

CÍNTIA RIBEIRO GOMIDE

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE TORAS COMERCIAIS
DESTINADAS À PRODUÇÃO DE CELULOSE APLICANDO UM
MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA E EQUAÇÃO DE
TAPER

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

G633d
2016
Gomide, Cíntia Ribeiro, 1990-
Determinação do número de toras comerciais
destinadas à produção de celulose aplicando um modelo de
distribuição diamétrica e equação de Taper / Cíntia Ribeiro
Gomide. - Viçosa, MG, 2016.
x, 67f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador : Helio Garcia Leite.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Eucalipto - Colheita - Estimativas. 2. Distribuição
(Teoria da probabilidade). 3. Madeira - Comercialização.
4. Celulose. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 634.95

CÍNTIA RIBEIRO GOMIDE

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE TORAS COMERCIAIS
DESTINADAS À PRODUÇÃO DE CELULOSE APLICANDO UM
MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA E EQUAÇÃO DE
TAPER

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

CÍNTIA RIBEIRO GOMIDE

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE TORAS COMERCIAIS
DESTINADAS À PRODUÇÃO DE CELULOSE APLICANDO UM
MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA E EQUAÇÃO DE
TAPER

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

Aline Edwiges Mazon de
Alcântara

Carlos Pedro Boechat Soares
(Coorientador)

Helio Garcia Leite
(Orientador)

A Deus.

*Aos meus pais, João Roberto e
Maris Coeli, exemplos de amor,
coragem e determinação.*

*Ao meu irmão Cássio, exemplo
de amizade.*

*“Por vezes sentimos que aquilo
que fazemos não é senão uma gota de
água no mar. Mas o mar seria menor
se lhe faltasse uma gota”.*

Madre Teresa de Calcutá

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos de todos os dias.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) por proporcionar crescimento pessoal e profissional.

Ao Professor Helio Garcia Leite, pela excelente orientação e inestimáveis ensinamentos compartilhados.

Ao Professor Carlos Pedro Boechat Soares pela coorientação e contribuições.

À Aline Mazon, pela amizade, apoio à realização deste trabalho e sugestões.

À secretaria de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Florestal, em especial ao Alexandre, pela prontidão em atender.

À minha família pelas orações e incentivo. Especialmente, aos meus pais, João Roberto Gomide e Maris Coeli Ribeiro Gomide, por todo amor e carinho. Ao meu irmão Cássio Ribeiro Gomide pela amizade e conselhos.

Aos grandes amigos, Cláudia Breias, Carlos Henrique Breias, Claudiane Souza, Nayara Abrão, Yasmin Alvarenga, Juliana Tensol, Mariana Morena, Larissa Carvalho Santos, Thaisa Ribeiro, Marcela Oliveira, Vanessa Lopes, Nicolle Araújo, Lumena Boroni, Caroline Rodrigues, Renato Damásio, Gustavo Fernandes, William Oliveira, Fábio Fernandes, Danielle Leonel, Beatriz Mendes, Carla Paim, Sissa Luchi, Geraldo Pereira, Leticia Magnago, Bruno Martins, Tamara Eller e Monique Spilari, pois, perto ou distante, tornam meus dias mais especiais.

Aos amigos do grupo de estudos GE³, pelos momentos de aprendizado e diversão. Aos amigos do Grupo de Estudos em Manejo Florestal, especialmente ao Carlos Araújo e Diogo Cosenza, pelas contribuições para desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos da CENIBRA, pela oportunidade de aprendizado e crescimento, especialmente aos Srs. José Márcio Cardoso, Mauro Werneburg e Ubirajara Coelho.

Aos novos amigos e colegas de trabalho Amanda Parrela, Adriano Andrade, Carlos Henrique Alves e Elias Chagas, pelo incentivo e compreensão.

A todos minha gratidão!

BIOGRAFIA

CÍNTIA RIBEIRO GOMIDE, filha de João Roberto Gomide e Maris Coeli Ribeiro Gomide, nasceu em 16 de maio de 1990, em Campo Belo, Estado de Minas Gerais.

Em 2008, ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em setembro de 2013.

