas.

Todavia, além das tendenciosidades observada serem ínfimas, também é importante mencionar que por se tratar de plantios, as árvores mensuradas apresentavam cap relativamente pequenos quando comparadas com árvores que podem ser encontradas e mensuradas em florestas nativas, assim como a ausência de grandes variações de cascas e formas do fuste devido à variedade espécies, musgos, cipós e outros fatores mais frequentes em povoamentos naturais, os quais influenciam na qualidade da mensuração, como já observado por Theilade, Rutishauser e Poulsen (2015).

Outro importante fator observado foi que os erros de medições apresentaram comportamento idêntico aos dados mensurados no inventário e na checagem, o que não apenas infere qualidade às medições do inventário, mas também da própria checagem. Ou seja, com tal resultado é possível deduzir que a checagem não foi realizada de forma tendenciosa, com critérios que excediam ao protocolo utilizado. Além disso, por estar muito relacionado ao desempenho humano (das equipes), a checagem com acesso aos dados do inventário (checagem-fria) reduz significativamente as chances de erros pela equipe, quando comparada à checagem-cega.

4.7 CONCLUSÃO

Os erros de medição de cap são associados a uma maior quantidade de fonte de erros quando comparados aos erros de medição de altura. Os erros de medições de ambas as variáveis analisadas não apresentaram tendenciosidades significativas,

considerando o comportamento apresentado, podem ser caracterizados como aleatórios, compensantes e não-tendenciosos.

Embora não se tenha observado tendenciosidades, os indicadores dos modelos ajustados não apresentaram qualidade suficiente para que os modelos fossem utilizados para estimativa de erros de medições com precisão satisfatória.

Além das equipes de medição, o modelo de erros de medição de cap teve como variáveis associadas as coordenadas, parcelas de remedição, a idade dos plantios, as espécies, o espaçamento dos plantios (densidade), os dias de fim de semana, as regiões dos plantios e as covas de cada árvore.

Com menor quantidade de variáveis estatisticamente significativas, além das equipes de medição, o modelo de erros de medição de altura teve como variáveis associadas apenas algumas regiões.

4.8 REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. M. S.; DE ASSIS, G. M. L.; SALES, M. F. L. **Estilosantes Campo Grande**: leguminosa forrageira recomendada para solos arenosos do Acre. Embrapa: Acre, Circular Técnica 55, 2010. 12 p.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ATAÍDE, D. H. D. S *et al.* Dependência espacial de variáveis dendrométricas em diferentes idades e intensidades amostrais em povoamento de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1591-1611, 2021.

BERGER, A. *et al.* Analysis of tree measurement errors in the Austrian National Forest Inventory. **Aust. J. For. Sci**, v. 129, n. 3, p. 149-177, 2012.

BERGER, A. *et al.* Effects of measurement errors on individual tree stem volume estimates for the Austrian National Forest Inventory. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 14-24, 2014.

CANAVAN, S. J.; HANN, D. W. The two-stage method for measurement error characterization. **Forest Science**, v. 50, n. 6, p. 743-756, 2004.

CASTAÑO-SANTAMARÍA, J. *et al.* Tree height prediction approaches for uneven-aged beech forests in northwestern Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 307, p. 63-73, 2013.

CUNIA, T. Some theory on reliability of volume estimates in a forest inventory sample. **Forest Science**, v. 11, n. 1, p. 115-128, 1965.

ELZINGA, C.; SHEARER, R. C.; ELZINGA, G. Observer variation in tree diameter measurements. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 20, n. 2, p. 134-137, 2005.

FLORES, T. B. *et al.* **Eucalyptus no Brasil**: zoneamento climático e guia para identificação. Piracicaba: IPEF, 2016. 448 p.

GASPARINI, P. *et al.* Quality control procedures in the Italian national forest inventory. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 11, n. 4, p. 761-768, 2009.

GERTNER, G. Z. The sensitivity of measurement error in stand volume estimation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 20, n. 6, p. 800-804, 1990.

GERTNER, G. Z. Prediction bias and response surface curvature. **Forest Science**, v. 37, n. 3, p. 755-765, 1991.

GERTNER, G. Z.; KÖHL, M. An assessment of some nonsampling errors in a national survey using an error budget. **Forest Science**, v. 38, n. 3, p. 525-538, 1992.

GOERGEN, L. C. G.; *et al.* Geostatistical behavior of dendrometric variables of *Eucalyptus benthamii* for forest management purpose. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 48, n. 127, p. 1-12, 2020.

GSCHWANTNER, T. *et al.* Growing stock monitoring by European National Forest Inventories: Historical origins, current methods and harmonisation. **Forest Ecology and Management**, v. 505, p. 119-868, 2022.

KANGAS, A. S. On the bias and variance in tree volume predictions due to model and measurement errors. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 11, n. 1-4, p. 281-290, 1996.

KANGAS, A. S. Effect of errors-in-variables on coefficients of a growth model and on prediction of growth. **Forest Ecology and Management**, v. 102, n. 2, p. 203-212, 1998.

KANGAS, A. S.; KANGAS, J. Optimization bias in forest management planning solutions due to errors in forest variables. **Silva Fennica**, v. 33, n. 4, p. 303-315, 1999.

KERSHAW JR, J. A. *et al.* **Forest mensuration**. 5th Ed., West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2016.

KITAHARA, F.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Evaluation of data quality in Japanese national forest inventory. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 159, n. 1, p. 331-340, 2009.

KITAHARA, F.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements. **Silva Fennica**, v. 44, n. 4, p. 657-667, 2010.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV. Verlagsgesellschaft, 1973. V.2, 469 p.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. Influência do tipo de amostragem na estimativa de volume de madeira de eucalipto por krigagem. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 511-523, 2016.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2006.

MAGNUSSEN, S.; KLEINN, C.; FEHRMANN, L. Wood volume errors from measured and predicted heights. **European Journal of Forest Research**, p. 1-10, 2020.

MELLO, J. M. D. *et al.* Continuidade espacial para características dendrométricas (número de fustes e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 33, p. 185-194, 2009.

MCROBERTS, R. E. *et al.* Variation in forest inventory field measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 24, n. 9, p. 1766- 1770, 1994.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 34-42, 2014.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Propagating uncertainty through individual tree volume model predictions to large-area volume estimates. **Annals of Forest Science**, v. 73, n. 3, p. 625-633, 2016.

OMULE, S. A. Y. Personal bias in forest measurements. **The Forestry Chronicle**, v. 56, n. 5, p. 222-224, 1980.

PAUDEL, P.; BECKSCHÄFER, P.; KLEINN, C. Impact of training on different observers in forest inventory. **Banko Janakari**, v. 31, n. 1, p. 12-22, 2021.

PUKKALA, T. Multi-objective forest planning. **Springer Science & Business Media**, 2013.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020.

SILVA, S. A. *et al.* Methodology for the assessment of aspects and qualitative data in forest inventory audit. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 453-459, 2018.

SILVA, S. A. *et al.* Ferramentas estatísticas para auditoria de inventários florestais em povoamentos de *Eucalyptus spp.* **Scientia Forestalis**, n. 121, p. 59-70, 2019.

SOARES, M. P.; NUNES, Y. R. F. Regeneração natural de cerrado sob plantio de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. no norte de Minas Gerais, Brasil. **Revista Ceres**, v. 60, p. 205-214, 2013.

SUTY, N.; NYSTRÖM, K.; STÅHL, G. Assessment of bias due to random measurement errors in stem volume growth estimation by the Swedish National Forest Inventory. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 28, n. 2, p. 174-183, 2013.

THEILADE, I.; RUTISHAUSER, E.; POULSEN, M. K. Community assessment of tropical tree biomass: challenges and opportunities for REDD+. **Carbon balance and Management**, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2015.

VIEIRA, D. A. *et al.* Cerrado natural regeneration in understory of *EUCALYPTUS* sp. stands, in the Federal District, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 1, p. 68-73, 2017.

WESTFALL, J. A.; PATTERSON, P. L. Measurement variability error for estimates of volume change. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 11, p. 2201-2210, 2007.

WICKHAM, H. **Ggplot2**: Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag, New York, 2016.

5 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DO CLIMA NA OCORRÊNCIA DE ERROS DE MEDIÇÕES EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS²

5.1 RESUMO

O clima é um dos mais importantes componentes do ambiente e exerce fundamental influência em diversos processos naturais. A condição do tempo é capaz de impactar a coleta de dados em inventários florestais, principalmente no que diz respeito aos medidores e instrumentos de medição. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo analisar relações entre os erros de medições das variáveis cap e altura provenientes da checagem e variáveis relacionadas aos elementos do clima em um inventário florestal realizado em plantios de *Eucalyptus* sp. Por meio de análise de regressão, foi possível constatar que os erros de medição de cap estavam associadas às temperaturas média, máxima e mínima, assim como a velocidade do vento e a latitude, enquanto os erros de medição de altura relacionados às temperaturas média, máxima, insolação, vento e longitude. Além disso, foi observada tendência à subestimativa da média dos erros de medição de cap em umidade relativa abaixo de 45%.

Palavras-chave: Erros-não amostrais. Acuracidade. Propagação.

5.2 ABSTRACT

The climate is one of the most important components of the environment and exerts a fundamental influence on several natural processes. Weather conditions are capable of impacting data collection in forest inventories, especially with regard to measurement crews and measuring instruments. Thus, the present study aimed to analyze relationships between the measurement errors of cbh and height from the checking and climate elements in a forest inventory carried out in *Eucalyptus* sp. plantations. Through regression analysis, it was possible to verify that the cbh measurement errors were associated to average, maximum and minimum temperatures, as well as wind speed and latitude, while the height measurement errors

² INFLUENCE OF CLIMATE ELEMENTS ON THE OCCURRENCE OF MEASUREMENT ERRORS IN FOREST INVENTORIES.

were related to average and maximum temperatures, insolation, wind and longitude. In addition, there was a tendency to underestimate the average of cbh measurement errors in relative humidity below 45%.

Keywords: Non-sampling errors. Accuracy. Propagation.

5.3 INTRODUÇÃO

Qualquer empreendimento está exposto a riscos e incertezas, quando se trata de projetos florestais, tais ameaças são predominantemente provenientes de fatores econômicos, biológicos e climáticos, sobre os quais se tem pouco ou nenhum controle, dependendo da intensidade do evento (PUKKALA, 2013).

Uma vez que as decisões no planejamento da produção florestal são tomadas com base nas informações provenientes dos inventários florestais, a acurácia delas é fundamental, caso contrário, informações imprecisas podem constituir em uma fonte de risco para os empreendimentos florestais (PUKKALA, 1998; SILVA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019).

Inventários florestais possuem duas classes de erros, o erro amostral que é resultante da adoção de técnicas de amostragem em detrimento do censo e, os erros não amostrais, onde estão inclusos todos os demais tipos de erros, incluindo os erros de medições (LOETSCH; ZÖHRER; HALLER, 1973; GERTNER, 1991).

Assim como outras fontes de incerteza em empreendimentos florestais, eventuais tendenciosidades nas estimativas do inventário florestal tendem a ser agravadas pelo longo período até o corte da madeira, quando podem provocar perdas econômicas pela dificuldade de adaptação a situações de falta ou sobra de madeira nas indústrias (KANGAS; KANGAS, 1999), desbastes e cortes rasos fora dos períodos mais indicados (MÄKINEN; KANGAS; MEHTÄTALO, 2010) e, pagamentos por matéria-prima em excesso ou em falta (SILVA *et al.*, 2019).

Considerando que qualquer medição física está associada a incertezas (RABINOVICH, 2006; TRAN; TRAN; RAKITZIS, 2019) e, que a maior parte das atividades de campo de um inventário florestal se resume a medições de variáveis dendrométricas, a presença de erros de medições na coleta de dados é inevitável e na maioria das vezes está relacionada aos medidores e a defeitos dos equipamentos utilizados (OMULE, 1980).

O clima é um dos mais importantes componentes do ambiente e exerce fundamental influência em diversos processos naturais. Em projetos florestais, além da influência sobre o crescimento e produção das árvores, períodos de estiagem, incêndios dentre outros exemplos clássicos (ALVARES *et al.*, 2013), os elementos do clima podem influenciar sentidos e comportamentos humanos (KJELLSTROM; CROWE, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2021), assim como também a agitação das moléculas da matéria, provocando, entre outros fenômenos, a dilatação de corpos (GURAUSKIS *et al.*, 2019; LINGMEI *et al.*, 2019), o que pode impactar a qualidade da coleta de dados de inventários florestais por meio de interferências nos instrumentos de medição.

Tendo em vista as condições do tempo serem capaz de impactar os dois principais elementos da coleta de dados em inventários florestais, ou seja, os medidores e os instrumentos (KITAHARA; MIZOUE; YOSHIDA, 2009; KITAHARA MIZOUE; YOSHIDA, 2010; PAUDEL; BECKSCHÄFER; KLEINN, 2021), conhecer a influência de variáveis relacionadas aos elementos do clima nos erros de medições é de grande valia no que diz respeito ao planejamento de períodos e jornadas de coletada de dados.

Ou seja, com tal conhecimento seria possível mitigar influências negativas por meio da adaptação dos períodos e jornadas de trabalho, a fim de evitar que as atividades de coleta de dados sejam realizadas com certas condições de tempo, consideradas extremas para tal finalidade. Isto posto, o objetivo do presente estudo foi analisar a existência de relações entre os erros de medições provenientes da checagem e variáveis relacionadas aos elementos do clima em um inventário florestal realizado em plantios de *Eucalyptus* sp.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

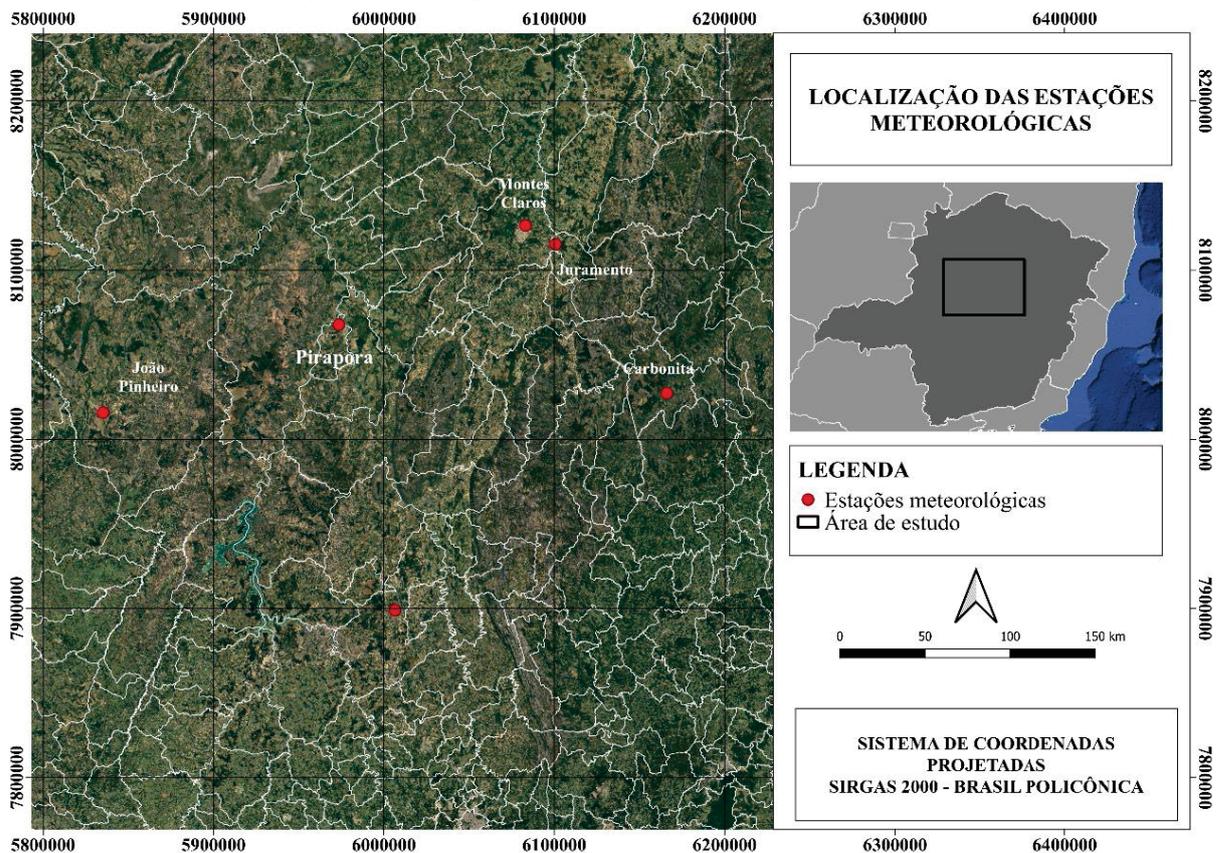
5.4.1 Área de estudo

O inventário florestal utilizado como fonte de informações para o presente estudo foi realizado em aproximadamente 6200 hectares de plantios das espécies *Eucalyptus spp*, *Eucalyptus cloeziana* F. Muell, *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e *Eucalyptus urograndis*, localizados em seis microrregiões (Carbonita, Curvelo, João

Pinheiro, Juramento, Montes Claros e Pirapora), distribuídas nas mesorregiões do Vale do Jequitinhonha e Norte do estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 14).

Estabelecidos em terrenos predominantemente planos com solos arenosos e argilosos, onde a vegetação nativa é o Cerrado, segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Aw (clima tropical de savana), com precipitação média anual de 1000 mm e temperatura média de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

FIGURA 14 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NAS ÁREAS DE ESTUDO NAS MESORREGIÕES DO VALE DO JEQUITINHONHA E REGIÃO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS



FONTE: O autor (2022).

5.4.2 Inventário florestal e procedimentos de coleta de dados

O processo de amostragem utilizado foi o sistemático, com fração amostral de 0,5%. As parcelas são permanentes, de forma circular, com área de aproximadamente 500 m² (raio de 12,62 m), as quais foram distribuídas conforme um grid amostral de 1 parcela para cada 10 hectares de plantio.

O inventário foi realizado em aglomerados de 20 unidades amostrais mensuradas em sequência, todas identificadas com relação à equipe, talhão e data de medição. Ainda, para que a checagem fosse realizada a nível de árvores, foram

adotados procedimentos como a enumeração das linhas, das covas de plantio e dos fustes das árvores.

Após a coleta das coordenadas UTM do ponto central (latitude e longitude) com aparelho GPS Garmin eTrex® 30, em cada parcela foram mensuradas as circunferências dos fustes à altura do peito, 1,3 m de altura (cap) de todas as árvores utilizando baliza e fita métrica de aço (modelo Lufkin W606PM) e, os valores de altura total das 7 primeiras árvores da primeira linha, das 3 árvores com os menores valores de cap, das 5 árvores com os maiores valores de cap e, das árvores mortas, quebradas e com ponta seca, com o uso do clinômetro digital (modelo ECII – D Haglöf). Por fim, também foi atribuída qualidade ao fuste de cada árvore.

Com a data de cada parcela mensurada, foi possível acessar bancos de dados do tempo e obter informações como insolação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média dos períodos das medições. O número total de valores de cap e altura total coletados, aos quais podem ser atreladas tais variáveis, foi de, respectivamente, 9829 e 3625.

5.4.3 Procedimentos de checagem e informações coletadas

A checagem do inventário florestal foi realizada por uma equipe qualificada, seguindo exatamente os mesmos métodos e utilizando os mesmos instrumentos do inventário florestal, dentro do prazo de 7 dias, para que não houvesse diferença entre as medições devido ao desenvolvimento dos indivíduos. Para o presente estudo, foram sorteadas e remedidas 227. Nessas parcelas, foram realizadas remedições completas, com acesso aos dados das medições realizadas no inventário. Para a obtenção dos erros, os valores das medições da checagem foram tomados como verdadeiros (Equação 5).

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i$$

(5)

Onde \hat{e}_i é o i -ésimo erro de cada medição, y_i é a i -ésima medição obtida na checagem e \hat{y}_i a i -ésima medição obtida no inventário.

5.4.4 Análise estatística

Tendo em vista os diferentes tipos de variáveis, a análise estatística foi realizada em duas etapas, uma análise exploratória e uma análise de regressão. O principal intuito da análise exploratória foi analisar o efeito das covariáveis (coordenadas, insolação, temperaturas máxima, média e mínima, umidade relativa do ar e velocidade do vento) sobre o erro de medição das variáveis circunferência à altura do peito (cap) e à altura total (ht). A base de dados meteorológicos do período da coleta de dados foi obtida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para a observação do comportamento dos erros de medições em termos de tendenciosidade e aleatoriedade, nos gráficos das variáveis categóricas, a média da categoria foi representada por um círculo sólido em vermelho, enquanto nos gráficos das variáveis contínuas foi representada por uma curva suavizada localmente (LOESS) (Equação 6).

$$y_i = g(x_i) + \varepsilon_i \quad (6)$$

Onde y é a variável dependente (resposta), x_n é a descrição de cada variável independente, g é a função na vizinhança de cada ponto de interesse $x = x_0$, ε_i é o erro independente e identicamente distribuído com distribuição normal, média zero e variância constante.

Por meio de um modelo de regressão linear (Equação 7), considerando nível de significância $\alpha = 5\%$ (0,05), posteriormente, as variáveis contínuas foram separadas e testado o efeito nas variáveis respostas. As variáveis preditoras foram selecionadas por meio do método de seleção Stepwise em um processo iterativo e o critério de penalização utilizado foi o logaritmo do tamanho da amostra ($\log(n)$), também conhecido como Critério de Informação Bayesiano (BIC) (Equação 8).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \dots + \beta_k \cdot x_{ki} + \varepsilon_i \quad (7)$$

Onde y é a variável dependente (resposta), β_0 é o coeficiente linear (constante), β_k é o coeficiente relacionado a cada variável independente (coeficientes angulares), x_k é a descrição de cada variável independente, ε_i é o resíduo aleatório, i representa cada uma das variáveis da amostra e, n é o tamanho da amostra.

$$BIC = -2 \log f(x_k | \theta) + p \log n$$

(8)

Onde $f(x_n|\theta)$ é o modelo escolhido (log-verossimilhança do modelo ajustado), p é o número de parâmetros a serem estimados e n o número de observações da amostra.

Além do *BIC*, a qualidade do ajuste foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa e de gráficos de resíduos, com finalidade de verificar uma possível não homogeneidade, além de histogramas para verificar a normalidade dos resíduos. Os modelos de regressão linear foram ajustados por meio de funções disponíveis no pacote base do programa estatístico R (R CORE TEAM, 2020). Os gráficos foram construídos usando o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016).

5.5 RESULTADOS

Como pode ser observado na Tabela 8, os valores máximos e mínimos de cada variável estudada são similares em termos absolutos. As medianas indicam que metade das observações possui valor de erro menor ou igual a zero, enquanto as médias possuem valores muito próximos a zero, indicando que não há tendenciosidade na maioria das medições.

TABELA 8 - RESUMO DESCRITIVO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DAS PARCELAS DO INVENTÁRIO FLORESTAL REALIZADO EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP.

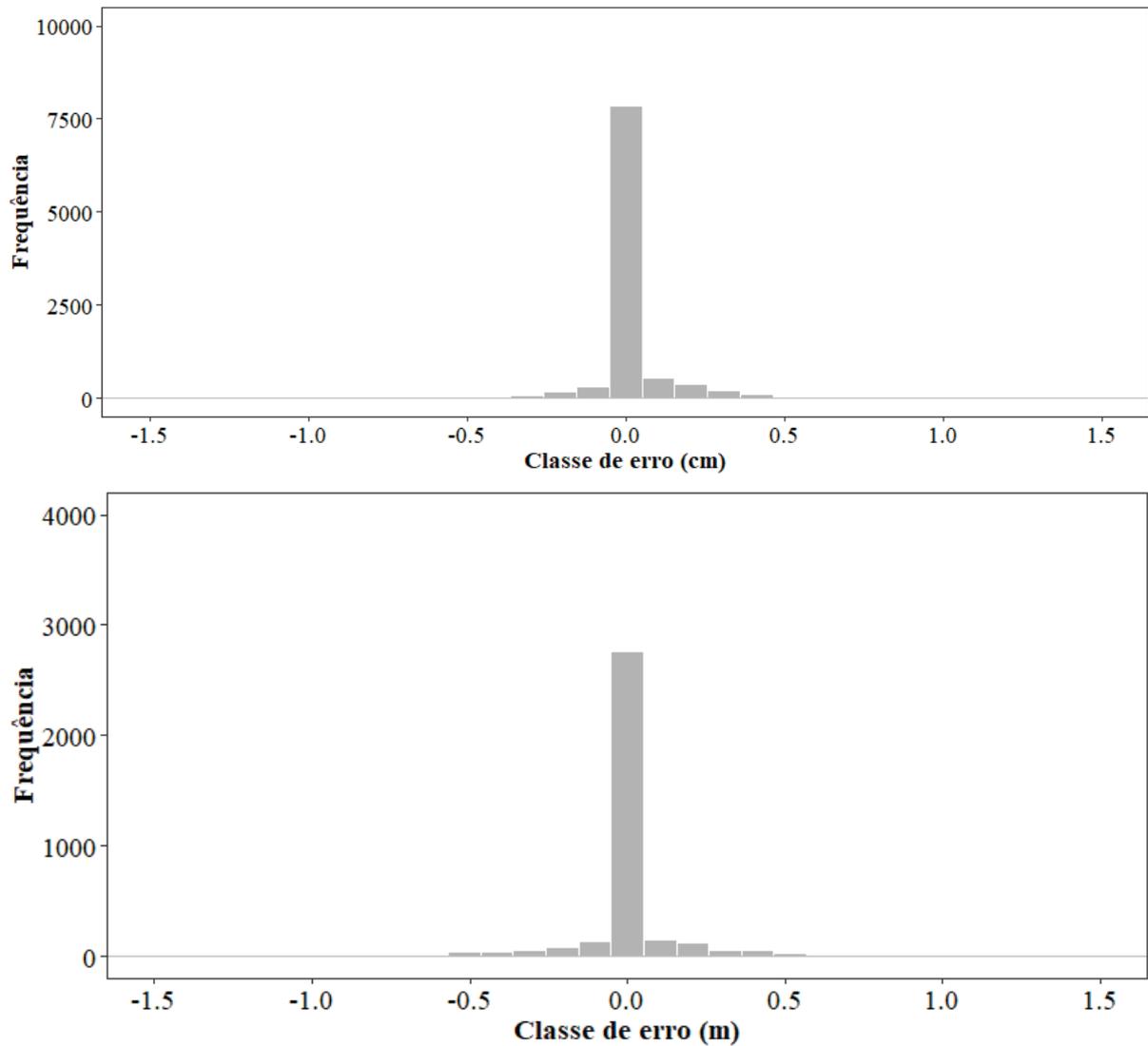
Erros de medições	n	Mínimo	Mediana	Média	Máximo
Cap	9829	-1,30	0,00	0,019	1,40
Altura	3625	-1,10	0,00	0,003	1,50

FONTE: O autor (2022).