Em março de 2014, iniciou o curso de Mestrado em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em 19 de fevereiro de 2016.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo Geral.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	5
3.1. Descrição dos dados	5
3.2. Classificação da capacidade produtiva.....	6
3.3. Estimativa da altura total	7
3.4. Frequências diamétricas estimadas	7
3.5. Modelo de distribuição diamétrica.....	8
3.6. Modelo de afilamento do fuste (<i>taper</i>).....	9
3.7. Projeção do diâmetro (<i>dap</i>)	10
3.8. Avaliação das estimativas.....	10
4. RESULTADOS	12
4.1. Classificação da capacidade produtiva.....	12
4.2. Estimativas da altura total.....	12
4.3. Frequência diamétrica observada e estimada	13
4.4. Modelos de distribuição diamétrica	13
4.5. Modelo de afilamento do fuste (<i>taper</i>).....	46
4.6. Projeção do diâmetro (<i>dap</i>)	47
4.7. Identificação do <i>dap</i> mínimo para geração de toras comerciais e número de toras por classe de diâmetro.....	58
5. DISCUSSÃO.....	61
6. CONCLUSÕES.....	64
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos em nível de parcela, observados em povoamentos de clones de eucalipto localizados na região centro-oeste de Minas Gerais.....	5
Tabela 2 - Número de parcelas por região e por classe de local, em povoamentos de clones de eucalipto na região Centro-Oeste de Minas Gerais.....	6
Tabela 3 - Percentual do número médio de toras comerciais geradas por indivíduo em cada classe de local.....	58
Tabela 4 -Percentual volume obtido conforme o número de toras geradas por indivíduo e por classe de local	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas de índices de local para um povoamento de clone de eucalipto não desbastado, com idade-índice de 84 meses, na região centro oeste de Minas Gerais.....	12
Figura 2 - Valores estimados e observados, distribuição do erro (%) e histograma de frequência do erro (%) utilizando a equação hipsométrica 27.	13
Figura 3 - Frequência diamétrica observada e estimada para a primeira e última medições, para cada classe de capacidade produtiva, projetos e unidades de manejo, selecionadas aleatoriamente.	14
Figura 4 - Valores observados e estimativas de $Dmin_2$, distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.	22
Figura 5 - Valores estimados e recuperados de γ_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.	26
Figura 6 - Valores observados e estimativas de $Dmax_2$, distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.	30
Figura 7 - Valores estimados e recuperados de β_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.	34
Figura 8 - Valores observados e estimados de N_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.	38
Figura 9 - Valores observados e estimados de Ht_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.	42
Figura 10 - Diâmetro observado <i>versus</i> diâmetro estimado conforme modelo de Garay, distribuição dos erros percentuais e histograma de frequência de erros percentuais.	46
Figura 11 - Valores observados e estimativas de dap_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%), conforme o Modelo 1.	50
Figura 12 - Valores observados e estimativas de dap_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%), conforme o Modelo 2.....	54
Figura 13 - Número médio de toras comerciais, de 6 m de comprimento e diâmetro comercial maior ou igual a 7 cm, por classe de diâmetro e por projeto, e identificação do dap mínimo para geração de toras comerciais por classe de capacidade produtiva.	59

RESUMO

GOMIDE, Cintia Ribeiro. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2016. **Determinação do número de toras comerciais destinadas à produção de celulose aplicando um modelo de distribuição diamétrica e equação de *taper*.** Orientador: Helio Garcia Leite. Coorientador: Carlos Pedro Boechat Soares.

O conhecimento da distribuição diamétrica de um povoamento de eucalipto, associado à aplicação de equações de afilamento do fuste propiciam informações acerca do número de toras vinculadas às dimensões especificadas de um determinado produto. O objetivo deste estudo foi obter a distribuição de diâmetros, bem como, ajustar um modelo de distribuição diamétrica e de *taper*, visando determinar o número de toras com dimensões comerciais relacionadas à produção de celulose. Ademais, identificar o *dap* mínimo, aos 84 meses, que permita obter pelo menos uma tora com as dimensões aludidas e testar modelos para a projeção do *dap*. Foram utilizados dados provenientes de parcelas permanentes de inventário florestal contínuo. A partir da classificação da capacidade produtiva, selecionaram-se 12 projetos, sendo um por classe de local (I, II e III) e um por região (A, B, C e D). Para estimar a distribuição diamétrica em idades atuais e futuras ajustou-se a função Weibull de dois parâmetros. Para correlacionar atributos do povoamento e parâmetros da função densidade de probabilidade foram ajustados modelos constituídos pelas seguintes variáveis: idade, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, número de árvores, altura dominante e combinações dessas variáveis. O modelo de *taper* ajustado foi o proposto por Garay. Foram testados dois modelos para a projeção do *dap*. A distribuição diamétrica estimada seguiu a distribuição observada, assim como, o ajuste das equações do modelo de distribuição diamétrica mostrou-se adequado aos dados. A equação de afilamento ajustada forneceu estimativas precisas quanto à altura relativa aos diâmetros dos centros de classes da distribuição diamétrica, possibilitando calcular o número de toras comerciais por classe e, ainda, identificar o *dap* mínimo a partir do qual é possível obter pelo menos uma tora comercial. Os modelos testados para estimar o crescimento em *dap* ajustaram-se bem aos dados. A metodologia proposta revelou ser consistente e viabiliza estudos para melhorias de modelos de planejamento florestal.

ABSTRACT

GOMIDE, Cintia Ribeiro. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February of 2016. **Determining the number of commercial logs for the production of cellulose applying a diametric distribution model and *taper* equation.** Adviser: Helio Garcia Leite. Co-adviser: Carlos Pedro Boechat Soares.

Knowledge of the diameter distribution of a eucalyptus stand, associated with the application of *taper* functions provide information about the number of logs linked to a particular product dimensions. The objective of this study was to obtain the distribution of diameters as well, fit a model of diameter distribution and *taper*, in order to determine the number of logs with commercial aspects related to pulp production. Besides, identifying the minimum *dap*, at 84 months, able to provide at least a log with the aforementioned dimensions and test models for the projection of *dap*. The data used in this study were originated from permanent plots of continuous forest inventories. From the productive capacity rating, were selected 12 projects, one per class of site index (I, II and III) and one per region (A, B, C and D). To estimate the diameter distribution of current and future age the Weibull function of two parameters was adjusted. In order to correlate attributes of the stand and parameters of the probability density function were adjusted models consisting of the following variables: age, maximum diameter, minimum diameter, number of trees, dominant height and combinations of these variables. The adjusted *taper* model was proposed by Garay. Two models for the projection of *dap* were tested. The estimated diameter distribution followed the observed distribution as well as the adjustment of the diametric distribution model equations was adequate to the data. The *taper* equation provided accurate estimates of the height relative to diameter of center classes of the diameter distribution, making it possible to calculate the number of commercial logs per class and also to identify the minimum *dap* from which you can get at least one log commercial. The models tested to estimate the growth *dap* set up well to the data. The proposed methodology proved to be consistent and enables studies to improve forest planning models.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a dinâmica de crescimento de povoamentos equiâneos e florestas inequiâneas é de fundamental importância para avaliações técnicas e econômicas de projetos de manejo. No setor florestal são utilizados modelos estatísticos, equações, tabelas ou gráficos e redes neurais artificiais (RNA's) que exercem a função de estimar o crescimento e produção, sendo essenciais na avaliação de alternativas de manejo (CAMPOS E LEITE, 2013).

Esses modelos são selecionados conforme o objetivo do manejador, o grau de detalhamento desejado e o tipo de dados disponíveis, sendo classificados conforme o nível de resolução em: modelos em nível de povoamento, modelos de distribuição por classe de diâmetro e modelos em nível de árvores individuais (DAVIS e JOHNSON, 1987).

Os modelos de distribuição de diâmetros (MDD) estimam o número de árvores por hectare por classe de diâmetro nas idades presente e futura, permitem o planejamento de utilização de multiprodutos e avaliações econômicas, sendo flexíveis para a simulação de desbaste (NOGUEIRA, 2003; CAMPOS e LEITE, 2013).

Dentre esses modelos destacam-se aqueles que são baseados em funções densidade de probabilidade e em matrizes de probabilidade de transição (CAMPOS E LEITE, 2013; SOARES et al., 2009). No entanto, a projeção da distribuição de diâmetros é comumente realizada utilizando-se uma função densidade de probabilidade (fdp), que descreve o comportamento ou padrão de variação de uma variável contínua. Ressaltam-se as funções: Johnson, Lognormal, Logística, Generalizada, Gompertz, Hiperbólica, Gumbel, Beta, Weibull.

A função Weibull, tem sido a mais utilizada e essa preferência pode ser justificada pela flexibilidade dessa função que ajusta-se a diferentes distribuições, além disso, existe em várias formas, com dois, três ou quatro parâmetros, com ou sem truncamento, tanto à esquerda, como à direita. Citam-se ainda como propriedades importantes, a facilidade de ajustamento e a de correlacionar seus parâmetros a atributos do povoamento (MURTHY et al., 2004; CAMPOS E LEITE, 2013).