Com médias e medianas próximas de zero, os histogramas de frequência dos erros de medições de cap e altura apresentaram unimodalidade, sugerindo tendência à normalidade dos dados. Além disso, é possível observar uma leve assimetria à direita no histograma dos erros de medição de cap, sugerindo uma pequena tendência à subestimativa nas medições da variável.

Embora a grande maioria dos dados de ambos os histogramas esteja concentrada na classe central, cujo centro de classe é igual a zero, o que sugere distribuições leptocúrticas, o histograma dos erros de medição de altura apresenta uma distribuição mais gradual dos dados nas demais classes, o que indica uma maior variabilidade nas medições.

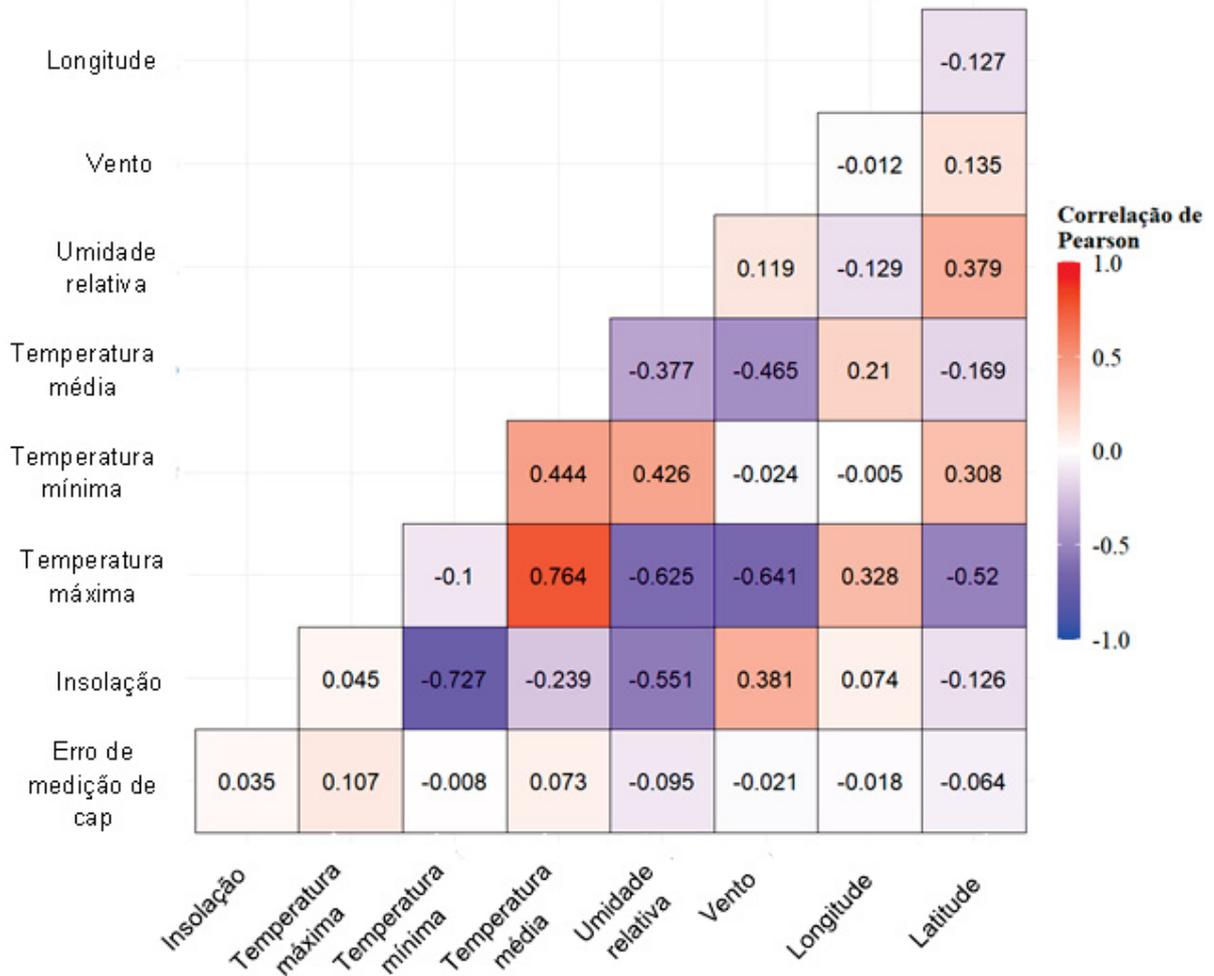
FIGURA 15 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS REALIZADOS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP.



FONTE: O autor (2022).

Como pode ser observado na Figura 16, a correlação linear de Pearson entre os erros de medição de cap e as variáveis analisadas foram muito fracas. A maior correlação com os erros de medição de cap foi com a temperatura máxima. Foram observadas correlações moderadas e altas, assim como positivas e negativas entre as demais variáveis relacionadas aos elementos do clima.

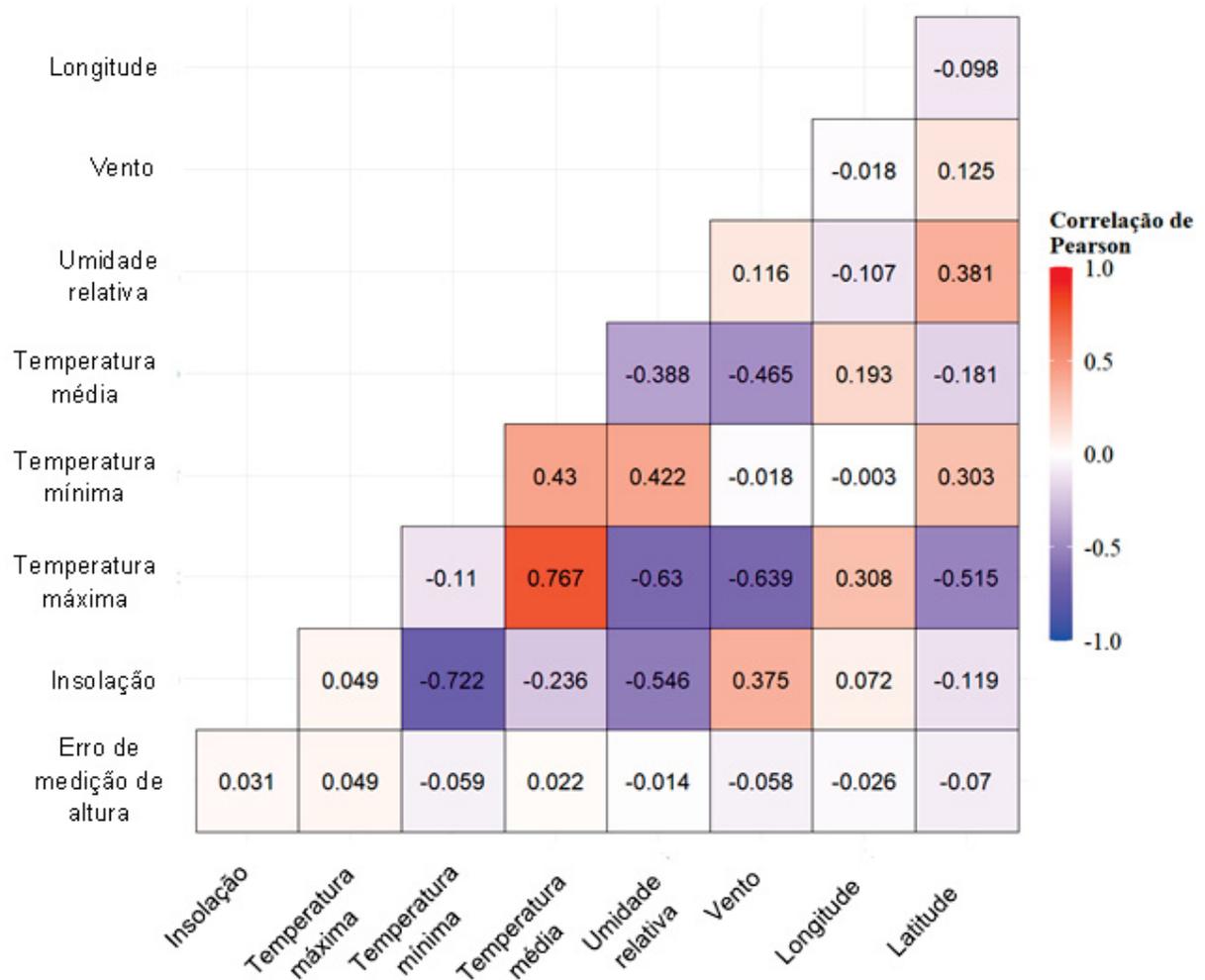
FIGURA 16 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO COM PROVÁVEL INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS SP.*



FONTE: O autor (2022).

Na Figura 17 são apresentadas as correlações de Pearson entre os erros de medição de altura e as variáveis analisadas. Os valores foram muito baixos, sendo assim, é desconsiderada a existência de correlação entre os erros de medição de altura e tais variáveis.

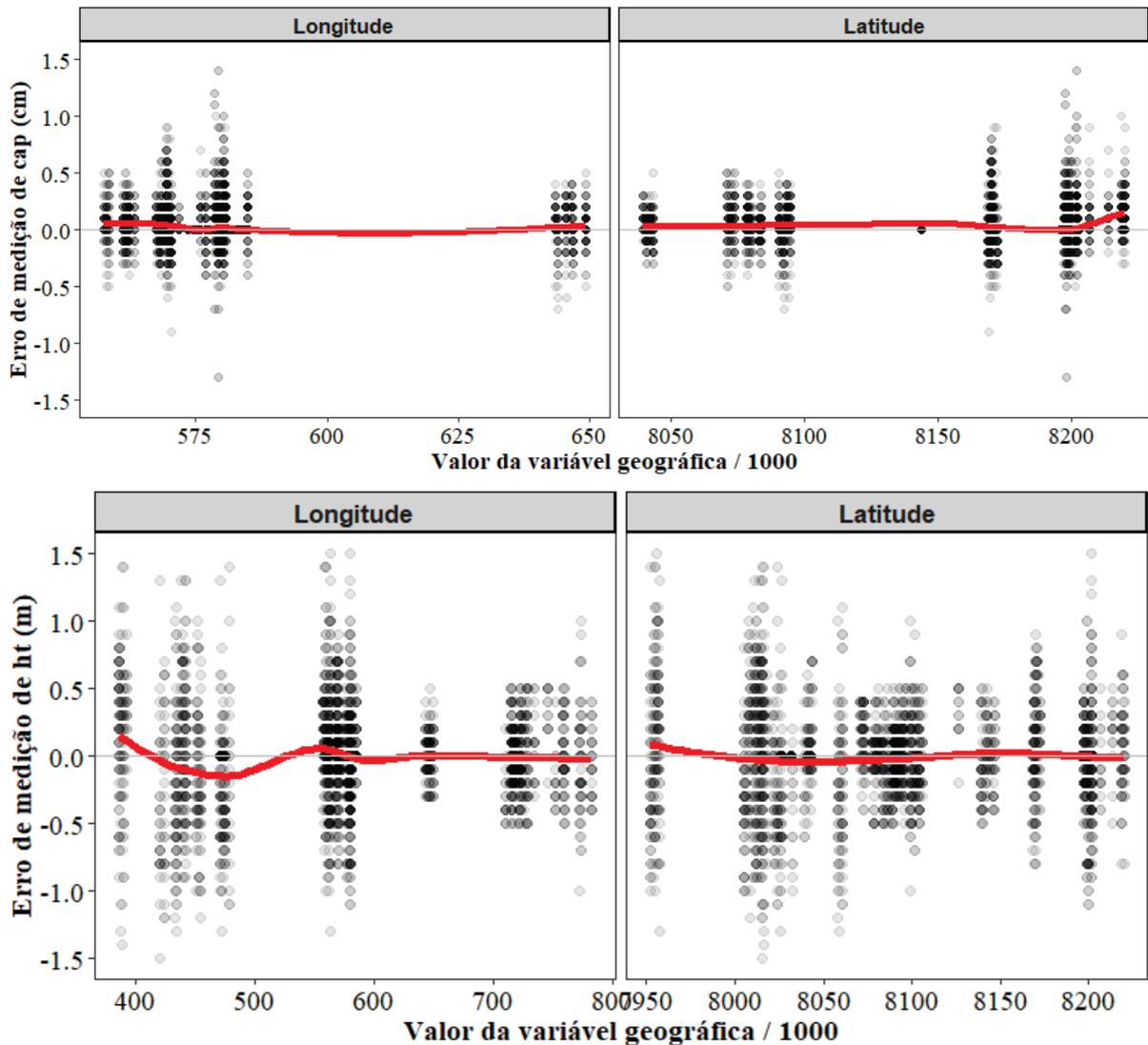
FIGURA 17 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO COM PROVÁVEL INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS SP.*



FONTE: O autor (2022).

Como é possível observar na Figura 18, os erros de medição das alturas apresentaram maior amplitude de variação em função das coordenadas. Enquanto existe uma leve tendência à subestimativa das medições de cap nas maiores latitudes, foi possível observar uma tendência à superestimativa dos erros de medição de altura nas longitudes próximas a 500000 m E e, subestimativa nos menores valores de longitude, próximos a 400000 m E.

FIGURA 18 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA POR COORDENADAS GEOGRÁFICAS. A LINHA SÓLIDA EM VERMELHO É UMA CURVA SUAVIZADA LOCALMENTE

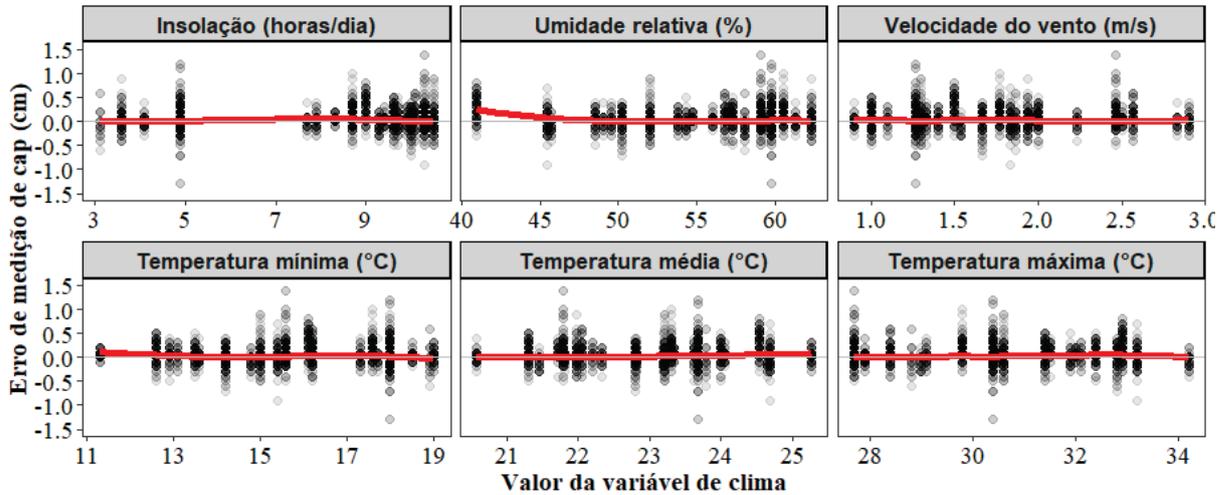


FONTE: O autor (2022).

A umidade relativa do ar foi a única variável que aparentou estar associada à média dos erros de medição de cap. Na Figura 19 é possível observar que houve uma pequena subestimativa da média dos erros quando a umidade relativa esteve abaixo de 45%, sendo que a amplitude de variação dos erros tendeu a aumentar na medida em que a umidade aumentou.

Diferentemente das temperaturas média e máxima, a temperatura mínima aparentou heteroscedasticidade, visto que a variabilidade dos erros tende a aumentar na medida em que a temperatura mínima aumenta.

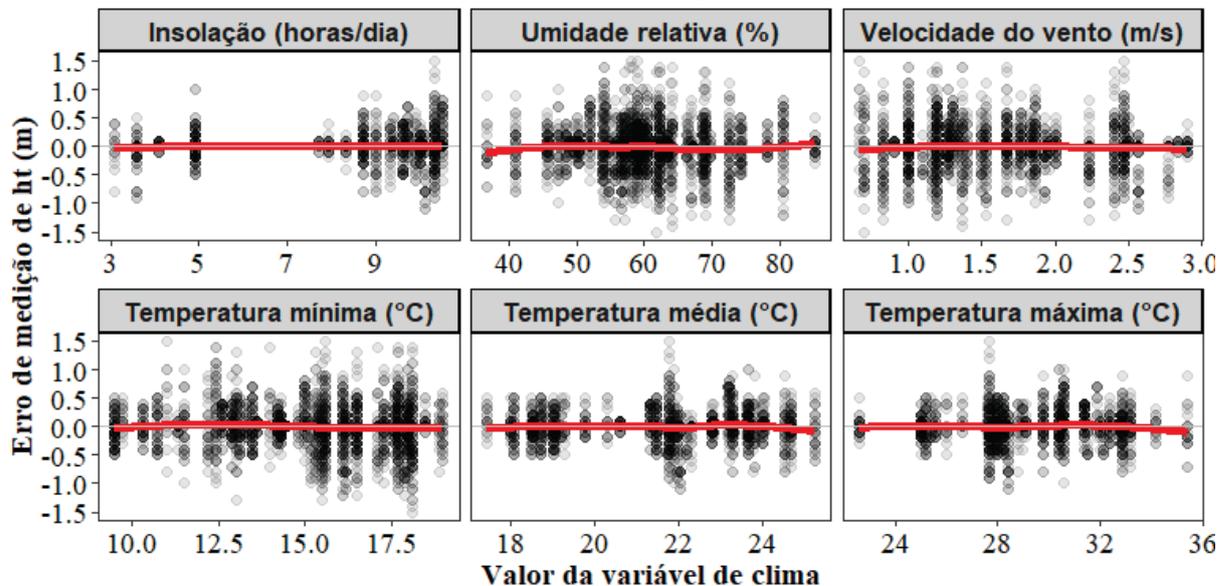
FIGURA 19 - GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHEGAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DO TEMPO



FONTE: O autor (2022).

Embora a influência das variáveis do tempo nas médias dos erros de medição de altura tenha sido quase que imperceptível, apresentaram maior amplitude de variação quando comparada aos erros de medição de cap (Figura 20). Aparentemente, a amplitude de variação dos erros de medição de altura tende a aumentar na medida em que a insolação aumenta, sendo que, a mesma coisa pode ser dita da temperatura mínima.

FIGURA 20 - GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHEGAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DO TEMPO



FONTE: O autor (2022).

Os resultados do ajuste do modelo com os erros de medições de cap e altura como variáveis resposta são apresentados na Tabela 9. É importante ressaltar que os valores de erro padrão da estimativa e coeficiente de determinação indicam que as equações não são capazes de estimar os erros de medições com precisão.

TABELA 9 - RESUMO ESTATÍSTICO DOS AJUSTES DOS MODELOS COM OS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP E ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. COMO VARIÁVEIS REPOSTAS, EM FUNÇÃO DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO

Erros de medições	n	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	S	BIC	R ²
Cap (cm)	9829	-1,3	0	0,019	1,4	0,117	-14389,7	0,02464
Altura (m)	5155	-1,8	0	-0,006	1,8	0,172	-2478,7	0,01364

FONTE: O autor (2022).

A análise de variância (ANOVA) do modelo ajustado para estimativa dos erros de medição de cap em função das variáveis relacionadas aos elementos do clima pode ser observada na Tabela 10. Na tabela da ANOVA é possível observar que as variáveis significativas apresentaram p -valor menor que $\alpha = 0,05$.

TABELA 10 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS RELACIONADAS AOS ELEMENTOS DO CLIMA

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F-valor	p-valor
Temperatura máxima	1	1,55322	1,55322	115,37055	0,00000
Temperatura mínima	1	0,00082	0,00082	0,06064	0,80549
Temperatura média	1	0,08935	0,08935	6,63643	0,01001
Vento	1	0,68067	0,68067	50,55876	0,00000
Longitude	1	1,08526	1,08526	80,61095	0,00000
Resíduos	9823	132,24603	0,01346	-	-

FONTE: O autor (2022).

Os parâmetros estimados para as variáveis do modelo de erros de medição de cap, erro padrão, valor- t e p -valor são apresentados na Tabela 11. É possível notar que as três variáveis de temperatura, assim como a velocidade do vento e a latitude foram estatisticamente significativas para nível de significância de 5%.

TABELA 11 - ESTATÍSTICAS RESULTANTES DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS SP.*, EM FUNÇÃO DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO

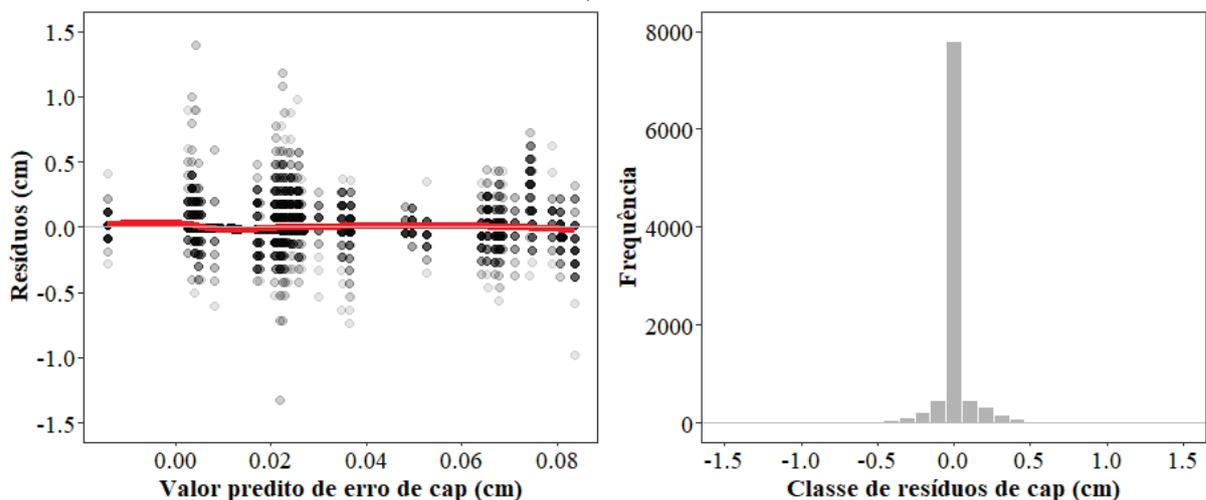
Variável	Parâmetro	Erro padrão	t-valor	P-valor
Intercepto	-0,02218157	0,05371636	-0,41293875	0,67966050
Temperatura máxima	0,02848939	0,00230518	12,35884869	0,00000000
Temperatura mínima	0,00815552	0,00135002	6,04101229	0,00000000
Temperatura média	-0,02193494	0,00348758	-6,28943938	0,00000000
Vento	0,03109669	0,00321077	9,68510428	0,00000000
Latitude	-0,00000084	0,00000009	-8,97836003	0,00000000

FONTE: O autor (2022).

É importante salientar que a temperatura média e a latitude apresentaram efeito negativo sobre o erro de medição, sugerindo que conforme os seus valores aumentam, o erro de medição tende a ser negativo. As demais variáveis apresentaram efeito positivo, sugerindo que conforme o valor da variável aumenta, o valor do erro de medição torna-se mais positivo.

Os gráficos de distribuição e histograma dos resíduos do modelo ajustado para os erros de medição de cap são apresentados na Figura 21. Podemos notar que não há tendências aparentes, com os resíduos distribuídos de forma homogênea para diferentes valores preditos de erros de medição. O histograma dos resíduos sugere uma distribuição unimodal, simétrica, com alta concentração de resíduos próximos de zero, assim como observado nos valores observados.

FIGURA 21 - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO E HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS SP.*, DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO



FONTE: O autor (2022).

A análise de variância (ANOVA) do modelo ajustado para estimativa dos erros de medição de altura pode ser observada na Tabela 12. Na tabela da ANOVA é

possível observar as variáveis significativas apresentaram p -valor menor que alfa = 0,05.

TABELA 12 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS PREDITORAS

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F-valor	p-valor
Insolação	1	0,10516	0,10516	3,60962	0,05753
Temperatura máxima	1	0,23969	0,23969	8,22701	0,00415
Temperatura média	1	0,01997	0,01997	0,68536	0,40780
Vento	1	0,36373	0,36373	12,48468	0,00042
Longitude	1	0,876945	0,876945	30,099955	0,00000
Resíduos	3619	105,437464	0,029134	-	-

FONTE: O autor (2022).