Os estudos mostrando a aplicação de MDD, realizados até a década de 1990, em sua maioria utilizavam dados de povoamentos não desbastados e principalmente

de *Pinus*. Até então, havia carência de dados confiáveis e pouco interesse na produção de árvores de eucalipto de grande porte. Os trabalhos de Nogueira et al. (2005) e Binoti et al. (2010) propuseram modelos de distribuição diamétrica para povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste, e Leite et al. (2006), desenvolveram um modelo para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbastes.

O interesse por madeiras de qualidade elevada, pela diversificação de produtos e otimização do aproveitamento de matéria-prima, tem instigado estudos relacionados à produção destinada à multiprodutos. Portanto, ao associar a distribuição diamétrica aos modelos de *taper*, é possível estimar a produção em volume por classe de diâmetro.

O emprego de um MDD muitas vezes vem acompanhado do uso de modelos de afilamento do fuste (*taper*). Segundo Prodan (1997), os modelos de *taper* ou afilamento, que descrevem o perfil longitudinal do fuste, permitem estimar três atributos: o diâmetro em qualquer ponto do fuste; altura total e a altura em que se encontra um determinado diâmetro e o volume entre dois pontos quaisquer.

Dentre os vários modelos de afilamento existentes, Lima (1986) destacou: os modelos polinomiais, como exemplo, o modelo de Kozak et al. (1969); os modelos sigmoidais, representados pelos modelos desenvolvidos por Garay (1979) e Biging (1984); os modelos compatíveis, destacando o modelo de Demaerschalk (1972); e os modelos segmentados que são constituídos de sub-modelos justapostos, como o modelo de Max e Burkhart (1976).

No Brasil, existem trabalhos empregando a metodologia tanto para povoamentos equiâneos (SOARES et al., 2003; SOUZA et al., 2008; LEITE et al., 2011; CAMPOS et al., 2014), como para povoamentos inequiâneos (BATISTA et al., 2004; SCOLFORO et al., 2004; LEITE et al., 2006; SOARES et al., 2011).

Soares (2002), destacou a utilização de equações de *taper* a fim de obter informações sobre o número de toras vinculadas as dimensões mínimas exigidas por cada produto, suscitando, assim, conhecimentos para o planejamento de produção, logística de transporte e comercialização da madeira. Esta aplicação é importante, também, para gerar informações acerca de plantios destinados à produção de um único sortimento. Por exemplo, o emprego de equações de afilamento visando determinar o número possível de toras obtidas por classe diamétrica, considerando

padrões comumente estabelecidos para celulose, ou seja, processamento do fuste em toras de 6 m.

Devido à competição por fatores de crescimento, é possível afirmar que nem todos os indivíduos de um povoamento alcançarão o porte necessário para fornecimento de produtos com os atributos aludidos. Para classificar os indivíduos quanto à sua capacidade de conversão no produto desejado, devem-se estabelecer parâmetros, como o *dap* (diâmetro a 1,3 m de altura) mínimo a ser apresentado na idade de realização do corte.

O estabelecimento dos parâmetros e a quantificação do número de toras podem ser obtidos através da utilização simultânea das metodologias supracitadas, ou seja, o conhecimento da distribuição diamétrica de um povoamento e a estimativa do número de toras de determinado tamanho existentes até um dado diâmetro comercial.

Adicionalmente, é importante identificar aqueles indivíduos que não atingirão o limite de *dap* mínimo estabelecido para cada povoamento, através do emprego de modelos para estimar o *dap*, em uma idade futura, a partir de dados atuais. Destarte, nas primeiras medições do inventário florestal contínuo, ao conhecer a proporção de aproveitamento de um plantio, pode-se incluir nos modelos de planejamento alternativas rentáveis a esses indivíduos de menor porte.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral dessa dissertação foi determinar o número de toras comerciais destinadas a produção de celulose aplicando um modelo de distribuição diamétrica e equação de *taper* em povoamentos de eucalipto.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- Classificar povoamentos de clones de eucalipto localizados na região centro-oeste de Minas Gerais, quanto à capacidade produtiva;
- Modelar a distribuição diamétrica e ajustar um modelo para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de eucalipto;
- Ajustar um modelo de *taper*, visando determinar o número de toras comerciais de 6 m obtidas por classe diamétrica e por classe de capacidade produtiva; e
- Testar modelos para a projeção do *dap*.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição dos dados

No desenvolvimento desse estudo foram utilizados dados provenientes de inventários florestais contínuos (IFC) realizados anualmente entre os anos de 2006 e 2013, em povoamentos de clones de eucalipto, localizados na região centro-oeste de Minas Gerais. A região apresenta um clima quente e distribuição de chuvas irregular, tornando a exploração florestal arriscada, fazendo-se necessário o desenvolvimento de metodologias para otimização do processo florestal.