Os parâmetros estimados para as variáveis do modelo de erros de medição de altura, erro padrão, valor- t e p -valor são apresentados na Tabela 13. É possível notar que duas das três variáveis de temperatura, assim como a insolação, vento e longitude foram estatisticamente significativos para nível de significância de 5%. É importante salientar que a temperatura máxima, vento e longitude apresentaram efeito negativo sob o erro de medição, enquanto as demais, efeito positivo.

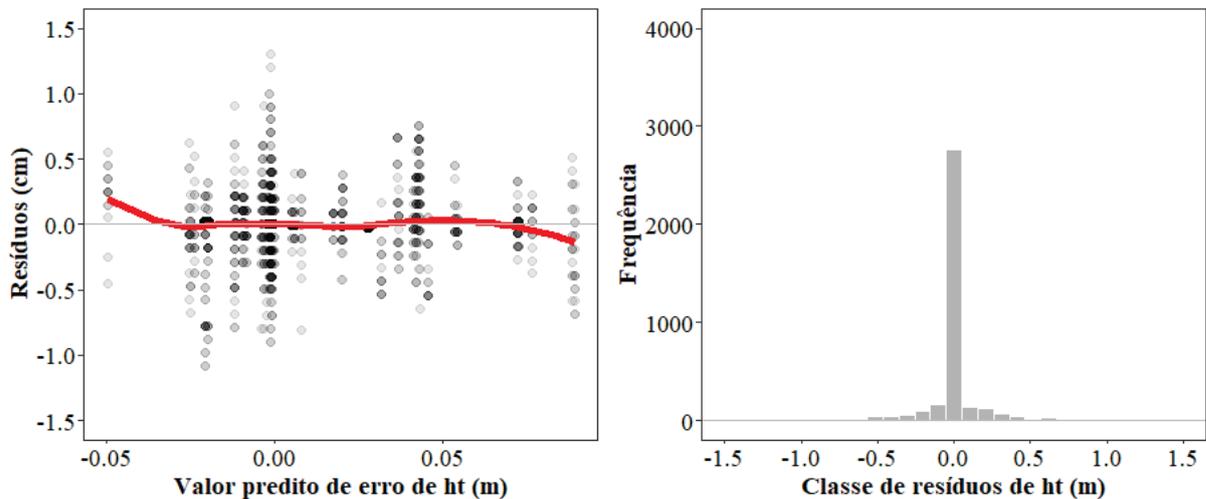
TABELA 13 - ESTATÍSTICAS RESULTANTES DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP., EM FUNÇÃO DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO

Variável	Parâmetro	Erro padrão	t-valor	P-valor
Intercepto	4,78460830	0,86794571	5,51256632	0,00000004
Insolação	0,00846565	0,00168431	5,02617718	0,00000052
T máxima	-0,02663541	0,00603699	-4,41203497	0,00001054
T média	0,02288540	0,00663610	3,44862049	0,00056989
Vento	-0,06007366	0,01029998	-5,83240767	0,00000001
Longitude	-0,00000055	0,00000010	-5,48634254	0,00000004

FONTE: O autor (2022).

Os gráficos de distribuição e histograma dos resíduos do modelo ajustado para estimativa dos erros de medição de altura em função das coordenadas e das variáveis do tempo são apresentados na Figura 22. Podemos notar que há uma leve tendência à subestimativa nos primeiros valores negativos, e uma leve superestimativa nos últimos valores positivos, todavia, os resíduos também foram distribuídos de forma homogênea para diferentes valores preditos de erros de medição. O histograma dos resíduos sugere uma distribuição unimodal, simétrica, com alta concentração de resíduos próximos de zero, assim como observado nos valores observados.

FIGURA 22 - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO E HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS DO MODELO AJUSTADO PARA ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA OBTIDOS POR MEIO DA CHECAGEM DE PARCELAS DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS SP.*, DAS COORDENADAS E VARIÁVEIS DO TEMPO



FONTE: O autor (2022).

5.6 DISCUSSÃO

Como pode ser observado nos histogramas de frequência dos erros de medições de cap e altura (Figura 15), existe uma tendência à normalidade dos dados, o que corrobora o que foi afirmado por diversos autores, no que diz respeito à boa qualidade dos dados coletados e ausência de tendências (GERTNER, 1991; GERTNER; KÖHL, 1992; MCROBERTS *et al.*, 1994; KANGAS, 1996; KANGAS, 1998; KANGAS; KANGAS, 1999; CANAVAN; HANN, 2004).

As variáveis do tempo apresentam associação, o que pode ser observado pelos valores de correlação na Figura 16 para os erros de medição de cap e, na Figura 17, para os erros de medição de altura. As associações entre coordenadas geográficas e variáveis do tempo são amplamente estudadas e utilizadas, inclusive para classificação do clima (ALVARES *et al.*, 2013).

Como pode ser observado nas estatísticas resultantes dos ajustes (Tabelas 11 e 13), enquanto para os erros de medição de cap, a latitude foi estatisticamente significativa, para os erros de medição de altura foi a longitude. Embora seja uma distância relativamente pequena, a variação no sentido da linha do equador implica no aumento da temperatura, sendo as temperaturas as variáveis de maior influência sobre os erros de medição de cap.

Por se tratar de uma medição indireta, quando comparada ao cap, a altura das árvores é uma variável de mais difícil obtenção e geralmente está relacionada à

precisão de um determinado hipsômetro (MCROBE RTS *et al.*, 1994, CASTAÑO-SANTAMARÍA *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2019, MAGNUSSEN; KLEINN; FEHRMANN, 2020), sendo esse o provável motivo dos resultados inferiores do ajuste do modelo com os erros de medição de altura como variável predita, em função das coordenadas e variáveis do tempo como preditoras, ou seja, o limite de erro do aparelho acaba reduzindo ainda mais a variabilidade dos dados.

Uma leve subestimativa associada aos menores valores de umidade relativa foi a única tendenciosidade observada nas medições dos valores de cap. Isso pode estar relacionado à casca da externa das árvores que, por ser um tecido já morto, sem mais função de transporte, mais poroso, fibroso e menos denso que a madeira, dessa forma, capaz de reter maior quantidade de água que a madeira (FOELKEL, 2006; MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2012).

Sendo assim, tais características proporcionam maior redução das dimensões em períodos mais secos, já que seu ponto de saturação das fibras é de aproximadamente 40% e 56% para as curvas de retração radial e tangencial, respectivamente (MEYER; KELLOGG; WARREN, 1981).

Tal comportamento já foi observado por Burgan (1971), na mensuração de diâmetros de *Eucalyptus robusta* em inventários florestais realizados na Reserva Florestal de Honolulu, Hawaii, Estados Unidos da América, nos quais o autor concluiu que havia diferenças estatisticamente significativas entre os diâmetros das árvores mensuradas em períodos de estiagem e húmidos.

É importante mencionar que as espécies apresentam diferenças morfológicas, sendo nesse caso as características de tronco e casca as de maior influência sobre os erros de medição de cap (FLORES *et al.*, 2016), dessa forma, dependendo da espécie e característica da casca, o efeito mencionado pode variar.

Embora as temperaturas máximas e mínimas tenham apresentado significância estatística, por se tratar de uma variável que leva em consideração a temperatura de todo o dia, inclusive as extremas, a temperatura média pode ser considerada a mais representativa e importante das variáveis de temperatura.

Levando em consideração os coeficientes do aço apresentados por Lingmei *et al.* (2019), mesmo em condições extremas (temperatura, força e dimensão dos caps), a dilatação térmica somada à deformação elástica das fitas não seria responsável pela significância estatística observada entre os erros de medição de cap e a temperatura média.

Nascimento *et al.* (2021), entre outros efeitos, observaram que o trabalho em ambientes florestais com altas temperaturas provocou a diminuição da atenção, concentração e capacidade de interpretar e executar tarefas simples. Já Kjellstrom *et al.* (2009) e Kjellstrom e Crowe (2011) mencionam diversos aspectos negativos relacionados a jornadas de trabalho sob condições ambientais atípicas, dentro os quais se destacam a diminuição da produtividade e comprometimento da saúde, devido à falta de adaptação fisiológica a condições extremas.

Dessa forma, é importante salientar que o cansaço pode influenciar a força exercida pelo medidor na fita ao redor do fuste, fazendo com que medições realizadas posteriormente apresentem valores inferiores aos dos obtidos no inventário, devido à frouxidão e incorreto posicionamento da fita. Além disso, de acordo Lingmei *et al.* (2019), uma fonte de erro comum na utilização de fitas métricas é o posicionamento incorreto do valor zero e o local de início da medição, sendo essa, outra fonte que pode ser influenciada pela fadiga.

Por outro lado, de acordo com Gurauskis *et al.* (2019), instrumentos de mensuração eletrônicos (como é o caso dos hipsômetros) podem ter sua precisão afetada por fontes externas de calor e radiação solar, devido à deformação termo elástica. Devido ao fato de possuir pequenos componentes de metais, a mensuração dos ângulos que resultaram na estimativa da altura das árvores pode ser afetada pelas altas temperaturas diárias, as quais podem ser somadas à temperatura corporal da mão do medidor.

Devido à relação com a temperatura do ambiente, enquanto o vento pode influenciar a temperatura corporal e, conseqüentemente, o conforto no momento das medições de cap, quando se trata da altura, ventos mais fortes provocam a movimentação do topo das árvores. Ao observar a inclinação do topo das árvores no momento da medição, a reação do medidor pode ser tentar estimar a real posição do topo, fazendo com que a altura total seja superestimada, sendo esse o provável motivo do sinal negativo da variável.

Outra variável provavelmente relacionada à visualização do topo das árvores e estatisticamente significativa é a insolação. Devido à alta correlação com a radiação solar (MEZEI *et al.*, 2019; CHUNG, 2020), além de dificultar a observação do topo das árvores pelo incômodo da visada, os períodos com maior insolação diária podem prolongar as jornadas de trabalho, fazendo com que algumas parcelas sejam mensuradas quando ainda é dia, mas a luz solar já incide em um nível inferior à linha

do dossel, diminuindo a visibilidade e capacidade de distinguir a copa de cada uma das árvores.

Além disso, as épocas de maior fotoperíodo proporcionam a oportunidade de realizar jornadas de trabalhos mais longas com o intuito de reduzir custos ou até mesmo finalizar uma determinada quantidade de medições antes do prazo estabelecido, o que pode gerar benefícios à equipe como remuneração ou dias de folga. Todavia, assim como no caso das temperaturas, longas jornadas de trabalho podem surtir o mesmo efeito prejudicial quanto ao cansaço e à qualidade das medições das alturas.

Além do efeito direto da temperatura sobre as equipes, é importante mencionar que em regiões tropicais como a do presente estudo e as onde foram desenvolvidos os estudos realizados por Theilade, Rutishauser e Poulsen (2015) e Silva *et al.* (2019), ainda existem efeitos indiretos, como a presença de insetos, como abelhas e pernilongos, e alta atividade de animais peçonhentos como cobras, aranhas e escorpiões, fatores que podem impactar ainda mais as equipes de medição.

Considerando o risco à saúde, acrescido do efeito psicológico de tais fatores, além de apresentar ótimos resultados, é possível afirmar que as equipes do presente estudo sofreram impactos específicos quando comparadas às de trabalhos realizados em florestas localizadas em regiões com climas mais amenos como os realizados nos estados de Michigan por McRoberts *et al.* (1994), Montana por Elzinga, Shearer e Elzinga (2005), Maine, New Hampshire, Pennsylvania e Ohio por Westfall e Patterson (2007) nos Estados Unidos da América, por Kitahara, Mizoue e Yoshida (2009) e Kitahara, Mizoue e Yoshida (2010) no Japão e Paudel, Beckschäfer e Kleinn (2021) no estado da Baixa Saxônia, Alemanha.

5.7 CONCLUSÃO

Embora se tenha comprovado a inexistência de tendências, os indicadores dos modelos ajustados não apresentaram qualidade suficiente para que os modelos fossem utilizados para estimativa de erros de medições com precisão satisfatória.

O modelo de erros de medição de cap teve como variáveis associadas as temperaturas média, máxima e mínima, assim como a velocidade do vento e a latitude,

enquanto o modelo de erros de medição de altura teve como variáveis associadas as temperaturas média, máxima, insolação, vento e longitude.

Para minimizar as influências negativas das variáveis do tempo é recomendado que as atividades relacionadas à mensuração das parcelas não sejam realizadas em períodos com temperaturas extremas, com alta incidência de ventos e com umidade relativa do ar muito baixa ou elevada, além disso, as jornadas de trabalho devem ser curtas, evitando períodos de baixa luminosidade, principalmente dentro dos povoamentos florestais.

5.8 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BURGAN, Robert E. Variations in diameter measurements of robusta Eucalyptus due to swelling and shrinking of bark. **Forest Service**, US Department of Agriculture, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1971.

CANAVAN, S. J.; HANN, D. W. The two-stage method for measurement error characterization. **Forest Science**, v. 50, n. 6, p. 743-756, 2004.

CASTAÑO-SANTAMARÍA, J. *et al.* Tree height prediction approaches for uneven-aged beech forests in northwestern Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 307, p. 63-73, 2013.

CHUNG, M. H. Estimating solar insolation and power generation of photovoltaic systems using previous day weather data. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, 2020.

ELZINGA, C.; SHEARER, R. C.; ELZINGA, G. Observer variation in tree diameter measurements. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 20, n. 2, p. 134-137, 2005.

FLORES, T. B. *et al.* **Eucalyptus no Brasil**: zoneamento climático e guia para identificação. Piracicaba: IPEF, 2016.

FOELKEL, C. Casca da árvore do eucalipto. **Eucalyptus Online Book**, 2006.

GERTNER, G. Z. Prediction bias and response surface curvature. **Forest Science**, v. 37, n. 3, p. 755-765, 1991.

GERTNER, G. Z.; KÖHL, M. An assessment of some nonsampling errors in a national survey using an error budget. **Forest Science**, v. 38, n. 3, p. 525-538, 1992.

GURAUSKIS, D. *et al.* Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 296, p. 145-154, 2019.

KANGAS, A. S. On the bias and variance in tree volume predictions due to model and measurement errors. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 11, n. 1-4, p. 281-290, 1996.

KANGAS, A. S. Effect of errors-in-variables on coefficients of a growth model and on prediction of growth. **Forest Ecology and Management**, v. 102, n. 2, p. 203-212, 1998.

KANGAS, A. S.; KANGAS, J. Optimization bias in forest management planning solutions due to errors in forest variables. **Silva Fennica**, v. 33, n. 4, p. 303-315, 1999.

KJELLSTROM, T. *et al.* The direct impact of climate change on regional labor productivity. **Archives of Environmental & Occupational Health**, v. 64, n. 4, p. 217-227, 2009.

KJELLSTROM, T.; CROWE, J. Climate change, workplace heat exposure, and occupational health and productivity in Central America. **International Journal of Occupational and Environmental Health**, v. 17, n. 3, p. 270-281, 2011.

KITAHARA, F.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Evaluation of data quality in Japanese national forest inventory. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 159, n. 1, p. 331-340, 2009.

KITAHARA, F.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements. **Silva Fennica**, v. 44, n. 4, p. 657-667, 2010.

LINGMEI, L. *et al.* In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT & INSTRUMENTS (ICEMI), 14., 2019. **Proceedings... IEEE**, 2019. p. 132-137.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV. Verlagsgesellschaft, 1973. v. 2 p. 469.

MAGNUSSEN, S.; KLEINN, C.; FEHRMANN, L. Wood volume errors from measured and predicted heights. **European Journal of Forest Research**, p. 1-10, 2020.

MÄKINEN, A.; KANGAS, A.; MEHTÄTALO, L. Correlations, distributions, and trends in forest inventory errors and their effects on forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 7, p. 1386-1396, 2010.

MCROBERTS, R. E. *et al.* Variation in forest inventory field measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 24, n. 9, p. 1766- 1770, 1994.

MEYER, R. W.; KELLOGG, R. M.; WARREN, W. G. Relative density, equilibrium moisture content, and dimensional stability of western hemlock bark. **Wood and Fiber Science**, v. 13, n. 2, p. 86-96, 1981.

MEZEI, P. *et al.* Potential solar radiation as a driver for bark beetle infestation on a landscape scale. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 604, 2019.

MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Incorporation of bark and tops in *Eucalyptus globulus* wood pulping. **Bioresources**, v. 7, n. 3, p. 4350-4361, 2012.

NASCIMENTO, K. A. *et al.* Environmental Thermal Conditions Related to Performance, Dynamics and Safety of Logging in the Brazilian Amazon. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 42, n. 3, p. 419-435, 2021.

OMULE, S. A. Y. Personal bias in forest measurements. **The Forestry Chronicle**, v. 56, n. 5, p. 222-224, 1980.

PAUDEL, P.; BECKSCHÄFER, P.; KLEINN, C. Impact of training on different observers in forest inventory. **Banko Janakari**, v. 31, n. 1, p. 12-22, 2021.

PUKKALA, T. Multiple risks in multi-objective forest planning: integration and importance. **Forest Ecology and Management**, v. 111, n. 2, p. 265-284, 1998.

PUKKALA, T. Multi-objective forest planning. **Springer Science & Business Media**, 2013.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020.

RABINOVICH, S. G. Measurement errors and uncertainties: theory and practice. **Springer Science & Business Media**, 2006.

SILVA, S. A. *et al.* A. Methodology for the assessment of aspects and qualitative data in forest inventory audit. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 453-459, 2018.

SILVA, S. A. *et al.* Ferramentas estatísticas para auditoria de inventários florestais em povoamentos de *Eucalyptus spp.* **Scientia Forestalis**, n. 121, p. 59-70, 2019.

THEILADE, I.; RUTISHAUSER, E.; POULSEN, M. K. Community assessment of tropical tree biomass: challenges and opportunities for REDD+. **Carbon Balance and Management**, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2015.

TRAN, P. H.; TRAN, K. P.; RAKITZIS, A. A synthetic median control chart for monitoring the process mean with measurement errors. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 35, n. 4, p. 1100-1116, 2019.

WESTFALL, J. A.; PATTERSON, P. L. Measurement variability error for estimates of volume change. **Canadian journal of forest research**, v. 37, n. 11, p. 2201-2210, 2007.

WICKHAM, H. **Ggplot2**. Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag New York, 2016.

6 UM PROGRAMA DE CONTROLE DA QUALIDADE PARA INVENTÁRIOS EM PLANTAIOS FLORESTAIS E SUA RELAÇÃO COM ERROS DE MEDIÇÕES³

6.1 RESUMO

A satisfação dos clientes é uma das mais importantes características relacionadas à qualidade de um determinado serviço. Considerando que o inventário florestal é a principal fonte primária de informações quantitativas e qualitativas dos recursos florestais, pode se dizer que no setor florestal poucas atividades possuem tamanha quantidade de clientes. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi desenvolver e aplicar um programa de controle da qualidade ao processo de coleta de dados de inventários florestais com o intuito de atingir a melhoria contínua. Com destaque para as cartas de controle que possibilitaram a realização de uma análise detalhada do comportamento, intensidade e características dos erros de medições, as ferramentas da qualidade utilizadas se mostraram eficazes no que diz respeito à identificação das fontes e priorização dos erros de medições, elaboração e implementação de ações mitigatórias para melhoria contínua do processo de coleta de dados do inventário florestal. Sendo assim, com as devidas adaptações, um programa de garantia da qualidade pode ser desenvolvido e aplicado aos processos de inventários florestais.

Palavras-chave: Erros-não amostrais. Acuracidade. Propagação.

6.2 ABSTRACT

Customer satisfaction is one of the most important characteristics related to the quality of a particular service. Considering that forest inventories are the main primary sources of quantitative and qualitative information on forest resources, it can be said that few activities in the forest sector have such a large number of clients. Thus, the objective of this study was to develop and apply a quality control program to the data collection process from forest inventories to achieve continuous improvement.

³ A QUALITY CONTROL PROGRAM FOR INVENTORIES IN FOREST PLANTATIONS AND ITS RELATIONSHIP WITH MEASUREMENT ERRORS.

With an emphasis on the control charts which enabled carrying out a detailed analysis of the behavior, intensity and characteristics of measurement errors, the quality tools used proved to be effective regarding identification of sources and prioritizing measurement errors, as well as preparing and implementing mitigation actions for continuous improvement of the forest inventory data collection process. Therefore, with the necessary adaptations, a quality assurance program can be developed and applied to forest inventory processes.

Keywords: Non-sampling errors. Accuracy. Propagation.

6.3 INTRODUÇÃO

A definição de qualidade é subjetiva e dinâmica, dessa maneira, apresenta variações até mesmo entre autoridades no assunto (GOETSCH; DAVIS, 2014). De forma resumida, é comum que a maioria das definições de qualidade estejam relacionadas às características de bens e serviços, esperados e perceptíveis aos seus respectivos consumidores, uniformidade, adequação ao uso, ausência de erros e retrabalho (JURAN; DE FEO, 2010; GOETSCH; DAVIS, 2014).

Devido à alta competição dos mercados consumidores, muitas vezes exigente de certificações, compreender e melhorar a qualidade é fundamental para o sucesso, crescimento e aumento da competitividade dos negócios. Sendo assim, a melhoria da qualidade deve alcançar todos os níveis organizacionais e stakeholders, a fim de, principalmente satisfazer as necessidades dos clientes (GOETSCH; DAVIS, 2014; MONTGOMERY, 2020).

A indústria florestal apresenta características específicas no que se refere à matéria-prima. Além da heterogeneidade, a madeira sofre transformações ao longo dos processos na cadeia produtiva, ou seja, as árvores são divididas em muitos produtos com diferentes finalidades. Essas particularidades tornam o planejamento e controle da produção florestal uma tarefa complexa, visto que as informações sobre a disponibilidade, qualidade da oferta, produção e demanda ao longo de toda a cadeia de abastecimento são fundamentais para sustentabilidade da produção (FRAYRET *et al.*, 2008).

O inventário florestal é a principal fonte primária de informações quantitativas e qualitativas dos recursos florestais (KERSHAW JR *et al.*, 2016; LIN *et al.*, 2020).

Devido à enumeração completa ser quase sempre inviável, técnicas de amostragem e modelagem são largamente utilizadas para a estimativa das variáveis de interesse como volume, biomassa e carbono (MCROBERTS; WESTFALL, 2016).

Assim, tendo em vista que processos organizacionais subsequentes, dependentes dos anteriores são considerados clientes internos daqueles (JURAN; DE FEO, 2010; GOETSCH; DAVIS, 2014), pode se dizer que no setor florestal poucas atividades possuem tamanha quantidade de clientes como o inventário no setor florestal.

Embora a baixa qualidade da coleta de dados esteja estreitamente relacionada à imprecisão e tendenciosidade na medição das variáveis dendrométricas, variáveis e aspectos qualitativos relacionados à instalação das parcelas e procedimentos de medição também podem afetar seriamente os resultados de inventários florestais e não devem ser ignorados (SILVA *et al.*, 2018).

Quaisquer estimativas de inventário florestal estão sujeitas a três principais fontes de erros (incertezas); erro do processo de amostragem; erro do método estimativo e erro de medição (CUNIA, 1965). Geralmente, é dada pouca ou nenhuma atenção aos erros de medições, sendo comum a suposição de que não existem (GERTNER, 1990).

Considerando que a maior parte das atividades de campo de um inventário florestal se resume a medições das dimensões de árvores e dos povoamentos florestais, negligenciar os erros de medições pode prejudicar os processos estimativos e, conseqüentemente, todo o planejamento da produção florestal.

Sendo assim, estimativas eventualmente imprecisas e tendenciosas podem causar perdas econômicas decorrentes de negociações desvantajosas, situações de sobra ou falta de madeira na indústria (SILVA *et al.*, 2019), ou até mesmo pela não otimização de atividades como por exemplo a de colheita (KANGAS; KANGAS, 1999; MÄKINEN; KANGAS; MEHTÄTALO, 2010).

Em vista disso, diversos estudos sobre avaliação da qualidade de coleta de dados em inventários florestais foram desenvolvidos ao longo dos anos (GERTNER; KÖHL, 1992; POLLARD *et al.*, 2006; GASPARINI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019). Todavia, embora apresentem grande utilidade para definição de estratégias de mitigação e prevenção de erros de medições, ferramentas e métodos

específicos de gestão da qualidade raramente foram utilizados ao ponto de configurar um programa de controle da qualidade.

Os métodos e ferramentas técnicas para controle e melhoria da qualidade podem ser aplicados a qualquer área dentro de uma organização. Utilizados para definir, mensurar, analisar e propor soluções aos problemas que interferem no desempenho de processos, quando utilizados de forma racional e eficiente, podem ser fundamentais para o alcance da melhoria contínua (MONTGOMERY, 2020).

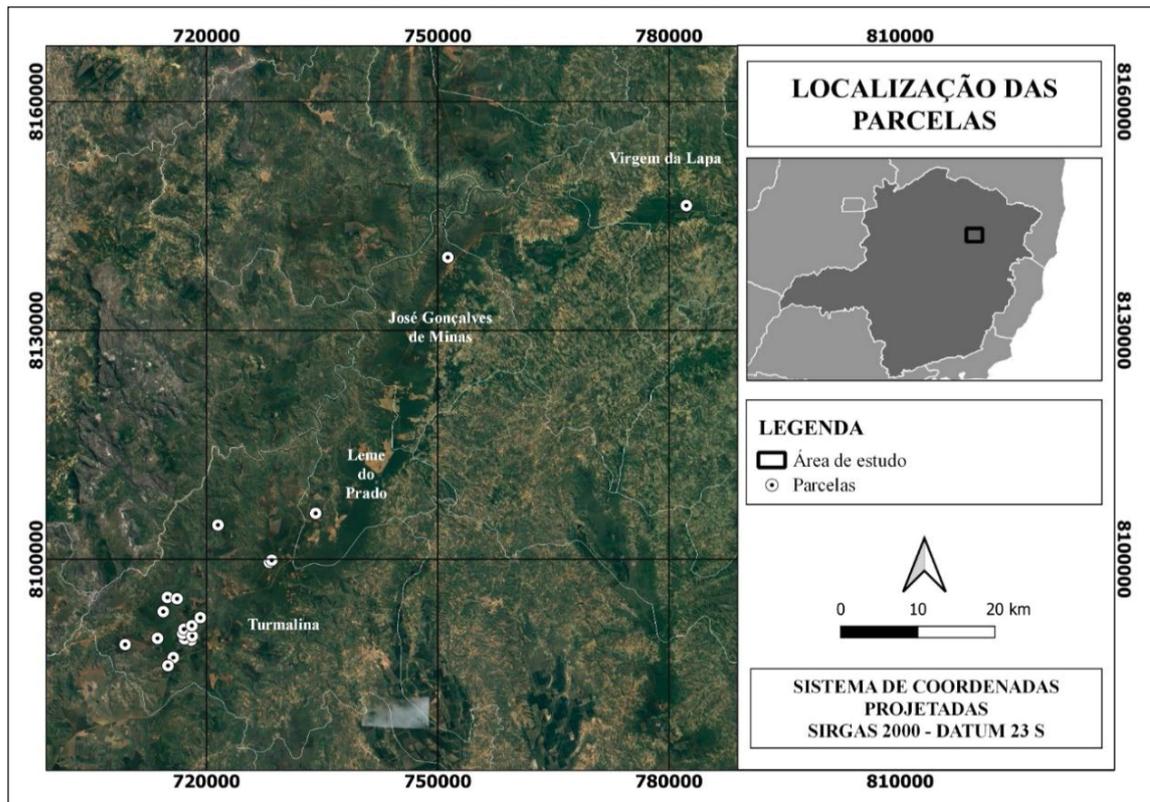
Entretanto, atividades diretamente ligadas aos povoamentos florestais, como o processo de inventário florestal, podem ser consideradas de difícil adequação aos padrões de qualidade, o que as tornam um desafio à gestão da qualidade em organizações florestais e, conseqüentemente, aos processos de certificação. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi desenvolver e aplicar um programa de controle da qualidade ao processo de coleta de dados de inventários florestais com o intuito de atingir a melhoria contínua.

6.4 MATERIAIS E MÉTODOS

6.4.1 Área de estudo

O inventário florestal alvo do processo de controle estatística da qualidade foi realizado em aproximadamente 2000 hectares de plantios de *Eucalyptus* sp localizados no Vale do Jequitinhonha, região Norte do estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 19). Estabelecidos em terreno plano e com idades variando entre 9 e 11 anos, a dimensão inicial do espaçamento dos plantios foi de 3 x 3 m. A uma altitude de aproximadamente 720 metros, segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, com precipitação média anual de 1000 mm e temperatura média de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

FIGURA 23 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, VALE DO JEQUITINHONHA, REGIÃO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS



FONTE: O autor (2022).

6.4.2 Inventário florestal, procedimentos de coleta de dados e protocolo de medição

O processo de amostragem utilizado foi o sistemático, com intensidade amostral de 0,5%. As parcelas instaladas são permanentes, de forma circular com área de aproximadamente 500 m² (raio de 12,62 m), as quais foram distribuídas conforme um grid amostral de 1 parcela para cada 10 hectares de plantio.

Após a coleta das coordenadas UTM do ponto central (latitude e longitude) com aparelho GPS Garmin eTrex® 30, em cada parcela foram mensuradas as circunferências dos fustes à altura do peito, 1,3 m de altura (cap) de todas as árvores utilizando baliza e fita métrica de aço (modelo Lufkin W606PM) e, os valores de altura total das 7 primeiras árvores da primeira linha, das 3 árvores com os menores valores de cap, das 5 árvores com os maiores valores de cap e, das árvores mortas, quebradas e com ponta seca, com o uso do clinômetro digital (modelo ECII – D Haglöf).

6.4.3 Modelagem estatística

Para estimativa das alturas do restante das árvores da parcela, foi ajustado um modelo de relação altura-diâmetro para a estimativa da altura das árvores da checagem e do inventário, Equação (9).

$$ht = \beta_0 + \beta_1 \cdot idade_i + \beta_2 \cdot dap_i + \beta_3 \cdot dap_i^2 + \varepsilon_i \quad (9)$$

Onde i são as variáveis de cada árvore, ε_i é o resíduo aleatório e β_s são os parâmetros estimados. Para o ajuste proveniente dos dados da checagem o β_0 é -6,167076, β_1 é 1,067371, β_2 é 2,032898 e β_3 é -0,033531, enquanto para o ajuste proveniente dos dados do inventário, β_0 é -6,048333, β_1 é 1,055669, β_2 é 2,032868 e β_3 é -0,033408. Os ajustes apresentaram coeficientes de determinação ajustados R^2 de 0,7576 e 0,7594 e erros padrão da estimativa (S_{yx}) de 3,2036 e 3,2004 m.

Os volumes individuais das árvores foram estimados por meio de um modelo de dupla entrada, Equação (10).

$$v = \beta_0 \cdot dap_i^{\beta_1} \cdot ht^{\beta_2} + \varepsilon, \quad (10)$$

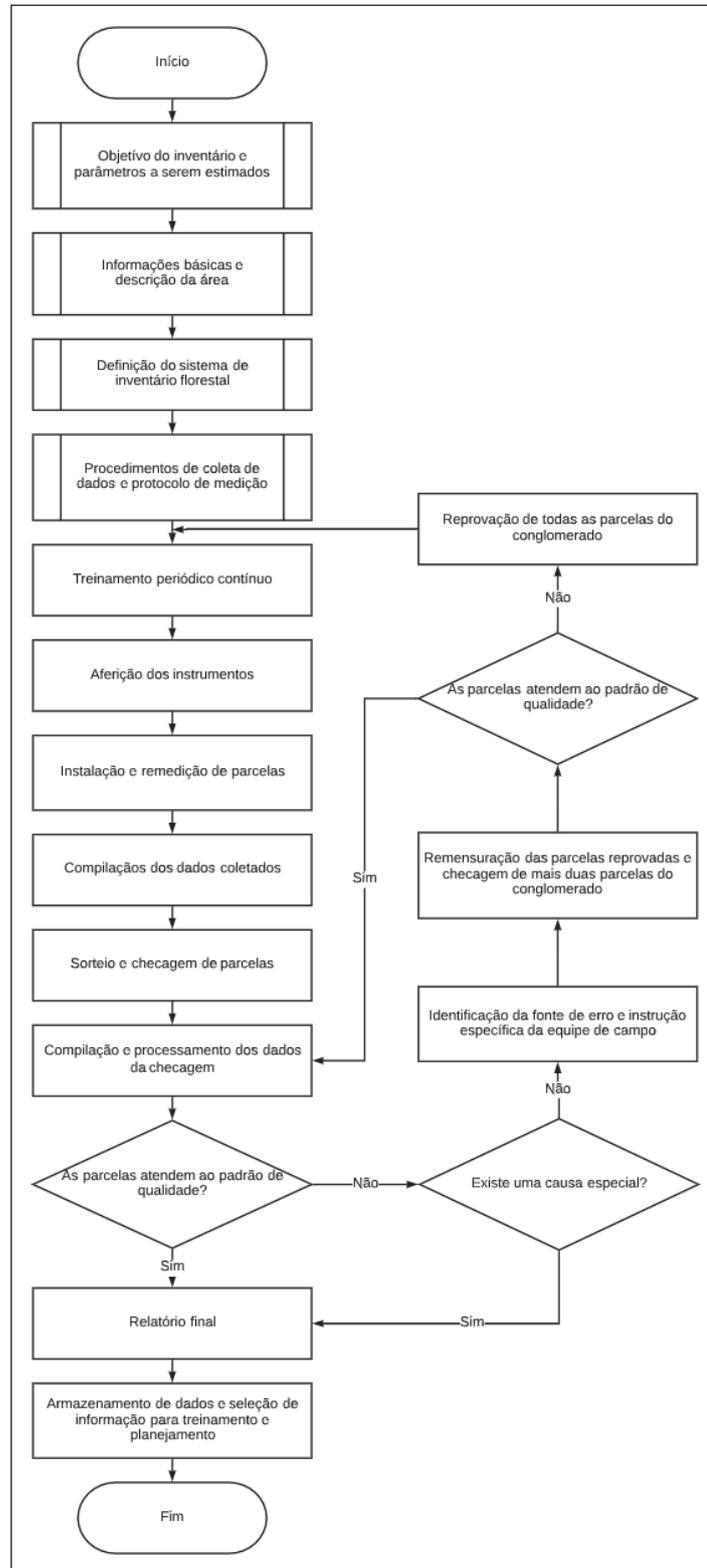
Onde β_0 é 3,55E-05, β_1 é 1,670160 e β_2 é 1,312760. O ajuste apresentou coeficiente de determinação R^2 de 0,9610 e erro padrão da estimativa (S_{yx}) de 0,0206 m³.

6.4.4 Programa de controle da qualidade

Visando a melhoria contínua do processo de coleta de dados, o programa de controle da qualidade desenvolvido apresenta etapas adicionais ao processo de inventário florestal tradicional. Como pode ser observado no fluxograma reestruturado do processo de inventário florestal (Figura 24), o programa contempla as etapas de gerenciamento do ciclo PDCA (Plan, Do, Check and Act).

Como a maioria das fontes são de difícil identificação e controle, entende-se que prevenção é melhor forma de mitigação dos erros de medições. Desta maneira, no desenvolvimento do programa, foi dada prioridade à criação de etapas com o intuito de prevenir a ocorrência tendenciosidade e imprecisão nas medições das variáveis dendrométricas.

FIGURA 24 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE INVENTÁRIO FLORESTAL COM ETAPAS DO PROGRAMA DE CONTROLE DA QUALIDADE



FONTE: O autor (2022).

6.4.5 Treinamentos e instruções

Os treinamentos periódicos tiveram como principal objetivo a capacitação das equipes de campo e reforço da padronização dos procedimentos e protocolos. As instruções específicas deveriam possuir caráter extraordinário, ocorrendo apenas em casos de reprovação da medição das parcelas por não atenderem ao padrão de qualidade, nos quais, além das informações da provável fonte de erro, também seria realizado um treinamento específico.

6.4.6 Aferição de instrumentos

Para prevenir erros sistemáticos e acidentais de maiores magnitudes, a etapa de aferição dos instrumentos utilizados foi acrescentada ao processo de inventário florestal, assim todos os instrumentos fora da especificação e limite de tolerância foram substituídos antes da coleta dos dados (Tabela 14).

TABELA 14 - LIMITES DE TOLERÂNCIA E FREQUÊNCIA DE AFERIÇÃO DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS NOS PROCEDIMENTOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL

Instrumento	Emprego	Tolerância	Frequência
Fita métrica	Medição do cap	± 00,1 cm	Diariamente
Hipsômetro	Medição da altura	± 50,0 cm	Semanalmente
Trena	Distâncias e raio da parcela	± 10,0 cm	Semanalmente
Baliza	Delimitação da altura do cap	± 00,1 cm	Semanalmente

FONTE: O autor (2022).

Tendo como referência unidades novas e idênticas (marca e modelo), as fitas métricas de aço usadas para medição do cap, assim como as trenas de fibra de vidro de 30 m usadas para medir as distâncias e determinar a dimensão (raio) da parcela foram respectivamente aferidas diariamente e semanalmente e, deviam ser inteiras, sem emendas, com a numeração da escala visível e subdividida em milímetros.

Os clinômetros foram aferidos semanalmente junto a atividades de cubagem de árvores, assim foram utilizadas no mínimo 3 árvores de diferentes classes de alturas, das quais, depois de estimadas as alturas com os aparelhos, foram abatidas e, tiveram as alturas medidas diretamente com trenas.

As balizas utilizadas para delimitação da altura do peito na medição do cap e assim evitar medições em alturas e posições incorretas deviam possuir 1,30 m de altura. A aferição delas foi realizada semanalmente com o auxílio de uma trena ou fita métrica nova.

6.4.7 Checagem das parcelas

Com o intuito de obter maior controle sobre a coleta de dados e viabilizar o programa de garantia da qualidade, o inventário foi realizado em aglomerados de 20 unidades amostrais que deveriam ser mensuradas em sequência, todas identificadas com relação à equipe, talhão e data de medição. Ainda, para que a checagem fosse realizada a nível de árvores, foram adotados procedimentos como a enumeração das linhas, das covas de plantio e dos fustes das árvores.

A checagem do inventário florestal foi realizada por uma equipe qualificada, seguindo exatamente os mesmos métodos e, utilizando os mesmos instrumentos do inventário florestal, dentro do prazo de 7 dias, para que não houvesse diferença entre as medições devido ao desenvolvimento dos indivíduos. Para o presente estudo, foram sorteadas e remeidas 20, de um total de 400 parcelas, o equivalente a 5%. Nessas parcelas, foram realizadas remedições completas, com acesso aos dados das medições realizadas no inventário (Checagem fria).

6.4.8 Folha de verificação

A folha de verificação desenvolvida para a checagem das parcelas contava com a verificação dos seguintes itens de controle: a) Diferença das distâncias da alocação das parcelas no campo em relação à coordenada definida pela amostragem sistemática; b) Diferença na numeração das linhas de medição; c) Diferenças nos números de árvores da parcela; d) Diferenças na classificação da qualidade dos fustes das árvores; d) Diferenças nas medições dos valores de cap e alturas.

6.4.9 Diagrama de Pareto

O princípio de Pareto afirma que, para muitos eventos, aproximadamente 80% dos efeitos vêm de 20% das causas. O gráfico de Pareto é simplesmente uma distribuição de frequência de dados de atributos organizados por categoria, pela qual é possível identificar os custos da qualidade por categoria, ou por produto, ou por tipo de defeito ou não conformidade (JURAN; DE FEO, 2010; MONTGOMERY, 2020).

Devido à diversidade de erros que podem ocorrer nas medições dos inventários florestais, o diagrama de Pareto foi utilizado com a finalidade de classificá-los em ordem de importância e assim poder direcionar os esforços de controle e mitigação.

Para o uso de tal ferramenta foram considerados erros possíveis de ocorrerem na instalação e medição das árvores. Devido à característica da ferramenta, os erros apresentados em unidades contínuas foram discretizados e considerada a quantidade de ocorrências de cada tipo de erro, apresentados a seguir:

- parcelas alocadas com mais de 15 metros de distância da coordenada definida;
- diferenças nas linhas de plantio da parcela;
- diferenças nos números de árvores da parcela;
- erros na classificação da qualidade dos fustes;
- erros de medições de alturas acima ou igual a 0,5 m;
- erros de medições de valores de cap acima ou igual a 0,5 cm.

6.4.10 Diagrama de causa-efeito

Uma vez que um defeito, erro ou problema tenha sido identificado e selecionado para estudo específico, as causas potenciais desse problema devem ser analisadas. Assim, o diagrama de causa-efeito é uma ferramenta útil para desvendar as causas potenciais, quando essas não são óbvias (JURAN; DE FEO, 2010; MONTGOMERY, 2020).

Para representar a relação entre os erros de medições e suas diversas possíveis causas (fontes), a ferramenta diagrama de causa-efeito foi adaptada para o caso estudado. Como causas-raízes foram utilizados elementos relacionados aos instrumentos de medição, gerenciamento das atividades do inventário florestal, procedimentos de mensuração por parte da equipe de campo e elementos intrínsecos ao povoamento florestal mensurado.

6.4.11 Análise descritiva dos dados

Após a definição dos principais problemas pelo Diagrama de Pareto, foi realizada uma análise descritiva dos dados de erros de medições das variáveis cap e altura. Dentre as ferramentas estatísticas utilizadas também foram incluídos histogramas para identificação da distribuição dos dados e, diagramas de dispersão para a verificação da existência de correlação entre os erros de medições as variáveis mensuradas.

6.4.12 Cartas de controle

As cartas de controle são gráficos utilizados para o acompanhamento de processos, seu objetivo é verificar se um determinado processo está operando em estado de controle estatístico e, caso não esteja, dar sinais da presença de causas especiais de variação para que medidas corretivas possam ser aplicadas. Além disso, também podem apresentar informações para que sejam tomadas ações gerenciais de melhoria dos processos (ATALAY *et al.*, 2020; MONTGOMERY, 2020).

Considerando as parcelas como unidades amostrais e cada erro de medição uma observação, a construção das cartas de controle foi realizada para o controle das medições das variáveis cap e altura total (Equação 3) e aplicada ao nível de parcela. Para isso, os valores das medições da checagem foram tomados como verdadeiros.

$$\hat{\epsilon}_i = y_i - \hat{y}_i \quad (3)$$

Onde $\hat{\epsilon}_i$ é o erro de cada medição, y_i é a i -ésima medição obtida na checagem e \hat{y}_i a i -ésima medição obtida no inventário. A carta de controle multivariada foi utilizada antes da univariada, apenas para o controle das medições das árvores que tiveram as variáveis cap e altura mensuradas. As cartas por variáveis (univariadas) deveriam ser utilizadas apenas em decorrência da observação de anormalidades nas cartas multivariadas e foram confeccionadas com todas as medições realizadas na parcela. Além de cap e altura, apenas para fins de monitoramento do comportamento, também foram confeccionadas cartas univariadas para os erros de volume.

6.4.13 Carta de controle multivariada (Carta T^2 de Hotelling)

Em situações em que duas ou mais características de qualidade são relacionadas, como é o caso das variáveis cap (posteriormente dap), altura e volume, o controle ou monitoramento de modo independente pode acarretar interpretações enganosas, então, faz-se necessário o controle das características de forma simultânea. Análoga à carta de controle univariada \bar{x} de Shewhart, a carta de controle T^2 de Hotelling é um dos procedimentos de controle multivariados mais utilizados, sendo assim, o teste estatístico T^2 é baseado na Equação 4 (Montgomery, 2020):

$$T^2 = n(\bar{X} - \bar{\bar{X}})' S^{-1} (\bar{X} - \bar{\bar{X}}) \quad (4)$$

Onde \bar{X} corresponde ao vetor das médias e S representa a matriz de covariância do processo. A versão da carta de controle T^2 de *Hotelling* utilizada foi para dados subgrupados e seu uso possui duas fases distintas. A primeira fase tem como objetivo estabelecer os limites de controle, sendo o limite inferior de controle (LIS) igual a zero e o limite superior de controle (LSC) dado pela Equação 5:

$$Fase I LSC = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha, p, mn-m-p+1} \quad (5)$$

A segunda fase tem como objetivo monitorar as futuras checagens. O limite inferior de controle da segunda fase é igual a zero e o limite superior de controle é dado pela Equação 6:

$$Fase II LSC = \frac{p(m+1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha, p, mn-m-p+1} \quad (6)$$

Onde p é o número de variáveis, m é o número de amostras, n é o tamanho da amostra e, F é igual a distribuição F de Snedecor com um grau de liberdade para o numerador igual a p e para um denominador igual a $p, mn - m - p + 1$. É importante relatar que pelo caráter de implantação da metodologia apenas a fase I foi executada no presente estudo.

6.4.14 Cartas de controle univariadas (cartas de Shewhart)

Considerando cada parcela como unidade amostral e cada erro de medição como observação, devido ao tamanho da unidade amostral ser variável e considerado moderadamente grande, o controle por variáveis foi realizado por meio de cartas de controle \bar{x} e S . O desvio padrão amostral s é um estimador tendencioso para o desvio padrão da população σ , dessa forma, de acordo com Montgomery (2020) seu valor pode ser dado pela Equação 7:

$$E(s) = \left(\frac{2}{n-1}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left[\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]} \sigma = c_4 \sigma \quad (7)$$

Onde Γ é a função Gamma, portanto, o estimador não tendencioso para o desvio padrão é dado pela Equação 8:

$$\hat{\sigma} = \frac{S}{c_4} \quad (8)$$

Para a definição dos limites de controle superior, central (LC) e inferior do gráfico de controle \bar{x} foram utilizadas as Equações 9, 10 e 11:

$$LSC = \mu\bar{X} + 3 \frac{\hat{\sigma}_{\bar{X}}}{\sqrt{n}} = \bar{X} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}} = \bar{X} + 3 \frac{3}{\underbrace{c_4 \sqrt{n}}_{A_3}} \bar{S} \Rightarrow UCP = \bar{X} + A_3 \bar{S} \quad (9)$$

$$LC = \bar{X} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_m}{m} \quad (10)$$

$$LIC = \mu\bar{X} - 3 \frac{\hat{\sigma}_{\bar{X}}}{\sqrt{n}} = \bar{X} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}} = \bar{X} - 3 \frac{3}{\underbrace{c_4 \sqrt{n}}_{A_3}} \bar{S} \Rightarrow LCL = \bar{X} - A_3 \bar{S} \quad (11)$$

Para a definição dos limites de controle superior, central e inferior do gráfico de controle s foram utilizadas as Equações 12, 13 e 14:

$$LSC = \bar{S} + 3 \hat{\sigma}_S = \bar{S} + 3 \frac{\bar{S} \sqrt{1 - c_4^2}}{c_4} = \bar{S} \left(1 + \frac{3}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2} \right) \Rightarrow UCP = B_4 \bar{S} \quad (12)$$

$$LC = \bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i \quad (13)$$

$$LIC = \bar{S} - 3 \hat{\sigma}_S = \bar{S} - 3 \frac{\bar{S} \sqrt{1 - c_4^2}}{c_4} = \bar{S} \left(1 - \frac{3}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2} \right) \Rightarrow LCL = B_3 \bar{S} \quad (14)$$

Onde \bar{X} corresponde à média das médias das unidades amostrais e \bar{S} corresponde ao desvio padrão médio das unidades amostrais. Devido à variação do tamanho da unidade amostras, as constantes A_3 , B_3 e B_4 e, conseqüentemente, os limites superiores e inferiores variaram de acordo com tamanho da unidade amostral de cada subgrupo.

6.4.15 Padrão de qualidade

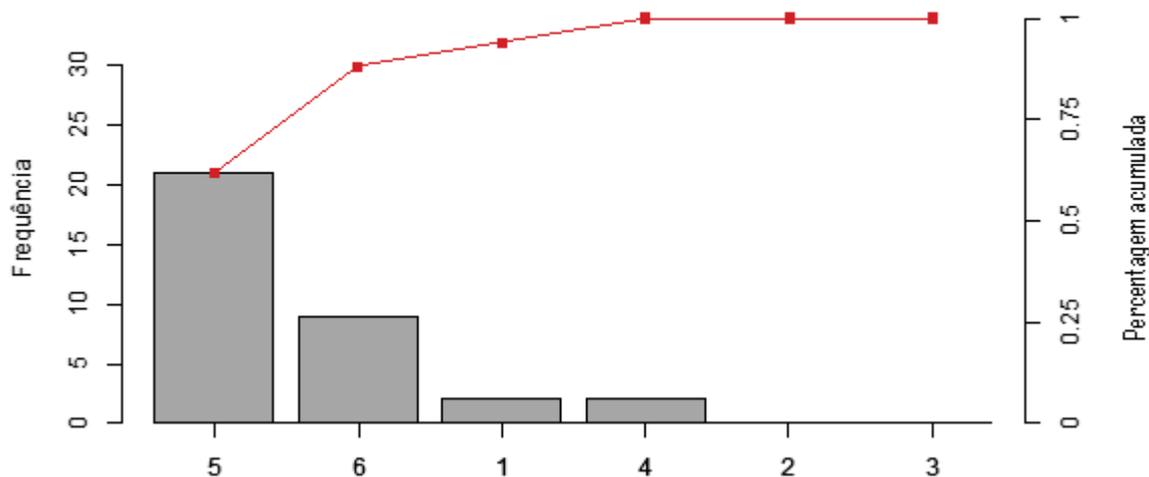
O padrão de qualidade dos dados coletados foi baseado na precisão e na não tendenciosidade. Dessa forma, o padrão de qualidade aceitável implicou na alocação das parcelas a uma distância menor que 30 metros das coordenadas definidas, ausência de diferenças entre os números linhas de plantio e número de árvores das parcelas. No que se refere aos erros de medições, as cartas de controle deveriam estar sob controle. Caso apontassem que o processo estava fora de controle, o padrão de qualidade seria aceitável, se não fosse possível identificar causas especiais para tal.

As parcelas que não atendessem ao padrão de qualidade seriam reprovadas. Com a reprovação de uma parcela, as informações destinadas ao processamento do inventário seriam provenientes da checagem, mais duas parcelas do conglomerado deveriam ser checadas e, se essas não atendessem ao padrão de qualidade, todo o conglomerado deveria ser remediado.

6.5 RESULTADOS

Em conformidade com o gráfico de Pareto (Figura 25), os erros de medições de altura e cap (erros do tipo 5 e 6 respectivamente), representaram 88 % das ocorrências, fazendo com que devessem ser priorizados em relação aos demais. Embora os erros de medições de cap acima da tolerância tenham apresentado maior frequência absoluta, os erros de medição de altura apresentaram maior frequência relativa (respectivamente 2,88 % e 1,97% do total de medições).

FIGURA 25 - GRÁFICO DE PARETO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE ERROS OBSERVADOS NAS PARCELAS DO INVENTÁRIO FLORESTAL



FONTE: O autor (2022).

Tendo em conta o resultado obtido pelo gráfico de Pareto, os erros de medições foram priorizados e submetidos a uma análise estatística descritiva. Na Tabela 15 é apresentada a estatística descritiva das variáveis dendrométricas cap, altura (mensuradas na checagem) volume (estimado) e erros de medições.

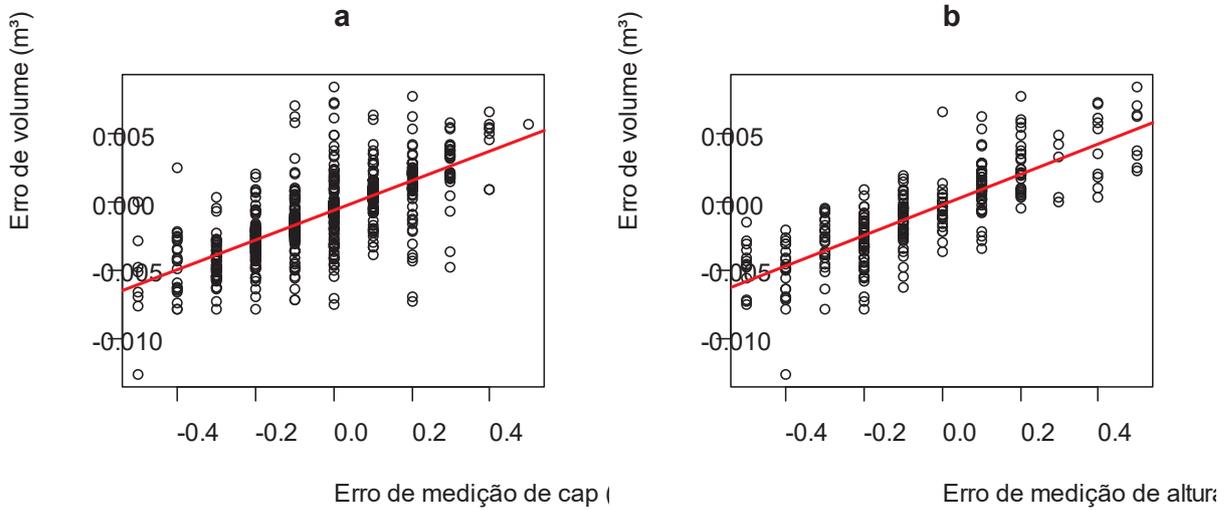
TABELA 15 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS CAP, ALTURA E VOLUME E DOS ERROS DE MEDIÇÕES

Variável	n	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Variância	DP	
Cap	1067	48,3037	72,9000	11,2000	49,1000	100,6101	10,0305	
Erro	cm	1067	-0,0220	0,5000	-0,5000	0,0000	0,0236	0,1536
Altura	313	25,6482	37,6000	1,9000	27,2000	42,8874	6,5489	
Erro	m	313	-0,0610	0,5000	-0,5000	-0,1000	0,0520	0,2280
Volume	1067	0,2698	0,7860	0,0038	0,2603	0,0222	0,1489	
Erro	m ³	1067	-0,0008	0,0085	-0,0127	-0,0007	0,0001	0,0024

Onde: n = número de observações; DP = desvio padrão; CV (%) = coeficiente de variação.
FONTE: O autor (2022).

Não foram observados coeficientes de correlação de Pearson (R) significativos entre as variáveis dendrométricas e seus respectivos erros de medições e entre os erros de medições de cap e altura. Todavia, foram observados coeficientes significativos ($p\text{-value} < 0,01$) e forte correlação positiva entre os erros de medições de cap e erros de volume ($R = 0,7044$) e erros de medições de altura e erros de volume ($R = 0,8054$). A dispersão dos dados com linha de tendência decorrente do ajuste de modelo linear simples pode ser observada na Figura 26.

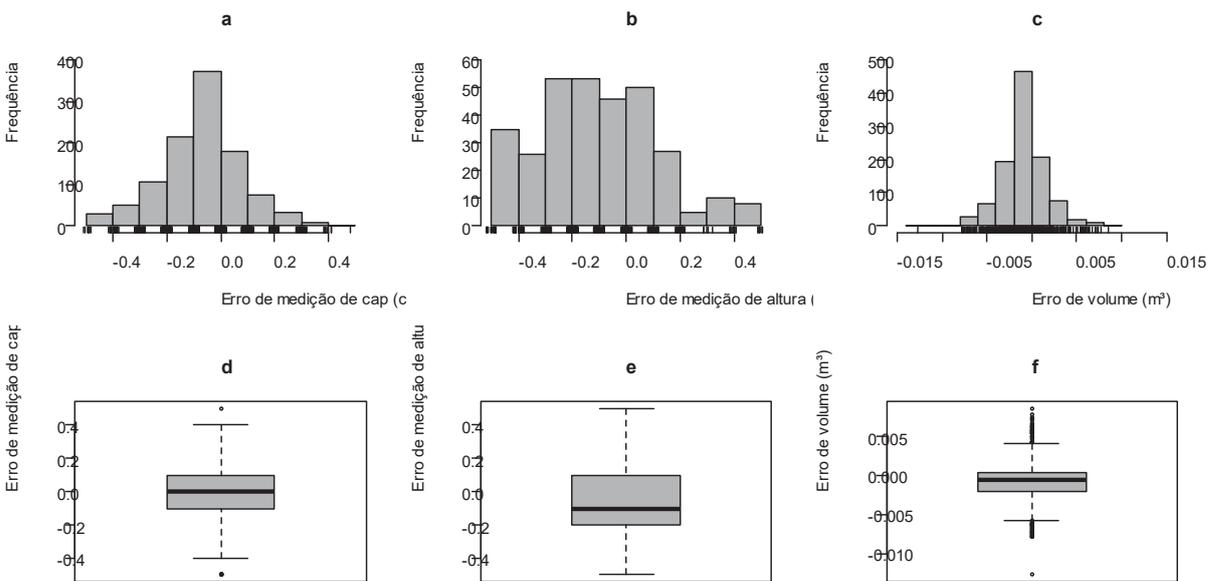
FIGURA 26 - GRÁFICOS DE DISPERSÃO DOS ERROS DE VOLUME EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP (A) E ALTURA (B) COM SUAS RESPECTIVAS LINHAS DE TENDÊNCIA



FONTE: O autor (2022).

Para observação do comportamento probabilístico e dispersão dos erros de medições de cap e altura, foram construídos histogramas e gráficos boxplot (Figura 23). Embora para o gráfico de Pareto tenha-se contabilizado apenas erros acima de 0,5 cm e 0,5 m, para a confecção dos histogramas foram utilizados todos os erros de medições das parcelas.

FIGURA 27 - HISTOGRAMAS (A, B, C) E GRÁFICOS BOXPLOT (D, E, F) DOS ERROS DE MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS CAP E ALTURA E DOS ERROS DO VOLUME ESTIMADO, RESPECTIVAMENTE



FONTE: O autor (2022).

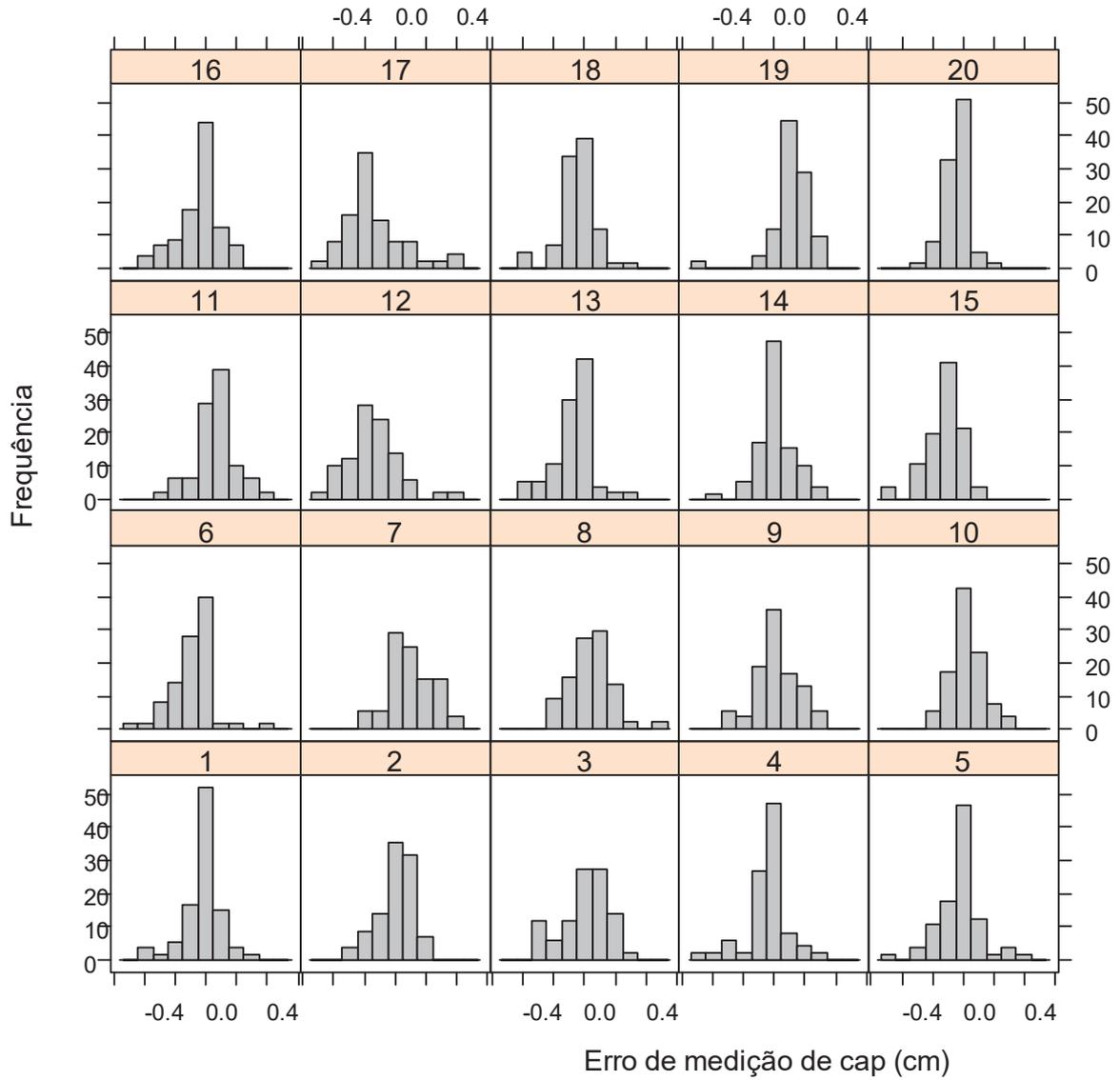
Embora com leve assimetria à direita, o histograma dos erros de medição de cap apresentou unimodalidade, sendo que, a maioria das medições não apresentou erros de medição (Figura 27 a). O histograma dos erros de medição de altura total apresentou assimetria à direita e anormalidade e, de forma geral, assemelha-se ao formato de platô (Figura 27 b). O histograma dos erros de volume inclui os erros de medições assim como também o erro da equação. Assim como os erros de medição de cap, apresentou tendência à unimodalidade, com maior frequência de valores próximos a zero (Figura 27 d).

Corroborando o que foi observado nos histogramas, quando comparados aos erros de medição de cap (Figura 27 e), os erros de medição de altura (Figura 27 f) apresentaram maior dispersão e deslocamento à direita. Os erros de volume apresentaram baixa variação, com leve deslocamento à direita e alguns valores discrepantes em ambos os limites.

Quando gerados os histogramas dos erros de medição de cap ao nível de parcelas (Figura 28), embora tenha-se observado assimetrias em algumas, a unimodalidade da distribuição com a maioria das árvores sem erros de medições foi observada na maioria das parcelas. Por outro lado, nos histogramas dos erros de medição de altura ao nível de parcelas (Figura 29), foi possível observar uma diversidade de comportamento, quase sempre assimétricas com maiores concentrações de erros à direita.

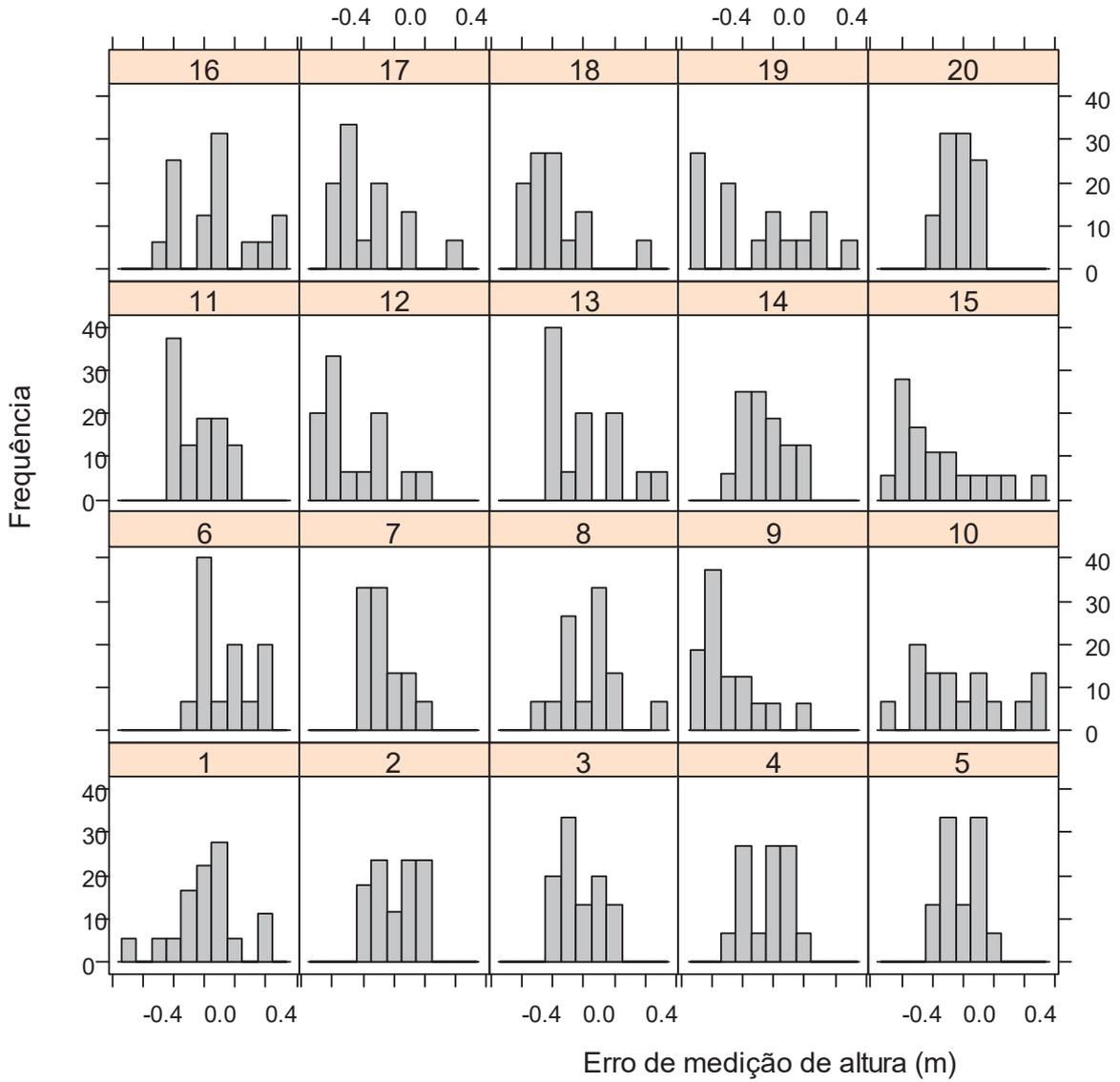
Enquanto os histogramas dos erros de medições de cap (Figuras 27 a e 28) remetem a um processo padronizado, o que para o inventário florestal pode significar a ausência de tendenciosidades nas medições, a anormalidade observada nos histogramas dos erros de altura (Figuras 27 b e 29) indica que o processo de medição não está estável, podendo apresentar tendenciosidades.

FIGURA 28 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE CAP PARA CADA PARCELA CHECADA NO INVENTÁRIO FLORESTAL



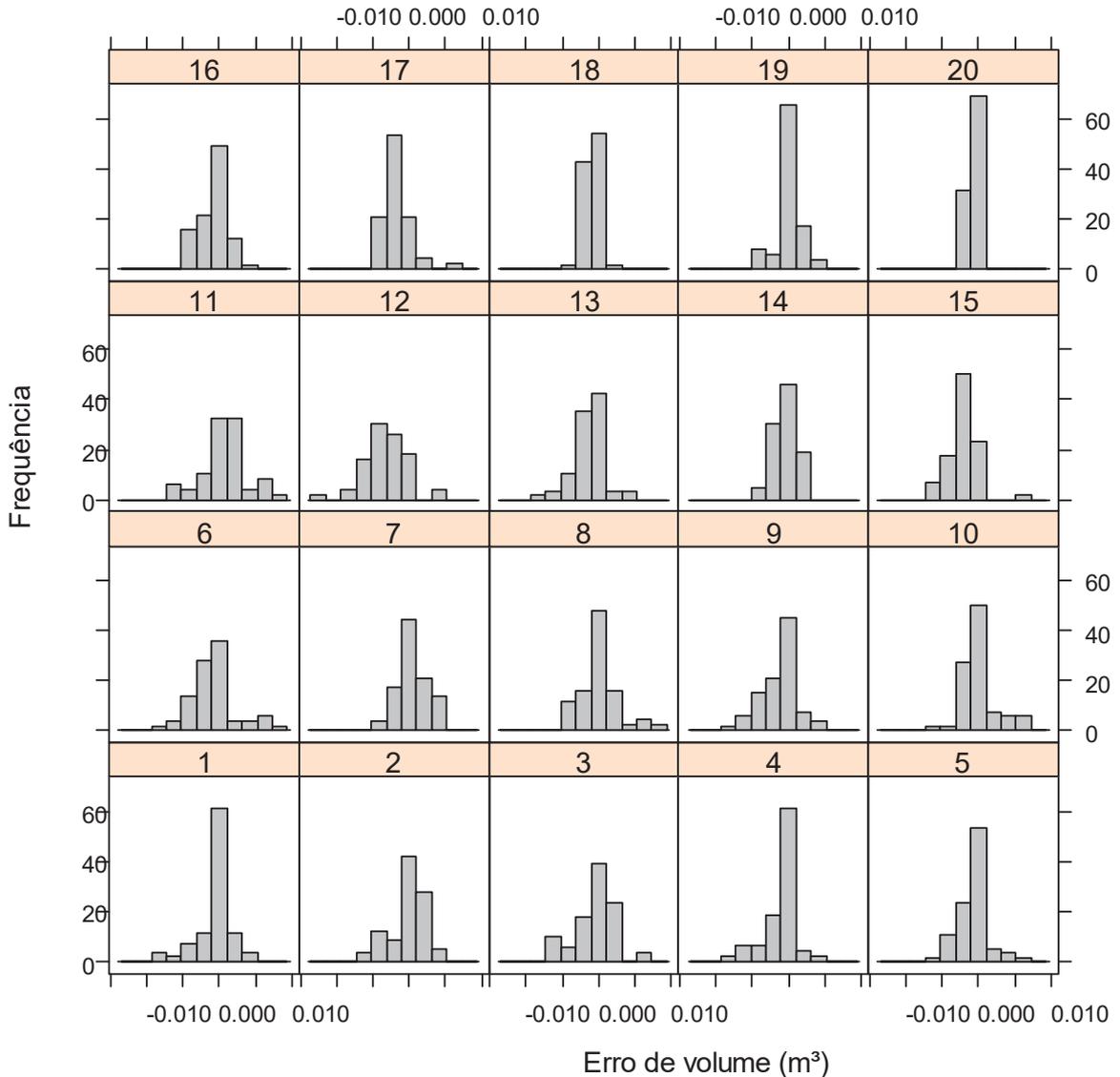
FONTE: O autor (2022).

FIGURA 29 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA PARA CADA PARCELA CHECADA NO INVENTÁRIO FLORESTAL



FONTE: O autor (2022).

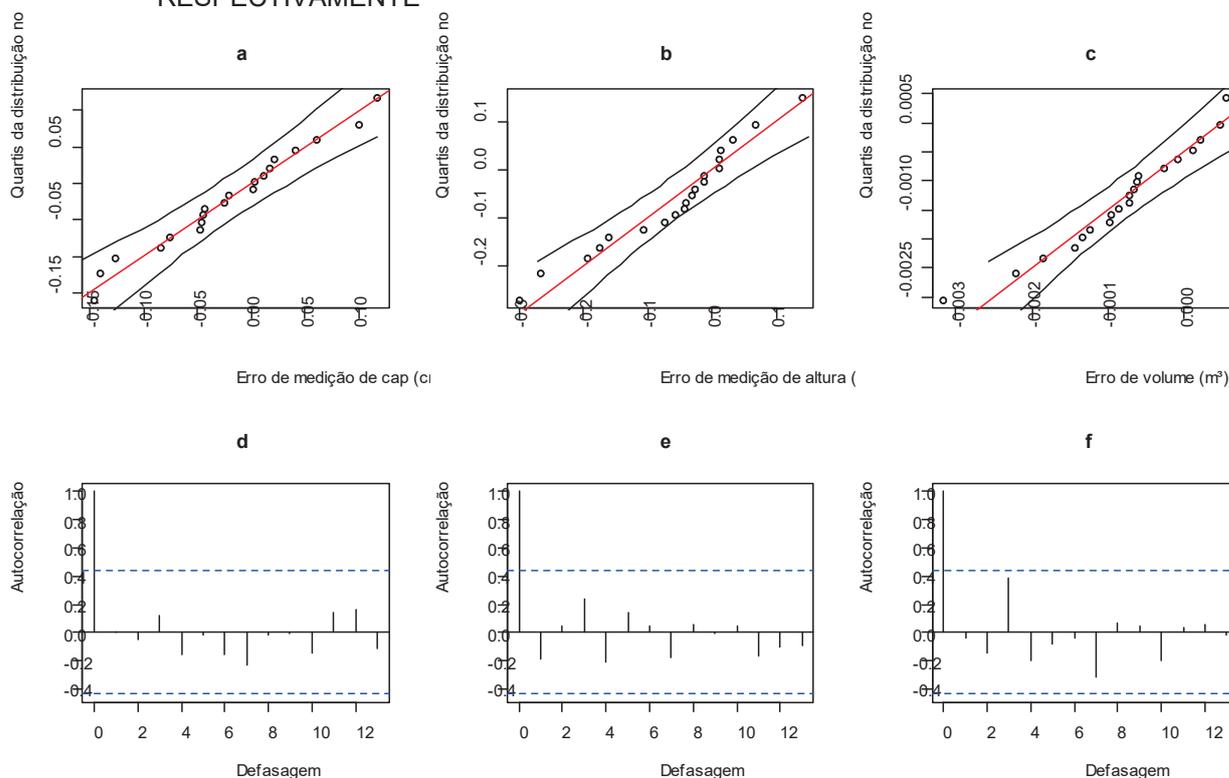
FIGURA 30 - HISTOGRAMAS DOS ERROS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO DE CADA PARCELA CHECADA NO INVENTÁRIO FLORESTAL



FONTE: O autor (2022).

A normalidade da distribuição das médias dos grupos (parcelas), assim como também a ausência de autocorrelação são premissas para a eficiência do uso das cartas de controle de Shewhart. Ao testar a hipótese de normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk ($p\text{-value} > 0,05$) para os erros de medição de cap ($W = 0,97293$, $p\text{-value} = 0,8152$), altura ($W = 0,94641$, $p\text{-value} = 0,3158$) e erros de volume ($W = 0,95373$, $p\text{-value} = 0,4273$), pode-se observar que todas apresentaram distribuição normal. A normalidade ainda pode ser confirmada pelos gráficos q-q para as mesmas variáveis, assim como a ausência de autocorrelação por meio dos gráficos de função de autocorrelação (Figura 31).

FIGURA 31 - GRÁFICOS Q-Q (A, B, C) E GRÁFICOS DE FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (D, E, F) PARA OS ERROS DE MEDIÇÕES DE CAP, ALTURA E ERROS DE VOLUME, RESPECTIVAMENTE



FONTE: O autor (2022).

Com a análise e validação dos pressupostos, as cartas de controle puderam ser confeccionadas sem maiores implicações metodológicas. As informações da carta multivariada para o controle dos erros de medições de cap e altura de forma simultânea, assim como também as informações das cartas de Shewhart para cada variável, são apresentadas na Tabela 16.

TABELA 16 - INFORMAÇÕES DAS CARTAS DE CONTROLE DE CONSTRUÍDAS PARA O MONITORAMENTO DOS ERROS DE MEDIÇÕES NO INVENTÁRIO FLORESTAL

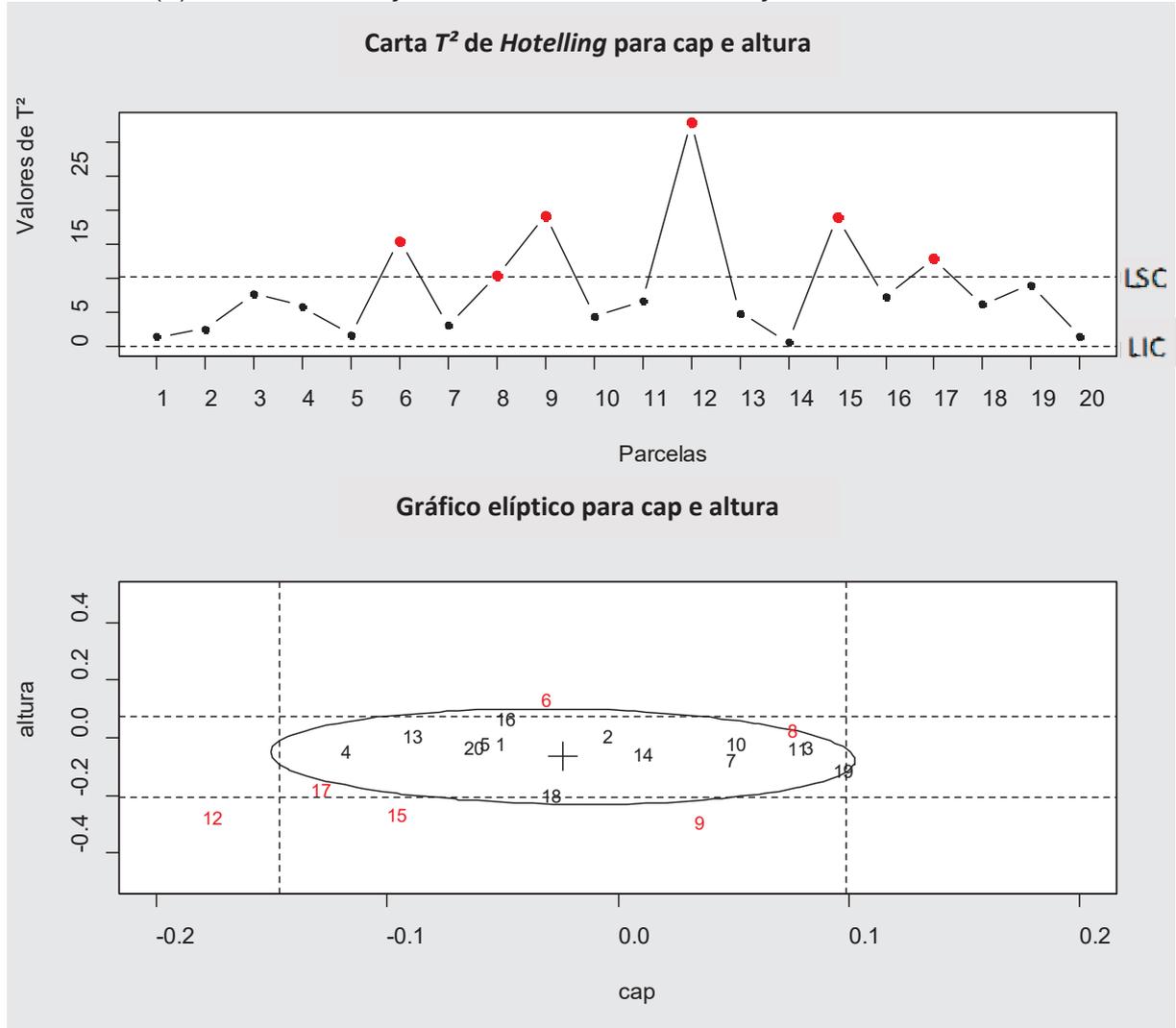
Carta	Erro	Desvio Padrão	LC	LIC	LSC	Fora dos limites
T^2	cap e altura	0,00096	-	0	10,14748	6
\bar{X}	cap	0,13820	-0,02202	variável	variável	8
S	cap	0,13632	0,13804	variável	variável	2
\bar{X}	altura	0,18510	-0,06102	variável	variável	3
S	altura	0,20110	0,19796	variável	variável	1
\bar{X}	volume	0,00224	-0,00082	variável	variável	7
S	volume	0,00220	0,00215	variável	variável	5

FONTE: O autor (2022).

Como pode ser observado na carta de controle T^2 de Hotelling e no gráfico elíptico (Figura 32 a e b), o processo de medição do inventário florestal não está sob

controle. Seis parcelas ultrapassaram os limites de controle. Dessa forma, para a identificação das possíveis causas especiais no processo de medição de cada variável, fez-se necessária a confecção das cartas de controle de Shewhart.

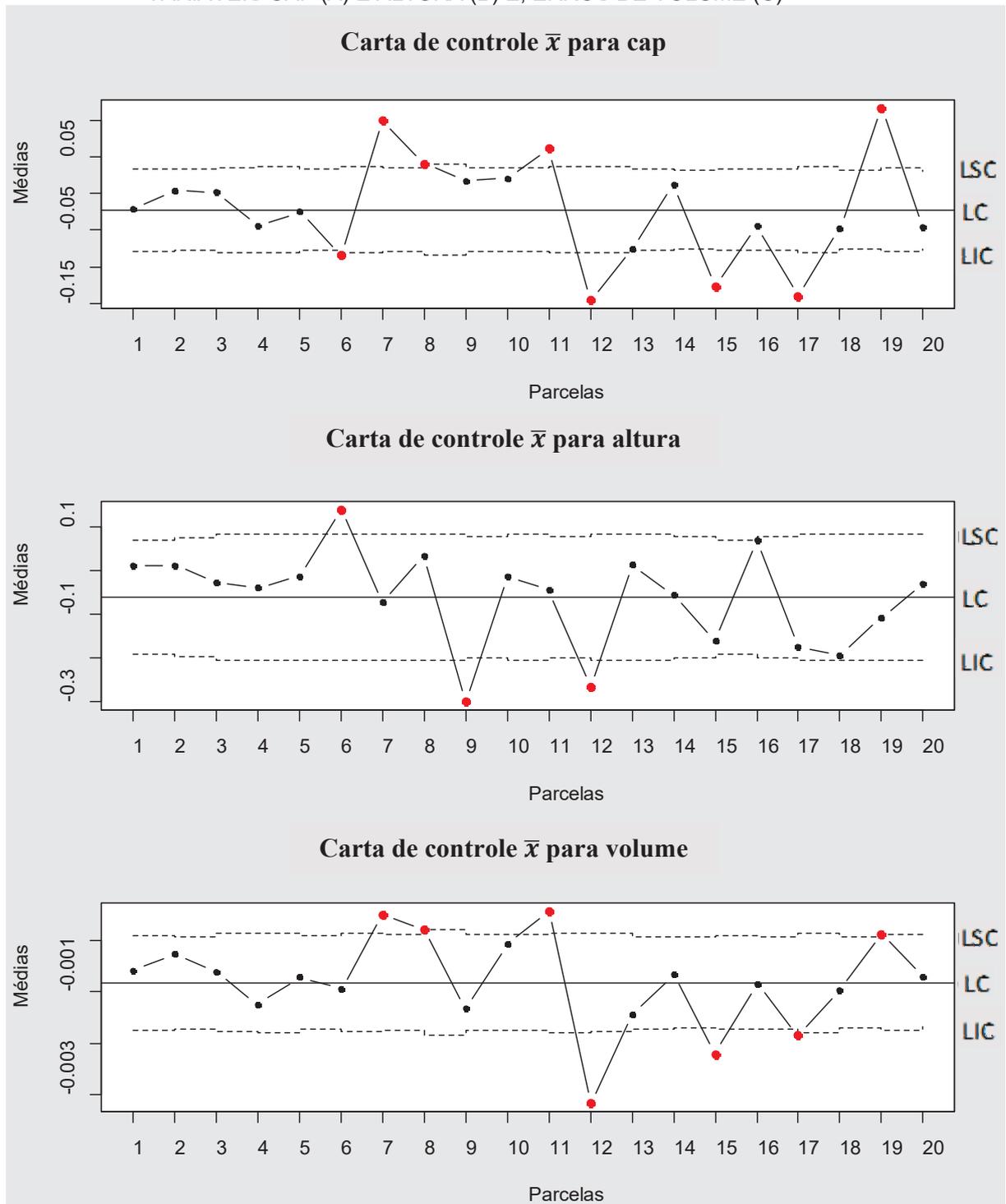
FIGURA 32 - CARTA DE CONTROLE MULTIVARIADA T^2 DE HOTELLING (A) E GRÁFICO ELÍPTICO (B) PARA A AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE CAP E ALTURA



FONTE: O autor (2022).

Por meio das cartas de controle \bar{x} de Shewhart (Figura 33), foi possível observar que os processos de medições de todas as variáveis estavam fora de controle. Por assumirem valores negativos e positivos, os limites de controle das cartas \bar{x} podem ser considerados indicadores da tendenciosidade dos erros. Todavia, como pode ser constatado pelo pequeno valor negativo dos limites centrais, de forma geral, as medições das variáveis apresentaram uma ínfima superestimativa.

FIGURA 33 - CARTAS DE CONTROLE \bar{x} DE SHEWHART PARA ERROS DE MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS CAP (A) E ALTURA (B) E, ERROS DE VOLUME (C)



FONTE: O autor (2022).

Foi possível observar aleatoriedade e equilíbrio na quantidade de parcelas acima e abaixo dos limites centrais, assim como também de parcelas acima dos limites superiores e abaixo dos limites inferiores de controle das cartas \bar{x} .

A carta dos erros de medição de cap (Figura 33 a) apresentou proporções iguais de parcelas acima e abaixo do limite central, e de parcelas que ultrapassaram

os limites superiores e inferiores de controle. A carta dos erros medição de altura (Figura 33 b) foi a que apresentou a maior quantidade de parcelas acima do limite central. Porém, quanto aos limites de controle, assim como na carta dos erros de volume (Figura 33 c), a diferença foi de uma única parcela.

Por meio das cartas de controle S de Shewhart (Figura 34) também foi possível observar que o processo de medição de todas as variáveis estava fora de controle.

No que se refere aos limites superiores e inferiores de controle, as cartas S demonstraram maior controle. No entanto, houve mais de sete pontos consecutivos de um mesmo lado da linha central nas cartas de todas as variáveis (pontos amarelos), sendo que, tais pontos ficaram acima do limite central na carta dos erros de medição de cap (Figura 34 a) e abaixo do limite central nas cartas dos erros de medição de altura (Figura 34 b) e na carta dos erros de volume (Figura 34 c).

As cartas apresentam ao menos padrões (ciclos), nos quais, em todas elas, as primeiras parcelas aparentam maior controle e, posteriormente (a partir da parcela 6 nas cartas \bar{x} e parcela 10 nas cartas S), ocorre uma mudança abrupta no nível do processo.

Entretanto, nenhuma parcela observada abaixo do limite inferior de controle das cartas S ultrapassou os limites de controle nas cartas \bar{x} , dessa forma, assim como as observações de mais de sete parcelas abaixo do limite central, não foram preocupantes para o processo de medição.

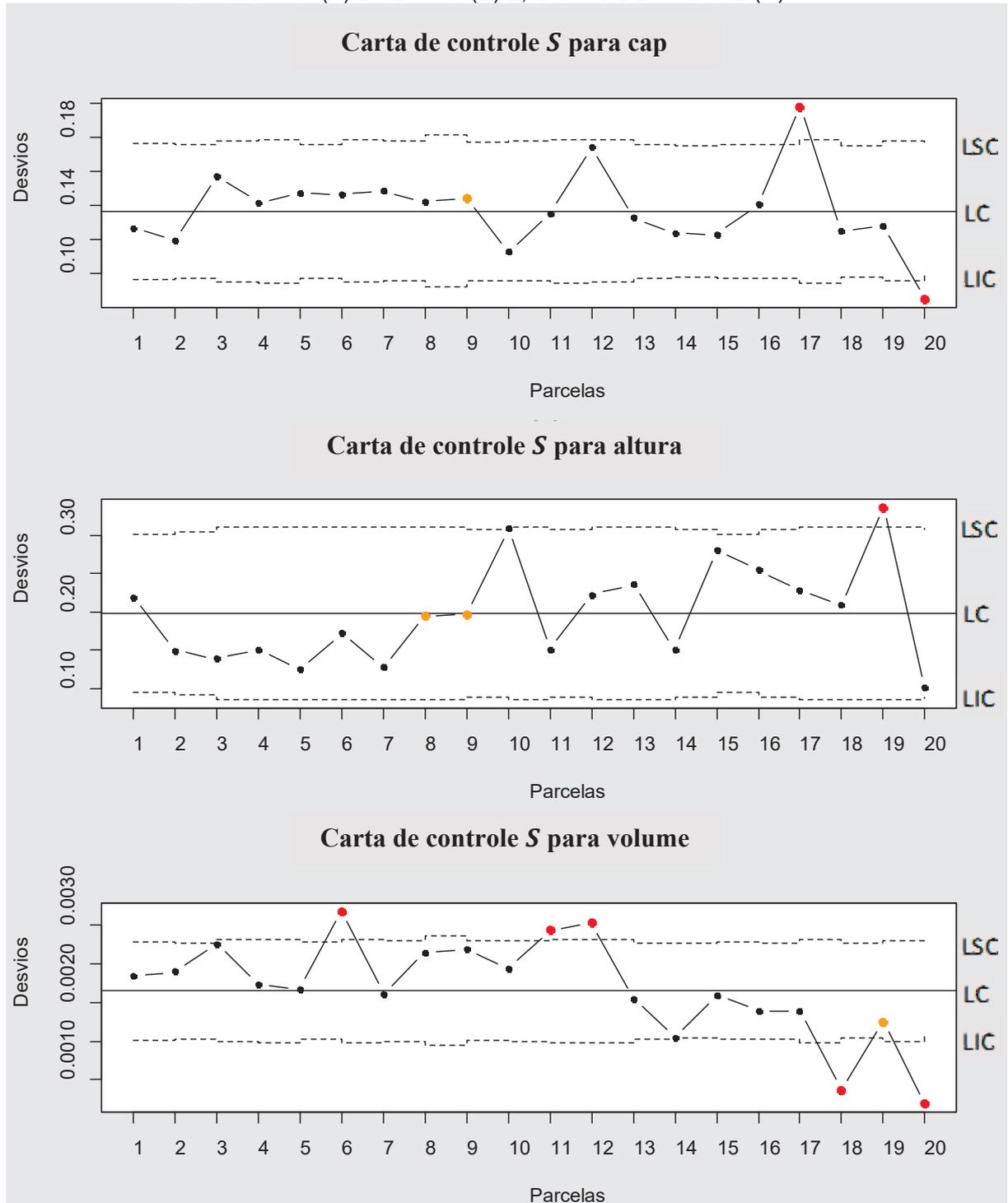
Além disso, nem todas as parcelas ultrapassaram os limites de controle nas cartas S e \bar{x} , simultaneamente. No caso das parcelas que ultrapassaram os limites superiores de controle apenas na carta S , tal comportamento é um forte indício de que os erros são compensantes.

Embora não tenha objetivo de controle e possuam influência das equações de diâmetro-altura e volume individual, as cartas dos erros de volume apresentaram a maior quantidade de parcelas fora dos limites de controle, sendo que, com poucas exceções, foram as mesmas parcelas observadas fora dos limites de controle nas cartas \bar{x} e S .

Mesmo sendo menos rigorosa, a carta de controle T^2 de Hotelling foi capaz de identificar a maioria das parcelas observadas fora de nas cartas \bar{x} e S para cap e altura. Porém, tendo como exemplo a parcela 6, na qual os erros de medição de cap apresentaram tendência à superestimativa e os erros de medição de altura tendência

à subestimativa, foi possível observar que, diferente do observado nas cartas univariadas dos erros de volume, a carta T^2 de Hotelling não foi sensível à compensação entre as variáveis.

FIGURA 34 - CARTAS DE CONTROLE S DE SHEWHART PARA ERROS DE MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS CAP (A) E ALTURA (B) E, ERROS DE VOLUME (C)

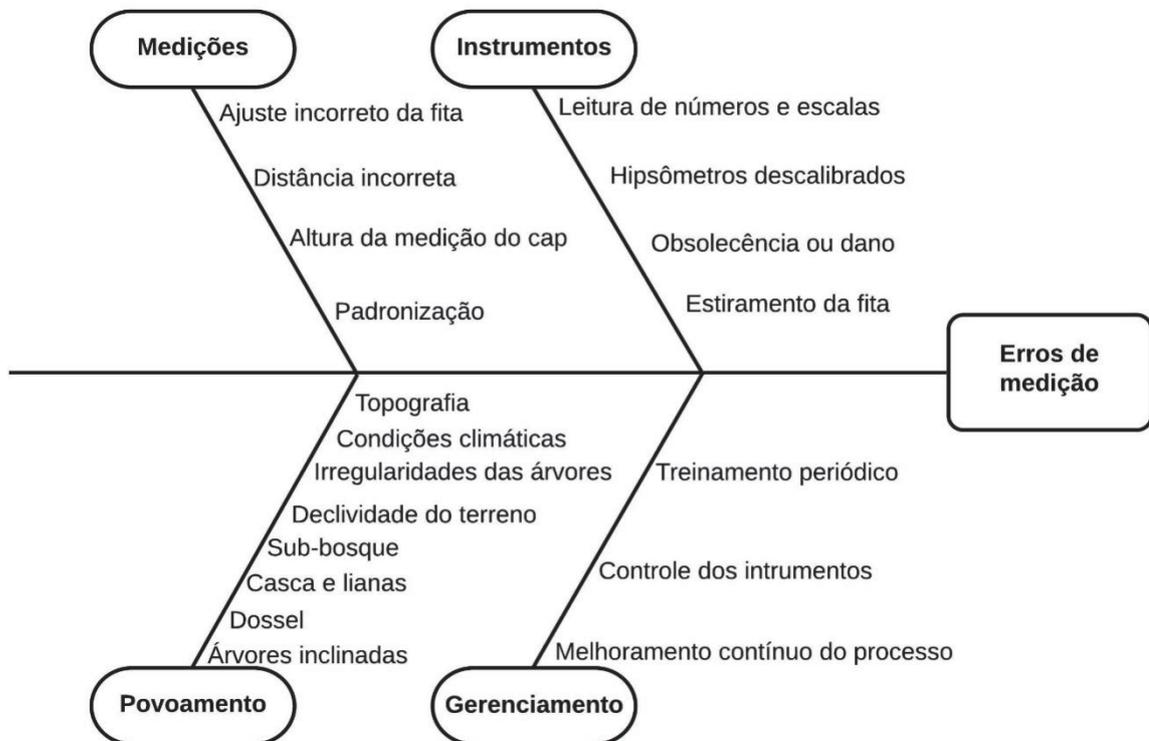


FONTE: O autor (2022).

Com as cartas de controle indicando que os processos de medições estavam fora de controle, fez-se necessária a averiguação das possíveis causas especiais. Considerando apenas a pequena dimensão e o comportamento aleatório dos erros de medições observados nas variáveis cap e altura, descartou-se a possibilidade de que os erros fossem dos tipos sistemáticos e acidentais.

Diante disso, o diagrama de causa-efeito foi elaborado para a identificação das possíveis fontes de erros de medições e elaboração de ações mitigadoras (Figura 35). É importante ressaltar que muitas fontes são relacionadas, dessa forma uma única medida de controle pode apresentar soluções para mais de uma fonte.

FIGURA 35 - DIAGRAMA DE CAUSA-EFEITO COM AS POSSÍVEIS FONTES DE ERROS DE MEDIÇÕES OCORRIDOS NO INVENTÁRIO FLORESTAL



FONTE: O autor (2022).

Devido aos procedimentos preventivos adotados no programa de garantia da qualidade diversas fontes de erros diretamente ligadas às medições (medição do cap em alturas e posições incorretas), instrumentos (leitura incorreta de números e escalas, o uso de clinômetros descalibrados, uso de instrumentos obsoletos e danificados pelo desgaste temporal e, fitas estiradas) e gerenciamento (falta de treinamento e padronização dos procedimentos e protocolos) puderam ser descartados.

Embora não tenham sido alvo de controle, diversas fontes de erros inerentes ao povoamento florestal apresentaram pouca possibilidade de influenciar as medições do inventário, como por exemplo a topografia e grandes declividades do terreno, subosque denso, irregularidades nos fustes das árvores e árvores com lianas e cascas espessas.

Em vista disto, julgou-se que os limites de controle das cartas foram muito rigorosos. Dessa forma, não foram necessárias reprovações, remedições e a exclusão das parcelas que ultrapassaram os limites nas cartas de controle.

6.6 DISCUSSÃO

O diagrama de Pareto apresentou resultado com proporções semelhantes aos do princípio de Pareto, o qual sugere que 80% das consequências advêm de 20% das causas (JURAN; DE FEO, 2010). Devido ao tempo-custo dispensado nas medições das variáveis dendrométricas nos inventários florestais, a priorização dos erros de medições de cap e altura não foi uma surpresa.

Existe uma gama de tipos de erros não relacionados à mensuração das variáveis dendrométricas que podem afetar as estimativas do inventário, com diferentes intensidades (GASPARINI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2018). Nesse estudo, os erros classificados como do tipo 4 foram decorrentes da não classificação de uma árvore como sendo dominada e a não observação da ponteira seca de uma árvore já tombada, assim, não foram considerados significativos.

Qualquer diferença no número de árvores da parcela (erro do tipo 2) poderia causar grave tendenciosidade nas estimativas do inventário, assim como diferenças nas linhas de plantio (erro do tipo 3) revelariam problemas estreitamente relacionados ao desempenho das equipes de campo. Dessa forma, a não ocorrência de tais erros foi vista como aspecto positivo para o controle do processo.

Embora o dossel do povoamento provavelmente tenha provocado perdas de sinal (WRIGHT; WILKINSON; CROPPER, 2017) e a imprecisão dos aparelhos de GPS de navegação seja de até 30 m, a alocação de parcelas com mais de 15 metros de distância da coordenada definida pode estar relacionada à inobservância da estabilização do aparelho. Além da aquisição de aparelhos mais sofisticados, uma possível solução pode ser a determinação de um período de estabilização do sinal.

Caso houvesse correlação entre as variáveis mensuradas e seus respectivos erros, o emprego de técnicas de modelagem poderia proporcionar uma significativa redução dos esforços empregados na checagem das parcelas, assim como também permitiria concentrar esforços de treinamento e prevenção em árvores com dimensões mais afetadas.

Embora não tenham sido melhor abordadas, as correlações observadas entre os erros de cap e erros de volume (Figura 26 a) e erros de altura e erros de volume (Figura 26 b) podem ser estudadas com o intuito de eliminar a necessidade de estimar os volumes individuais das árvores.

Habitualmente, a altura é uma variável de mais difícil obtenção e sujeita a mais fontes de erros quando comparada ao cap (MCROBERTS *et al.*, 1994; CASTAÑO-SANTAMARÍA *et al.*, 2013; MAGNUSSEN; KLEINN; FEHRMANN, 2020). Por se tratar de uma medição indireta, ou seja, uma estimativa, a maior variabilidade dos erros de medição de altura provavelmente está relacionada à precisão dos hipsômetros, sendo que a distribuição sistemática das frequências de erros (patamar) (Figura 27 b) é uma forte evidência disso.

Não existem sistemas de medição perfeitos, sendo assim, qualquer medição física está associada a incertezas (RABINOVICH, 2006; TRAN; TRAN; RAKITZIS, 2019), sendo assim, todo inventário está sujeito a erros de medições. Nesse sentido, os limites das cartas de controle são capazes de levar em conta tal fenômeno no controle da qualidade das medições.

Diferentemente de metodologias que levam em consideração testes estatísticos entre as medições do inventário e da checagem, como a apresentada por Silva *et al.* (2019) e que estabelecem tolerâncias para as variáveis mensuradas (POLLARD *et al.*, 2006), a tolerância estabelecida pelos limites das cartas de controle levou em consideração a capacidade do sistema de medição (relação entre a equipe de campo e instrumentos de medição utilizados).

Em razão da menor quantidade de dados utilizados, entende-se que a carta T^2 de Hotelling apresentou alta eficiência. Embora tenha apresentado menor número de parcelas fora de controle, essas parcelas foram as que ficaram mais distantes dos limites de controle nas cartas \bar{x} para os erros de medições de cap e altura.

Desse modo, a confecção das cartas univariadas para os erros de cap apenas com os dados das árvores que tiveram cap e altura mensurados é uma alternativa que acarretaria significativa redução de custos com as checagens. Contudo, devido à

importância dos diâmetros nos modelos estatísticos de volume individual (KANGAS; KANGAS, 1999; BERGER *et al.*, 2014), a representatividade do conjunto de dados reduzido deve ser mais bem estudada.

A maior influência dos erros de medição de cap sobre os erros de volume, decorrente da forte correlação entre as variáveis dap e volume individual, pode ser notabilizada quando comparadas as cartas por variável separadamente. Enquanto as parcelas fora de controle observadas nas cartas \bar{x} para os erros de medição de cap e erros de volume são as mesmas, a única parcela fora de controle na carta dos erros de medição de altura não apresentou o mesmo comportamento na carta para os erros de volume (Figura 33).

Tendo como exemplo a parcela 6, foi possível observar que, quando as medições das variáveis cap e altura apresentam erros com tendenciosidades em sentidos opostos, ainda que seja considerada fora de controle na carta T^2 de Hotelling, existe compensação, não havendo tendenciosidades na estimativa do volume. Todavia, a exemplo da parcela 12, quando os erros de medições apresentam tendenciosidade no mesmo sentido, existe uma intensificação na tendenciosidade da estimativa do volume (Figura 33).

Sobretudo, o efeito (incerteza) do modelo sobre os erros de volume individuais não pode ser ignorado. Como as técnicas de regressão utilizadas buscam estimar os valores médios de volumes individuais para pares de valores de dap e altura (AVERY; BURKHART, 1994; MCROBERTS; WESTFALL, 2014), essa regressão à média (DRAPER; SMITH, 1998) acaba atuando como um arredondamento e minimizando os efeitos de erros de medições das variáveis independentes.

Como observado nos casos de parcelas que ultrapassaram os limites de controle apenas na carta S (Figura 34), diferente de muitos processos controlados com cartas de controle, a variabilidade dos erros de medições expressa nestas cartas demonstrou menor relevância.

O principal motivo de tal particularidade está relacionado à variação de valores positivos e negativos, com uma média tendendo a zero. Dessa forma, mesmo com um desvio padrão relativamente alto ou baixo, os erros podem ser aleatórios e compensantes ao nível de parcela, assim como observado por Gertner e Köhl (1992).

Além disso, como pode ser observado pelos baixos valores dos limites centrais das cartas \bar{x} (Tabela 16), devido ao fato dos processos de amostragem levarem em consideração a soma da variável de interesse de cada parcela para a

estimativa de um valor médio (KERSHAW JR *et al.*, 2016; MCROBERTS; WESTFALL, 2016), os erros entre as parcelas também foram aleatórios e compensantes.

Quando os limites de controle são ultrapassados, é necessária uma revisão de cada ponto fora de controle. Caso sejam encontrados motivos concretos, o ponto deve ser descartado e os limites de controle recalculados apenas com os pontos remanescentes, o que os tornam mais rigorosos (MONTGOMERY, 2020; ATALAY *et al.*, 2020).

Todavia, com as características do plantio, aferição dos instrumentos e rigorosa padronização dos procedimentos de trabalho de campo e protocolo de medições, uma infinidade de fontes de erros foi descartada, não sendo possível encontrar causas concretas e justificáveis para a eliminação das parcelas que ultrapassaram os limites de controle.

Devido à pequena dimensão dos erros de medição de cap, o que provavelmente levou ao cálculo de limites de controle rigorosos, as causas podem estar relacionadas à diferença de pressão exercida na fita pelos integrantes das equipes de campo e de checagem. Por outro lado, os erros observados nas medições das alturas podem estar relacionados à altura dos medidores. Além disso, as mudanças abruptas de padrão nas cartas de controle também são indícios desta influência de diferentes membros, equipes de medição e de checagem, com diferentes níveis de motivação e experiência.

Em vista disso, optou-se pela manutenção dos pontos e consideração dos limites de controle do teste como apropriados para o momento. Ou seja, isso implica na tomada de decisão de aplicar as cartas de controle na fase II sem a etapa de recálculo dos limites de controle.

Sendo assim, entende-se que as cartas ainda são preliminares e, para tomada de decisão mais assertiva, é necessária uma maior quantidade de unidades amostrais com maior variabilidade, preferencialmente provenientes de processos de coleta de dados sem nenhum controle. Uma alternativa é o estabelecimento de limites de erros a partir da simulação de ocorrência de erros aleatórios e sistemáticos como realizado no estudo desenvolvido por Kohler (2017).

6.7 CONCLUSÃO

Com as devidas adaptações, um programa de garantia da qualidade pode ser desenvolvido e aplicado em inventários florestais. As ferramentas da qualidade utilizadas se mostraram eficazes no que diz respeito à identificação das fontes e priorização dos erros de medições, elaboração e implementação de ações mitigatórias para melhoria contínua do processo de medição do inventário florestal.

As cartas de controle permitiram a realização de uma análise detalhada do comportamento, intensidade e características dos erros de medições. Além disso, a comparação entre as cartas univariadas e multivariadas permitiu observar que uma amostra das medições realizadas na parcela pode ser representativa para verificação da qualidade da coleta de dados.

Embora os erros de medições tenham aparentado estar fora de controle, uma análise mais aprofundada permitiu concluir que os limites calculados apresentaram rigorosidade excessiva, sendo necessária maior quantidade de unidades amostrais, assim como variação das unidades amostrais para o cálculo de limites de controle mais representativos, ou o estabelecimento de limites que proporcionem diferenças significativas nas estimativas de volume.

6.8 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ATALAY, M. *et al.* Guidelines for automating Phase I of control charts by considering effects on Phase-II performance of individuals control chart. **Quality Engineering**, v. 32, n. 2, p. 223-243, 2020.

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest Measurements**. 4th Ed. McGraw-Hill. New York, USA, 1994.

BERGER, A. *et al.* Effects of measurement errors on individual tree stem volume estimates for the Austrian National Forest Inventory. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 14-24, 2014.

CASTAÑO-SANTAMARÍA, J. *et al.* Tree height prediction approaches for uneven-aged beech forests in northwestern Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 307, p. 63-73, 2013.

CUNIA, T. Some theory on reliability of volume estimates in a forest inventory sample. **Forest Science**, v. 11, n. 1, p. 115-128, 1965.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. John Wiley & Sons, 1998.

FRAYRET, J. M. *et al.* Agent-based supply-chain planning in the forest products industry. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 19, n. 4, p. 358-391, 2008.

GASPARINI, P. *et al.* Quality control procedures in the Italian national forest inventory. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 11, n. 4, p. 761-768, 2009.

GERTNER, G. Z. The sensitivity of measurement error in stand volume estimation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 20, n. 6, p. 800-804, 1990.

GERTNER, G. Z.; KÖHL, M. An assessment of some nonsampling errors in a national survey using an error budget. **Forest Science**, v. 38, n. 3, p. 525-538, 1992.

GOETSCH, D. L.; DAVIS, S. B. **Quality management for organizational excellence**. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.

JURAN, J. M.; DE FEO, J. A. **Juran's quality handbook: the complete guide to performance excellence**. McGraw-Hill Education, 2010.

KANGAS, A. S.; KANGAS, J. Optimization bias in forest management planning solutions due to errors in forest variables. **Silva Fennica**, v. 33, n. 4, p. 303-315, 1999.

KERSHAW JR, J. A. *et al.* **Forest mensuration**. 5 th Ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2016.

KOHLER, S. V. **Erros amostrais e não amostrais em inventários de florestas plantadas**. 2017. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

LIN, H. T. *et al.* Effects of nested plot designs on assessing stand attributes, species diversity, and spatial forest structures. **Forest Ecology and Management**, v. 457, p. 117658, 2020.

MAGNUSSEN, S.; KLEINN, C.; FEHRMANN, L. Wood volume errors from measured and predicted heights. **European Journal of Forest Research**, p. 1-10, 2020.

MÄKINEN, A.; KANGAS, A.; MEHTÄTALO, L. Correlations, distributions, and trends in forest inventory errors and their effects on forest planning. **Canadian Journal of forest research**, v. 40, n. 7, p. 1386-1396, 2010.

MCROBERTS, R. E. *et al.* Variation in forest inventory field measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 24, n. 9, p. 1766- 1770, 1994.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 34-42, 2014.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Propagating uncertainty through individual tree volume model predictions to large-area volume estimates. **Annals of Forest Science**, v. 73, n. 3, p. 625-633, 2016.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. John Wiley & Sons, 2020.

POLLARD, J. E. *et al.* **Forest inventory and analysis national data quality assessment report for 2000 to 2003**. US Department of agriculture, forest service, Rocky mountain research station, 2006.

RABINOVICH, S. G. **Measurement errors and uncertainties: theory and practice**. Springer Science & Business Media, 2006.

SILVA, S. A. *et al.* Methodology for the assessment of aspects and qualitative data in forest inventory audit. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 453-459, 2018.

SILVA, S. A. *et al.* Ferramentas estatísticas para auditoria de inventários florestais em povoamentos de Eucalyptus spp. **Scientia Forestalis**, n. 121, p. 59-70, 2019.

TRAN, P. H.; TRAN, K. P.; RAKITZIS, A. A synthetic median control chart for monitoring the process mean with measurement errors. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 35, n. 4, p. 1100-1116, 2019.

WRIGHT, W. C.; WILKINSON, B. E.; CROPPER JR, W. P. Estimating GPS signal loss in a natural deciduous forest using sky photography. **Papers in Applied Geography**, v. 3, n. 2, p. 119-128, 2017.

7 ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES⁴

7.1 RESUMO

O impacto dos erros de medições nas estimativas de inventários florestais pode ser estimado por meio das informações obtidas com a checagem das parcelas. A estimativa da variação do volume individual em função dos erros de medições dos diâmetros à altura do peito (dap) e das alturas totais (ht) pode proporcionar significativo ganho na agilidade do processamento de dados de checagens de parcelas, dessa forma, o objetivo do presente estudo foi de ajustar quatro modelos com tal finalidade. Os erros de medições de dap e altura apresentaram relação positiva com as diferenças do volume individual estimado (incerteza), sendo assim, foi possível ajustar modelos com precisão satisfatória. O modelo ajustado em função dos erros de medição de dap ao quadrado e altura foi o mais indicado para a estimativa das incertezas do volume individual em checagens de parcelas e auditorias de inventários florestais.

Palavras-chave: Controle da qualidade. Checagem de parcelas. Propagação de incerteza.

7.2 ABSTRACT

The impact of measurement errors on forest inventory estimates can be estimated through the information obtained by checking the plots. The estimation of the variation of the individual volume in function of the measurement errors of the diameters at breast height (dbh) and total heights can provide a significant gain in the agility of data processing of plot checks, in this way, the objective of the present study was to fit four models for this purpose. The dbh and height measurement errors showed a positive relationship with the differences in the estimated individual volume (uncertainty), thus, it was possible to fit models with satisfactory accuracy. The model fitted as a function of the measurement errors of squared dbh and height was the most

⁴ ESTIMATION OF VOLUME UNCERTAINTY AT TREE LEVEL AS A FUNCTION OF MEASUREMENT ERRORS

suitable for estimating uncertainties in individual volume in plot checks and audits of forest inventories.

Keywords: Quality control. Checking plots. Propagation of uncertainty.

7.3 INTRODUÇÃO

As informações obtidas por meio de inventários florestais e programas de monitoramento variam de acordo com o objetivo, o qual geralmente é quantificar e atribuir qualidade ao estoque de madeira (volume), biomassa e carbono (MCROBERTS; WESTFALL, 2016). Ainda que exista uma crescente ênfase na análise da dinâmica ao longo do tempo, informações sobre o estado corrente dos recursos florestais são substanciais para a tomada de decisão e planejamento da produção florestal (WESTFALL; PATTERSON, 2007).

Todavia, de acordo com Cunia (1965), qualquer estimativa de volume proveniente de amostras de inventários florestais está sujeita a três principais fontes de erros: os provenientes do processo de amostragem; do método estimativo; e os erros de medições. Podendo ser fontes de incertezas, os erros podem influenciar a confiabilidade dos resultados do inventário florestal e, conseqüentemente, planejamento da produção florestal (SILVA *et al.*, 2019).

Quando utilizados processos de amostragens, alguns indivíduos da população são utilizados para a estimação dos parâmetros estatísticos, os valores estimados para toda a população não são "valores verdadeiros", mas sim "estimativas", que estão relacionadas ao chamado erro de amostragem. Quando os parâmetros populacionais são obtidos com a ajuda de funções ou modelos estatísticos, as estimativas dos valores da variável de interesse de cada indivíduo ou unidade de área estão sujeitas aos erros de estimativas. Por fim, os erros de medições são a diferença entre o verdadeiro valor e a medição inexata das variáveis dendrométricas de cada árvore dentro de uma unidade amostral (OMULE, 1980).

Embora seja dada pouca atenção aos erros de medições quando comparados aos demais, estes podem afetar a construção e a interpretação dos modelos estatísticos (KANGAS, 1998), ocasionar perdas econômicas por situações de sobra ou falta de matéria-prima na indústria (KANGAS; KANGAS, 1999), desbastes e colheita em períodos imprecisos (MÄKINEN; KANGAS; MEHTÄTALO, 2010) e

negociações com base em informações inexatas, trazendo prejuízos a uma das partes (SILVA *et al.*, 2018).

A qualidade da coleta dos dados de inventários florestais tem sido objeto de estudos de diversos trabalhos ao redor do mundo, principalmente quando se trata de inventários realizados em grandes áreas florestais, ou envolvendo altos valores comerciais (GASPARINI *et al.*, 2009; BERGER *et al.*, 2012; BERGER *et al.*, 2014; GSCHWANTNER *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019).

Os métodos que compõem os programas de controle da qualidade apresentam grande variação de acordo com os objetivos do inventário e seus responsáveis, sendo que as checagens ou auditorias quase sempre são utilizadas nos programas (GSCHWANTNER *et al.*, 2022). Em diversas situações, o principal objetivo dessa atividade é avaliar o impacto da qualidade da coleta de dados nas estimativas da variável de interesse do inventário florestal (SILVA *et al.*, 2018).

Tendo os erros de medições das circunferências ou diâmetros à altura do peito, 1,30 acima do nível do solo (dap ou cap) e das alturas das árvores como principal subsídio, geralmente é demandado significativo esforço para o cálculo do impacto e propagação dos erros na estrutura paramétrica do povoamento florestal alvo do inventário (BERGER *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2019).

Dessa forma, levando em consideração o volume de madeira como variável de interesse do inventário florestal, a estimativa da variação do volume decorrente dos erros de medições das variáveis coletadas nas parcelas e utilizadas como variáveis preditoras em modelos de volume individual pode trazer expressivo ganho na agilidade do processamento de dados de checagens de parcelas e tomada de decisão. Sendo assim, o objetivo do presente estudo foi o ajustar modelos para a estimativa das variações dos volumes individuais de cada árvore em função dos erros de medições de dap e altura total.

7.4 MATERIAIS E MÉTODOS

7.4.1 Área de estudo

O inventário florestal alvo do presente estudo foi realizado em plantios de *Eucalyptus* sp localizados no Vale do Jequitinhonha, região Norte do estado de Minas Gerais, Brasil. As idades dos plantios variam entre 9 e 11 anos e foram plantados com espaçamento inicial de 3 x 3 m. A uma altitude de aproximadamente 720 metros,

segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, com precipitação média anual de 1.000 mm e temperatura média de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

7.4.2 Inventário florestal e procedimentos

Com intensidade amostral de 0,5%, o processo de amostragem utilizado foi o sistemático com parcelas permanentes, de forma circular, com aproximadamente 500 m² (raio de 12,62 m), distribuídas em grid amostral de 1 parcela para cada 10 hectares.

Após a coleta das coordenadas UTM do ponto central (latitude e longitude) com aparelho GPS Garmin eTrex® 30, nas parcelas foram mensuradas as circunferências dos fustes a altura do peito, 1,3 m de altura (cap) de todas as árvores utilizando baliza e fita métrica de aço (modelo Lufkin W606PM), (as quais foram posteriormente transformadas em dap), os valores de altura total das 7 primeiras árvores da primeira linha, das 3 árvores com os menores valores de cap, das 5 árvores com os maiores valores de cap e, das árvores mortas, quebradas e com ponta seca, com o uso do clinômetro digital (modelo ECII – D Haglöf).

7.4.3 Estimativa do volume individual

Os volumes individuais de cada árvore cujas variáveis dap e altura foram mensuradas em cada parcela foram estimados por meio de um modelo a nível de árvore de dupla entrada (Schumacher-Hall), Equação (1).

$$v = \beta_0 \cdot \text{dap}_i^{\beta_1} \cdot \text{ht}_i^{\beta_2} + \varepsilon, \quad (1)$$

Onde: β_0 é 3,55E-05, β_1 é 1,670160 e β_2 é 1,312760. O ajuste apresentou coeficiente de determinação R² de 0,9610 e erro padrão da estimativa (S_{yx}) de 0,0206 m³.

7.4.4 Checagem das parcelas

O inventário foi realizado em aglomerados de 20 unidades amostrais mensuradas em sequência, identificadas com relação à equipe, talhão e data de medição. Também foram enumeradas as linhas, covas de plantio e fustes das árvores.

A checagem do inventário florestal foi realizada por uma equipe qualificada, seguindo os mesmos métodos e utilizando os mesmos instrumentos do inventário florestal, no prazo de 7 dias. Para o presente estudo, foram sorteadas e remedidas 20, de um total de 400 parcelas, o equivalente a 5%. Nessas parcelas, foram realizadas remedições completas. Além disso, todos os indivíduos pertencentes às equipes de campo passaram por treinamentos e os instrumentos utilizados passaram por aferições periódicas de acordo com a necessidade.

Os erros de medições das variáveis *cap* (depois transformados em *dap*) e altura total (Equação 2) foram utilizados como variáveis preditoras da incerteza do volume individual estimado pela equação de volume. Para isso, os valores das medições da checagem foram tomados como verdadeiros.

$$\hat{\epsilon}_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2)$$

Onde: $\hat{\epsilon}_i$ é o *i*-ésimo erro de cada medição; y_i é a *i*-ésima medição obtida na checagem e \hat{y}_i a *i*-ésima medição obtida no inventário.

7.4.5 Modelos ajustados

Para o estudo foram ajustados os modelos representados pelas expressões (3), (4), (5) e (6). Todos os modelos foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados. A seleção da melhor equação foi baseada nas estatísticas de ajuste e precisão: coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), erro padrão da estimativa (S_{yx}) e análise gráfica de distribuição dos resíduos ordinários.

Modelo 1:

$$dif v_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot Emdap_i + \epsilon_i, \quad (3)$$

Modelo 2:

$$dif v_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot Emht_i + \epsilon_i, \quad (4)$$

Modelo 3:

$$dif v_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot Emdap_i + \beta_2 \cdot Emht_i + \epsilon_i, \quad (5)$$

Modelo 4:

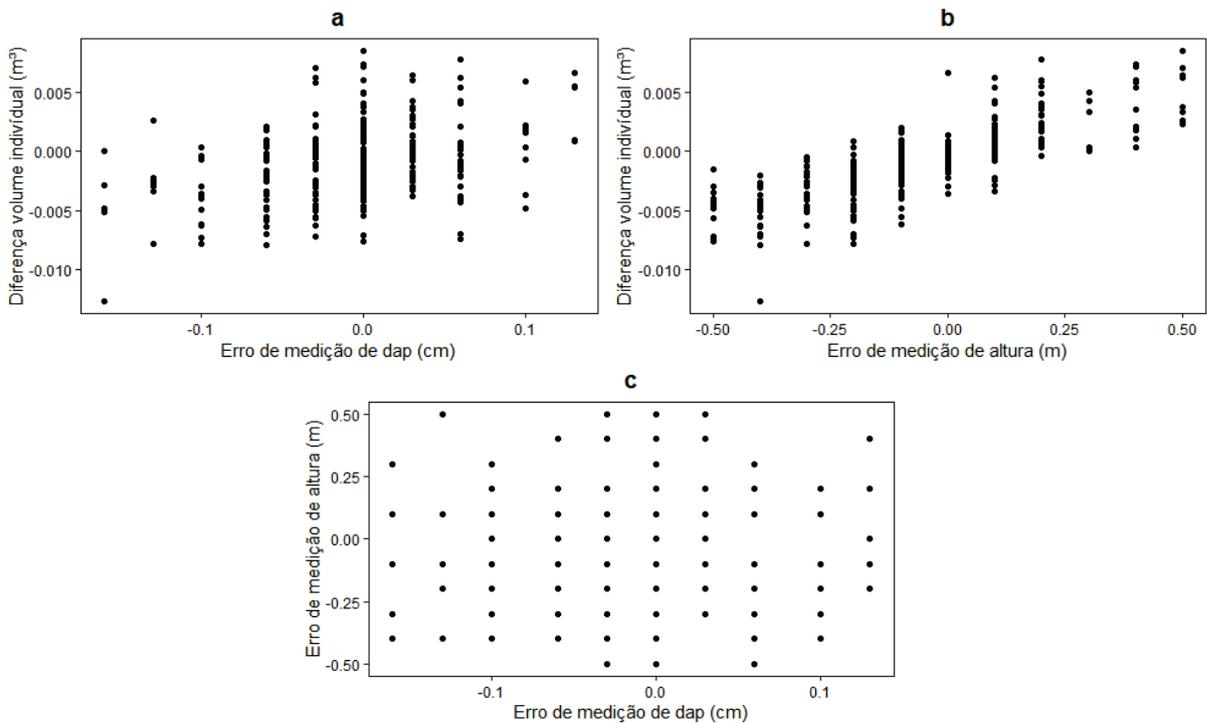
$$dif v_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot Emdap_i^2 + \beta_2 \cdot Emht_i + \varepsilon_i, \tag{6}$$

Onde: $dif v_i$ é a incerteza do volume individual estimado (m³); $Emdap_i$ é o erro de medição do diâmetro à altura do Peito, 1,3 m do solo (cm); $Emht_i$ é o erro de medição da altura total da árvore (m); ε_i é o erro aleatório e β_n são os coeficientes estimados.

7.5 RESULTADOS

Como pode ser observado na análise gráfica (Figura 36), tanto o erro de medição de dap quanto o erro de medição de altura possuem uma relação positiva com as incertezas do volume individual estimado. O erro de medição de altura aparenta maior relação com as incertezas do volume individual estimado. Além disso, a dispersão entre erros de dap e altura parecem mostrar que não há relação entre erros de dap e altura.

FIGURA 36 - GRÁFICOS DE DISPERSÃO DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE DAP (A) E HT (B), ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE DAP (C)



FONTE: O autor (2022).

Os parâmetros estimados para os quatro modelos testados para o conjunto total dos dados são apresentados na Tabela 17, assim como os respectivos valores

de $R_{aj.}^2$, S_{yx} e os respectivos limites inferiores e superiores de acordo com o intervalo de confiança de 95%.

TABELA 17 - RESULTADO DO AJUSTE DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE DAP E H

Modelo	Parâmetro	Estimativa	E. Padrão	LI	LS	$R_{aj.}^2$	S_{yx} (m³)
1	β_0	-0,00069***	0,00017	-0,00102	-0,00036	0,1542	0,00294
	β_1	0,02399***	0,00315	0,01778	0,03019		
2	β_0	-0,00019 ^{ns}	0,00011	-0,00041	0,00003	0,6483	0,00189
	β_1	0,01128***	0,00047	0,01035	0,01220		
3	β_0	0,00001 ^{ns}	0,00008	-0,00015	0,00017	0,8151	0,00137
	β_1	0,02475***	0,00147	0,02184	0,02765		
	β_2	0,01137***	0,00034	0,01069	0,01204		
4	β_0	0,00006 ^{ns}	0,00012	-0,00018	0,00030	0,6666	0,00184
	β_1	-0,08927***	0,02095	-0,13050	-0,04804		
	β_2	0,01124***	0,00046	0,01034	0,01214		

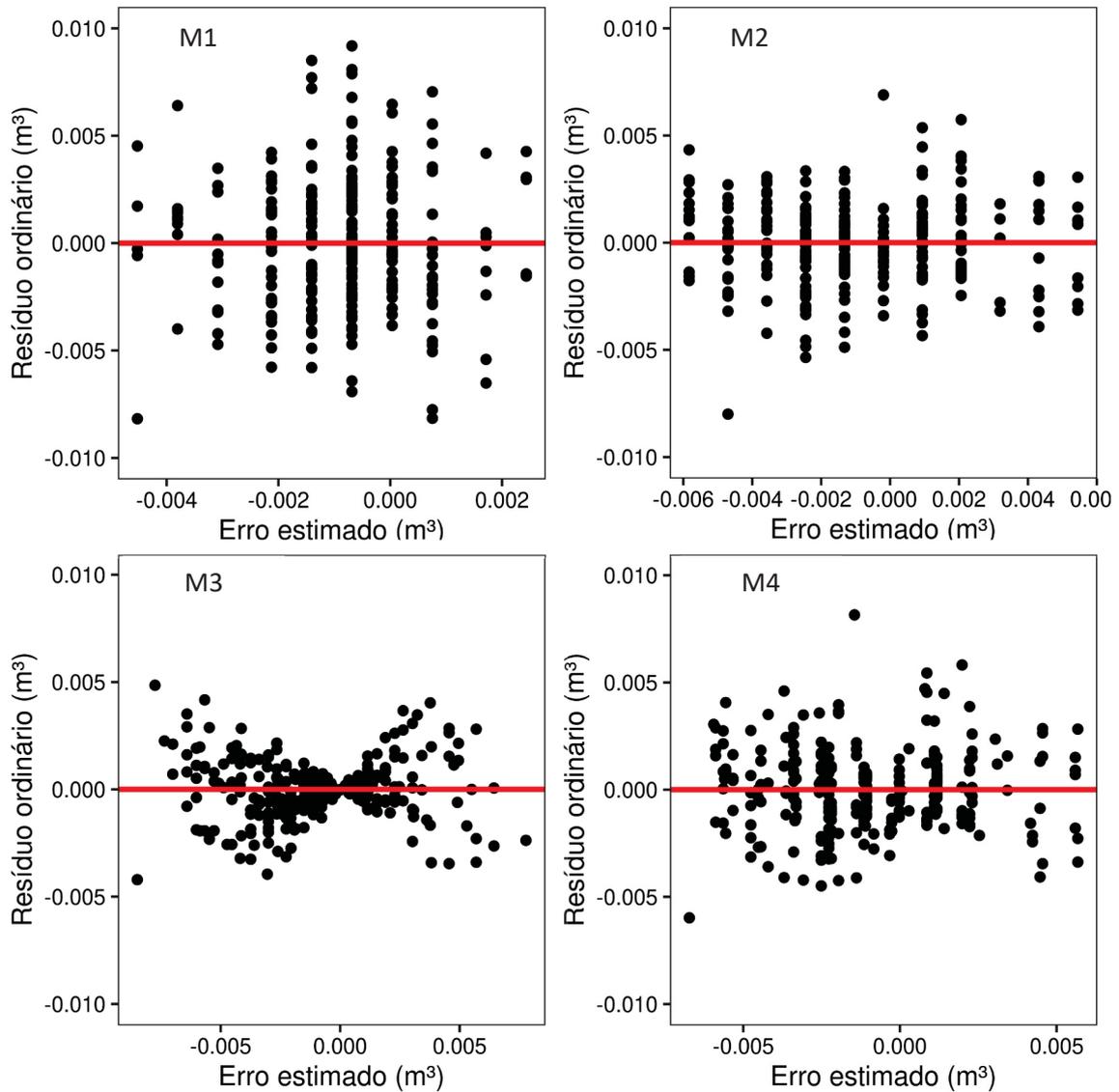
Onde: β_n são os parâmetros dos modelos ajustados; ^{ns} é não significativo a 5% de significância; *** é significativo a um nível de 0,01% de significância; LI é o limite inferior do erro padrão dos parâmetros ajustados; LS é o limite superior do erro padrão dos parâmetros ajustados; $R_{aj.}^2$ é o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} é o erro padrão da estimativa em m³.

FONTE: O autor (2022).

Os erros de medição do dap, assim como os erros de medição de altura estão positivamente correlacionados com o erro em volume. Quando comparados os resultados dos ajustes dos modelos 1 e 2 foi possível observar o impacto da maior correlação entre os erros de medição de altura e as incertezas do volume individual. Apesar de existente, a relação entre os erros de medição de dap e as incertezas do volume individual é fraca.

Embora tenha apresentado os melhores valores de $R_{aj.}^2$ e S_{yx} , o que o caracterizaria como o melhor modelo ajustado, como pode ser observado no gráfico da distribuição dos resíduos ordinários (Figura 37), o Modelo 3 viola o pressuposto de variâncias homogêneas ao longo da estimativa.

FIGURA 37 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS ORDINÁRIOS RESULTANTE DOS MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE DAP E H



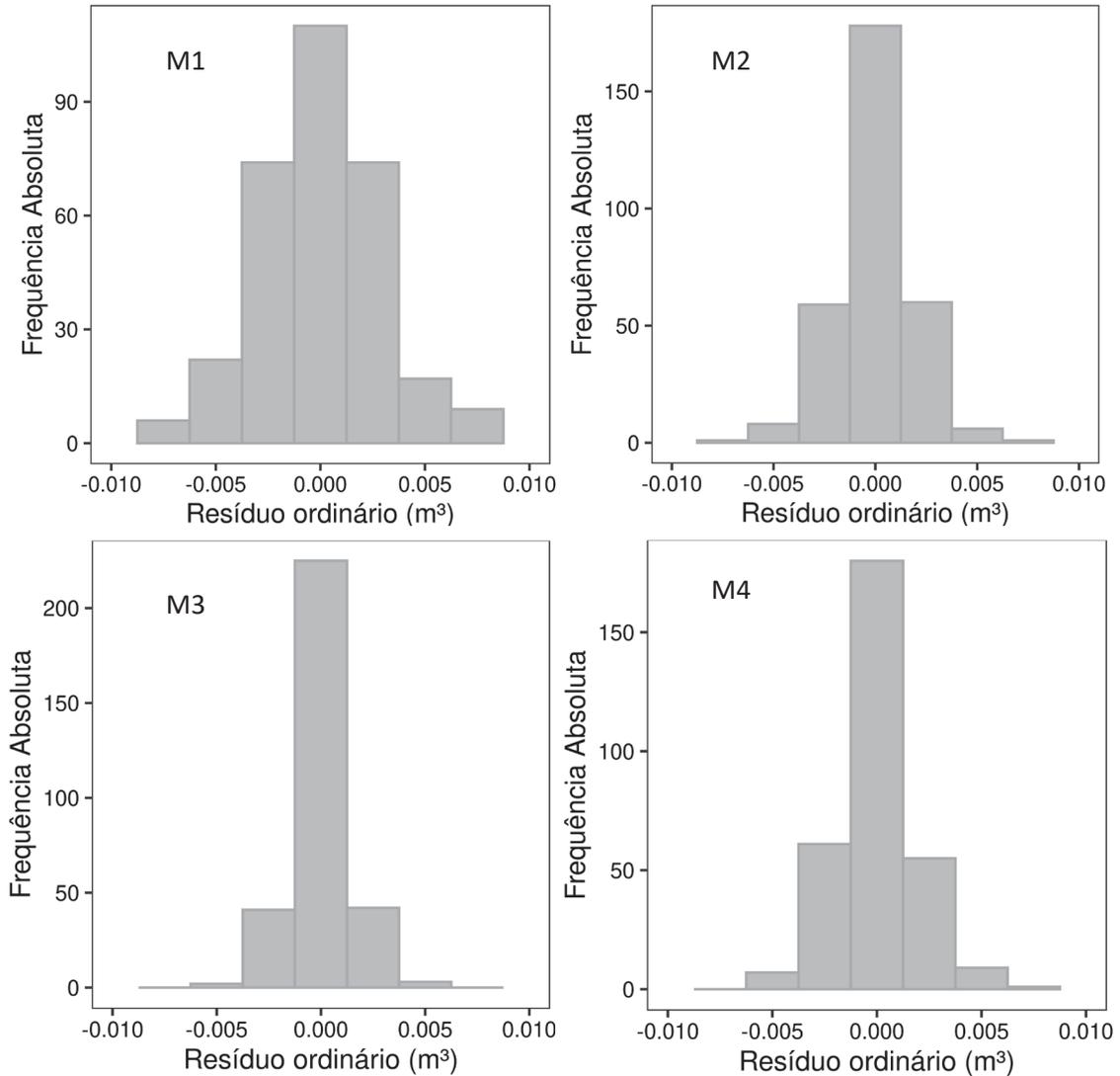
FONTE: O autor (2022).

O erro de medição de dap elevado ao quadrado no Modelo 4 foi capaz de evitar a violação do pressuposto variâncias homogêneas ao longo da estimativa. Todavia, os resultados foram inferiores ao Modelo 3, sendo que o valor estimado do parâmetro β_2 é próximo do parâmetro β_1 do modelo, utilizando somente o erro de altura (Modelo 2), o que reforça a ortogonalidade entre os erros de medições de dap e altura.

Como pode ser observado nos histogramas dos resíduos ordinários dos modelos ajustados (Figura 38), todos apresentaram distribuição unimodal, simétrica, com tendência à normalidade, sendo que, na medida em que os resultados foram

melhores, houve diminuição das caudas e maior concentração de dados na classe central, ou seja, houve um aumento da característica leptocúrtica.

FIGURA 38 - HISTOGRAMAS DOS RESÍDUOS ORDINÁRIOS RESULTANTES DOS MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DO VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO EM FUNÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÕES DE DAP E H.



FONTE: O autor (2022).

7.6 DISCUSSÃO

O parâmetro estimado para a covariável erro de medição de dap para o modelo linear simples (Modelo 1) foi de 0,02399, isso significa que dada a correlação positiva entre os erros de medição do dap e as incertezas do volume individual, em média, o aumento de uma unidade do erro de dap (1 cm) implica em um aumento de 0,02399 m³ na incerteza do volume individual estimado. Levando em consideração o Modelo 2, analogamente, o aumento de 1 metro de erro na medição da altura

implicaria que o erro de volume aumentaria em $0,01128 \text{ m}^3$, ou seja, guardadas as unidades de medida das variáveis, o impacto dos erros de medição de dap sobre as incertezas do volume individual estimado é mais que o dobro do que o dos erros de medição de altura.

Embora quando comparada à variável altura, a correlação entre a variável dap e o volume individual das árvores seja maior, quando se trata dos erros de medições, foi observado comportamento inverso, provavelmente decorrente da maior variação (erros de medições) nas medições da variável altura em relação às medições de dap, uma vez que se trata de uma variável de mais difícil obtenção e suscetível a erros de medição (SILVA *et al.*, 2019; MAGNUSSEN; KLEINN; FEHRMANN, 2020).

Como os erros de medições assumem valores positivos e negativos e muito próximos de zero, realizar qualquer transformação nos dados, como transformação quadrática, log e inversa etc. se torna de difícil aplicabilidade. No entanto, dada a aparente relação linear entre as variáveis, um modelo linear múltiplo, buscando relacionar a incerteza do volume individual estimado em função dos erros de medições de dap e altura, teoricamente seria satisfatório.

Porém, a heterogeneidade das variâncias ao longo da estimativa, observada no ajuste do Modelo 3, é considerada uma fuga dos pressupostos da análise de regressão (VAN DUSEN; NISSEN, 2019) e, possivelmente, pode ser atribuída ao fato do diâmetro ter relação quadrática relacionada ao volume, sendo que a inclusão de tal termo no Modelo 4 permitiu corrigir tal fuga do pressuposto.

Entretanto, a interpretação do novo parâmetro β_1 desse modelo implica no aumento da unidade ao quadrado, ou seja, em termos absolutos, em uma variação de $-0,08927 \text{ m}^3$ no erro de volume. Ainda, é importante mencionar que uma variável ao quadrado é estritamente positiva, assim, uma vez que o parâmetro estimado é negativo, trata-se de um indício da superestimativa dos diâmetros mensurados no inventário.

Outra informação importante do Modelo 4 é que ambos os parâmetros foram significativos a um nível de significância de 5%. Assim como observado por Berger *et al.* (2014), isso indica que há uma relação significativa entre os erros de medições de dap, altura e as incertezas do volume individual estimado. Apesar de aparentemente óbvia, essa constatação é evidência de que, para dado erro de dap e altura, é esperada uma determinada incerteza no volume individual estimado, mesmo antes de realizar qualquer estimativa do volume individual.

Todavia, cabe destacar que com base na regressão, não se pode afirmar que a existência de erros de medições de dap e altura implicará em incertezas na estimativa do volume individual, já que a análise de regressão não tem capacidade relacionar causalidades entre a medição das variáveis. Como observado no presente estudo, além de impactarem o volume individual com intensidades diferentes, por se tratar de variáveis mensuradas de forma independente (PAUDEL; BECKSCHÄFER; KLEINN, 2021), os erros de medições de dap e altura podem se compensar (GERTNER; KÖHL, 1992), fazendo com que a incerteza do volume individual estimado passe a não existir.

Além disso, como as técnicas de regressão utilizadas buscam estimar os valores médios, essa regressão à média acaba resultando em um arredondamento, minimizando os efeitos de pequenos erros de medições das variáveis independentes (DRAPER; SMITH, 1998; MCROBERTS; WESTFALL, 2014), tanto para a estimativa das incertezas como para a estimativa dos próprios volumes individuais.

7.7 CONCLUSÃO

Os erros de medições de dap e altura apresentaram relação positiva com as incertezas do volume individual estimado, sendo que o erro de medição de altura aparentou a maior relação, dessa forma, foi possível ajustar modelos com precisão satisfatória para a estimativa das incertezas do volume individual estimado em função dos erros de medições de dap e altura.

Embora o modelo linear de dupla entrada (Modelo 3) tenha apresentado os melhores resultados de coeficiente de determinação e erro padrão da estimativa, por meio da análise dos gráficos resíduos ordinários foi possível observar a quebra do pressuposto da homogeneidade das variâncias ao longo da estimativa. Dessa forma, o modelo com o erro de medição de dap elevado ao quadrado e erros de medição de altura (Modelo 4) é o mais indicado para a estimativa das incertezas do volume individual em checagens de parcelas e auditorias de inventários florestais.

7.8 REFERÊNCIAS

BERGER, A. *et al.* Analysis of tree measurement errors in the Austrian National Forest Inventory. **Aust. J. For. Sci**, v. 129, n. 3, p. 149-177, 2012.

BERGER, A. *et al.* Effects of measurement errors on individual tree stem volume estimates for the Austrian National Forest Inventory. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 14-24, 2014.

CUNIA, T. Some theory on reliability of volume estimates in a forest inventory sample. **Forest Science**, v. 11, n. 1, p. 115-128, 1965.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. John Wiley & Sons, 1998.

GASPARINI, P. *et al.* Quality control procedures in the Italian national forest inventory. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 11, n. 4, p. 761-768, 2009.

GERTNER, G. Z; KÖHL, M. An assessment of some nonsampling errors in a national survey using an error budget. **Forest Science**, v. 38, n. 3, p. 525-538, 1992.

GSCHWANTNER, T. *et al.* Growing stock monitoring by European National Forest Inventories: Historical origins, current methods and harmonisation. **Forest Ecology and Management**, v. 505, p. 119-868, 2022.

KANGAS, A S. Effect of errors-in-variables on coefficients of a growth model and on prediction of growth. **Forest Ecology and Management**, v. 102, n. 2, p. 203-212, 1998.

KANGAS, A. S.; KANGAS, J. Optimization bias in forest management planning solutions due to errors in forest variables. **Silva Fennica**, v. 33, n. 4, p. 303-315, 1999.

MAGNUSSEN, S.; KLEINN, C.; FEHRMANN, L. Wood volume errors from measured and predicted heights. **European Journal of Forest Research**, p. 1-10, 2020.

MÄKINEN, A.; KANGAS, A.; MEHTÄTALO, L. Correlations, distributions, and trends in forest inventory errors and their effects on forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 7, p. 1386-1396, 2010.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 34-42, 2014.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Propagating uncertainty through individual tree volume model predictions to large-area volume estimates. **Annals of Forest Science**, v. 73, n. 3, p. 625-633, 2016.

OMULE, S. A. Y. Personal bias in forest measurements. **The Forestry Chronicle**, v. 56, n. 5, p. 222-224, 1980.

PAUDEL, P.; BECKSCHÄFER, P.; KLEINN, C. Impact of training on different observers in forest inventory. **Banko Janakari**, v. 31, n. 1, p. 12-22, 2021.

SILVA, S. A. *et al.* Methodology for the assessment of aspects and qualitative data in forest inventory audit. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 453-459, 2018.

SILVA, S. A. *et al.* Ferramentas estatísticas para auditoria de inventários florestais em povoamentos de Eucalyptus spp. **Scientia Forestalis**, n. 121, p. 59-70, 2019.

VAN DUSEN, B.; NISSEN, J. Modernizing use of regression models in physics education research: A review of hierarchical linear modeling. **Physical Review Physics Education Research**, v. 15, n. 2, p. 020108, 2019.

WESTFALL, J. A.; PATTERSON, P. L. Measurement variability error for estimates of volume change. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 11, p. 2201-2210, 2007.

8 RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os capítulos desenvolvidos e apresentados foram eficazes no que diz respeito ao cumprimento do objetivo geral, assim como dos objetivos específicos da tese. Quanto a novos estudos sobre erros de medições, auditoria e checagem de parcelas de inventários florestais, é importante destacar que embora alguns necessitem de coletas de dados específicos, outros podem ser desenvolvidos com o banco de dados aqui utilizado, como por exemplo estudos relacionados à probabilidade.

Referente às variáveis que podem afetar a ocorrência de erros de medições em inventários florestais, estudos com enfoque nas variações das características das equipes de medição como níveis de instrução e treinamento, assim como com enfoque no uso de outros instrumentos de medição também podem suprir uma lacuna de conhecimento na ciência florestal.

No que diz respeito às metodologias de controle da qualidade de coleta de dados de inventários florestais ainda existem diversas oportunidades de aperfeiçoamento. Assim como os sistemas de inventários florestais variam de acordo com os objetivos e características da vegetação a ser estudada, os programas de controle da qualidade dos inventários florestais também podem ser mais ou menos eficientes de acordo com a adaptação ao sistema de inventário florestal.

Quanto ao efeito da propagação dos erros de medições, principalmente quando se trata de informações provenientes de plantios florestais, ainda existem poucos estudos. Entre as lacunas de conhecimento ainda se destacam os efeitos dos erros de medições na estimativa dos volumes individuais por diferentes modelos estatísticos, assim como na estimativa por diferentes processos de amostragem.

9 REFERÊNCIAS GERAIS

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest Measurements**. 4th Ed. McGraw-Hill. New York, USA, 1994.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDRADE, C. M. S.; DE ASSIS, G. M. L.; SALES, M. F. L. **Estilosantes Campo Grande**: leguminosa forrageira recomendada para solos arenosos do Acre. Embrapa: Acre, Circular Técnica 55, 12 p., 2010.

ATAÍDE, D. H. D. S. *et al.* Dependência espacial de variáveis dendrométricas em diferentes idades e intensidades amostrais em povoamento de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1591-1611, 2021.

ATALAY, M. *et al.* Guidelines for automating Phase I of control charts by considering effects on Phase-II performance of individuals control chart. **Quality Engineering**, v. 32, n. 2, p. 223-243, 2020.

BERGER, A. *et al.* Analysis of tree measurement errors in the Austrian National Forest Inventory. **Aust. J. For. Sci.**, v. 129, n. 3, p. 149-177, 2012.

BERGER, A. *et al.* Effects of measurement errors on individual tree stem volume estimates for the Austrian National Forest Inventory. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 14-24, 2014.

BRASSEL, P.; LISCHKE, H. **Swiss national forest inventory**: methods and models of the second assessment. WSL, 2001.

BURGAN, Robert E. Variations in diameter measurements of robusta Eucalyptus due to swelling and shrinking of bark. **Forest Service**, US Department of Agriculture, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1971.

CANAVAN, S. J.; HANN, D. W. The two-stage method for measurement error characterization. **Forest Science**, v. 50, n. 6, p. 743-756, 2004.

CASTAÑO-SANTAMARÍA, J. *et al.* Tree height prediction approaches for uneven-aged beech forests in northwestern Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 307, p. 63-73, 2013.

CHUNG, M. H. Estimating solar insolation and power generation of photovoltaic systems using previous day weather data. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, 2020.

COCHRAN, W. G. **Sampling Techniques**. 3th Ed. Wiley, 1977.

CUNIA, T. Some theory on reliability of volume estimates in a forest inventory sample. **Forest Science**, v. 11, n. 1, p. 115-128, 1965.

D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. **Infor. Information Systems And Operational Research**, v. 46, n. 4, p. 265, 2008.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. John Wiley & Sons, 1998.

ELZINGA, C.; SHEARER, R. C.; ELZINGA, G. Observer variation in tree diameter measurements. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 20, n. 2, p. 134-137, 2005.

FRAYRET, J. M. *et al.* Agent-based supply-chain planning in the forest products industry. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 19, n. 4, p. 358-391, 2008.

FLORES, T. B. *et al.* **Eucalyptus no Brasil**: zoneamento climático e guia para identificação. Piracicaba: IPEF, 2016, 448 p.

FOELKEL, C. Casca da árvore do eucalipto. **Eucalyptus Online Book**, 2006.

GABLER, K.; SCHADAUER, K. Some approaches and designs of sample-based national forest inventories. **Austrian J For Sci**, v. 124, n. 2, p. 105-133, 2007.

GASPARINI, P. *et al.* Quality control procedures in the Italian national forest inventory. **Journal of environmental monitoring**, v. 11, n. 4, p. 761-768, 2009.

GERTNER, G. Z.; DZIALOWY, P. J. Effects of measurement errors on an individual tree-based growth projection system. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, n. 3, p. 311-316, 1984.

GERTNER, G. Z. The sensitivity of measurement error in stand volume estimation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 20, n. 6, p. 800-804, 1990.

GERTNER, G. Z. Prediction bias and response surface curvature. **Forest Science**, v. 37, n. 3, p. 755-765, 1991.

GERTNER, G. Z.; KÖHL, M. An assessment of some nonsampling errors in a national survey using an error budget. **Forest Science**, v. 38, n. 3, p. 525-538, 1992.

GOETSCH, D. L.; DAVIS, S. B. **Quality management for organizational excellence**. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.

GOERGEN, L. C. G. *et al.* Geostatistical behavior of dendrometric variables of *Eucalyptus benthamii* for forest management purpose. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 48, n. 127, p. 1-12, 2020.

GSCHWANTNER, T. *et al.* Growing stock monitoring by European National Forest Inventories: Historical origins, current methods and harmonisation. **Forest Ecology and Management**, v. 505, p. 119-868, 2022.

GURAUSKIS, D. *et al.* Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 296, p. 145-154, 2019.

JURAN, J. M.; DE FEO, J. A. **Juran's quality handbook**: the complete guide to performance excellence. McGraw-Hill Education, 2010.

KANGAS, A. S. On the bias and variance in tree volume predictions due to model and measurement errors. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 11, n. 1-4, p. 281-290, 1996.

KANGAS, A. S. Effect of errors-in-variables on coefficients of a growth model and on prediction of growth. **Forest Ecology and Management**, v. 102, n. 2, p. 203-212, 1998.

KANGAS, A. S.; KANGAS, J. Optimization bias in forest management planning solutions due to errors in forest variables. **Silva Fennica**, v. 33, n. 4, p. 303-315, 1999.

KANGAS, A; MALTAMO, M. (Ed.). **Forest inventory**: methodology and applications. Springer Science & Business Media, 2006.

KERSHAW JR, J. A. *et al.* **Forest mensuration**. 5 th Ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2016.

KITAHARA, F.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Evaluation of data quality in Japanese national forest inventory. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 159, n. 1, p. 331-340, 2009.

KITAHARA, F.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements. **Silva Fennica**, v. 44, n. 4, p. 657-667, 2010.

KJELLSTROM, T. *et al.* The direct impact of climate change on regional labor productivity. **Archives of Environmental & Occupational Health**, v. 64, n. 4, p. 217-227, 2009.

KJELLSTROM, T.; CROWE, J. Climate change, workplace heat exposure, and occupational health and productivity in Central America. **International Journal of Occupational and Environmental Health**, v. 17, n. 3, p. 270-281, 2011.

KOHLER, S. V. **Erros amostrais e não amostrais em inventários de florestas plantadas**. 2017. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

LIN, H. T. *et al.* Effects of nested plot designs on assessing stand attributes, species diversity, and spatial forest structures. **Forest Ecology and Management**, v. 457, p. 117658, 2020.

LINGMEI, L. *et al.* In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT & INSTRUMENTS (ICEMI), 14., 2019. **Proceedings...** IEEE, 2019. p. 132-137.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV. Verlagsgesellschaft, 1973. v.2. 469 p.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. Influência do tipo de amostragem na estimativa de volume de madeira de eucalipto por krigagem. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 511-523, 2016.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2006.

MAGNUSSEN, S.; KLEINN, C.; FEHRMANN, L. Wood volume errors from measured and predicted heights. **European Journal of Forest Research**, p. 1-10, 2020.

MÄKINEN, A.; KANGAS, A.; MEHTÄTALO, L. Correlations, distributions, and trends in forest inventory errors and their effects on forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 7, p. 1386-1396, 2010.

MCROBERTS, R. E. *et al.* Variation in forest inventory field measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 24, n. 9, p. 1766-1770, 1994.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 34-42, 2014.

MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Propagating uncertainty through individual tree volume model predictions to large-area volume estimates. **Annals of Forest Science**, v. 73, n. 3, p. 625-633, 2016.

MELLO, J. M. D. *et al.* Continuidade espacial para características dendrométricas (número de fustes e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 33, p. 185-194, 2009.

MEZEI, P. *et al.* Potential solar radiation as a driver for bark beetle infestation on a landscape scale. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 604, 2019.

MEYER, R. W.; KELLOGG, R. M.; WARREN, W. G. Relative density, equilibrium moisture content, and dimensional stability of western hemlock bark. **Wood and Fiber Science**, v. 13, n. 2, p. 86-96, 1981.

MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Incorporation of bark and tops in *Eucalyptus globulus* wood pulping. **Bioresources**, v. 7, n. 3, p. 4350-4361, 2012.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. John Wiley & Sons, 2020.

NASCIMENTO, K. A. *et al.* Environmental Thermal Conditions Related to Performance, Dynamics and Safety of Logging in the Brazilian Amazon. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 42, n. 3, p. 419-435, 2021.

OMULE, S. A. Y. Personal bias in forest measurements. **The Forestry Chronicle**, v. 56, n. 5, p. 222-224, 1980.

PAUDEL, P.; BECKSCHÄFER, P.; KLEINN, C. Impact of training on different observers in forest inventory. **Banko Janakari**, v. 31, n. 1, p. 12-22, 2021.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. v 1. Curitiba, 1997.

POLLARD, J. E. *et al.* **Forest inventory and analysis national data quality assessment report for 2000 to 2003**. US Department of agriculture, forest service, Rocky mountain research station, 2006.

PUKKALA, T. Multiple risks in multi-objective forest planning: integration and importance. **Forest Ecology and Management**, v. 111, n. 2, p. 265-284, 1998.

PUKKALA, T. Multi-objective forest planning. **Springer Science & Business Media**, 2013.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020.

RABINOVICH, S. G. Measurement errors and uncertainties: theory and practice. **Springer Science & Business Media**, 2006.

SANQUETTA, C. R. *et al.* **Inventários florestais: planejamento e execução**. Curitiba: Multi-Graphic, v. 2, 2009.

SILVA, S. A. *et al.* Methodology for the assessment of aspects and qualitative data in forest inventory audit. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 453-459, 2018.

SILVA, S. A. *et al.* Ferramentas estatísticas para auditoria de inventários florestais em povoamentos de *EUCALYPTUS* spp. **Scientia Forestalis**, n. 121, p. 59-70, 2019.

SOARES, M. P.; NUNES, Y. R. F. Regeneração natural de cerrado sob plantio de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. no norte de Minas Gerais, Brasil. **Revista Ceres**, v. 60, p. 205-214, 2013.

SUTY, N.; NYSTRÖM, K.; STÅHL, G. Assessment of bias due to random measurement errors in stem volume growth estimation by the Swedish National Forest Inventory. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 28, n. 2, p. 174-183, 2013.

STEFANSKI, L. A. Measurement error models. **Journal of the American Statistical Association**, v. 95, n. 452, p. 1353-1358, 2000.

THEILADE, I.; RUTISHAUSER, E.; POULSEN, M. K. Community assessment of tropical tree biomass: challenges and opportunities for REDD+. **Carbon balance and management**, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2015.

TOMPPO, E. *et al.* National forest inventories. Pathways for Common Reporting. **European Science Foundation**, p. 541-553, 2010.

TRAN, P. H.; TRAN, K. P.; RAKITZIS, A. A synthetic median control chart for monitoring the process mean with measurement errors. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 35, n. 4, p. 1100-1116, 2019.

VAN DUSEN, B.; NISSEN, J. Modernizing use of regression models in physics education research: A review of hierarchical linear modeling. **Physical Review Physics Education Research**, v. 15, n. 2, p. 020108, 2019.

VIEIRA, D. A. *et al.* Cerrado natural regeneration in understory of Eucalyptus sp. stands, in the Federal District, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 1, p. 68-73, 2017.

WESTFALL, J. A.; PATTERSON, P. L. Measurement variability error for estimates of volume change. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 11, p. 2201-2210, 2007.

WICKHAM, H. **Ggplot2**: Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag New York, 2016.

WRIGHT, W. C.; WILKINSON, B. E.; CROPPER JR, W. P. Estimating GPS signal loss in a natural deciduous forest using sky photography. **Papers in Applied Geography**, v. 3, n. 2, p. 119-128, 2017.