Para execução do IFC foram instaladas parcelas permanentes, com aproximadamente 300 m² de área. A base de dados, composta por 11.030 parcelas, apresentava os seguintes atributos: idade (meses), altura de três árvores dominantes e altura das três primeiras árvores de cada parcela. As alturas das demais árvores das parcelas foram estimadas empregando equações hipsométricas. Os dados foram processados em nível de parcela, contemplando as seguintes variáveis: média das alturas das árvores dominantes, área basal e volume comercial com casca para um diâmetro maior ou igual a 4 cm (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos em nível de parcela, observados em povoamentos de clones de eucalipto localizados na região centro-oeste de Minas Gerais

Variáveis	Amplitude			Desvio-padrão
	Mínimo	Máximo	Média	
Idade (meses)	19	102	52	18,9
Altura dominante (m)	6,3	37,2	23,1	5,6
Área Basal (m ² ha ⁻¹)	1,43	34,71	17,53	5,99
Volume (m ³ ha ⁻¹)	4,00	452,43	178,40	91,25

Atualmente os povoamentos são conduzidos com ciclos de até dois cortes, onde se tem um plantio seguido de condução por talhadia, ou seja, regime de alto-fuste (AF) e primeira talhadia (TA), sem aplicação de desbaste.

3.2. Classificação da capacidade produtiva

A classificação da capacidade produtiva dos povoamentos foi feita pelo método da curva-guia (CAMPOS e LEITE, 2013), utilizando uma idade-índice de 84 meses e a forma linearizada do modelo de Schumacher:

$$\ln Hd = \beta_0 + \beta_1 I^{-1} + \varepsilon \quad (1)$$

em que:

Hd = altura dominante, em m;

I = idade, em meses;

\ln = logaritmo neperiano;

β_i = parâmetros; e

ε = erro aleatório, com média zero e variância constante.

Para determinação de classes de local foram utilizadas as médias dos índices de local determinados nas três últimas medições de cada parcela, a fim de garantir mais consistência aos resultados da classificação. A partir dessas classes foram selecionados 12 projetos, sendo 4 por classe e 3 por Região totalizando 197 unidades de manejo (talhões). Definiu-se que todos os projetos selecionados deveriam apresentar no mínimo 10 parcelas, e estas, 5 ou mais medições, totalizando 298 parcelas (Tabela 2).

Tabela 2 - Número de parcelas por região e por classe de local, em povoamentos de clones de eucalipto na região Centro-Oeste de Minas Gerais

Classes de capacidade produtiva	Regiões				Total	%
	A	B	C	D		
Classe I	29	37	12	16	94	31,5
Classe II	33	33	28	23	117	39,3
Classe III	16	12	17	42	87	29,2
Total	78	82	57	81	298	100,0

3.3. Estimação da altura total

A relação entre a altura das árvores e demais atributos do povoamento define os modelos hipsométricos. Os modelos mais simples apresentam a altura como variável dependente e o *dap* como variável independente. Entretanto, para gerar estimativas mais precisas é comum a adição de outros parâmetros do povoamento como: altura dominante (*Hd*), o índice de local (*S*) e idade (*I*).

Para estimar a altura das árvores foram testados os modelos utilizados por Nogueira (2003):

$$\ln Ht = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 dap^{-1} + \beta_3 \ln I + \varepsilon \quad (2)$$

$$Ht = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 dap + \beta_3 S + \varepsilon \quad (3)$$

$$Ht = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 S + \beta_3 \ln(I dap) + \varepsilon \quad (4)$$

$$\ln Ht = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 Hd + \beta_3 dap^{-1} + \varepsilon \quad (5)$$

$$Ht = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 S \ln I + \varepsilon \quad (6)$$

em que:

Ht = altura total da árvore, em m;

Hd = média das alturas totais das árvores dominantes, em m;

dap = diâmetro a 1,30 m de altura, em cm;

S = índice de local, em m;

I = idade, em meses;

ln = logaritmo neperiano;

β_i = parâmetros a serem estimados; e

ε = erro aleatório, com média zero e variância constante.

A escolha da melhor equação foi feita com base em análises gráficas de resíduos e no coeficiente de determinação ajustado, calculado na unidade original.

3.4. Frequências diamétricas estimadas

A função densidade de probabilidade Weibull com dois parâmetros foi ajustada para cada parcela, em cada idade:

$$\left\{ \begin{array}{ll} f(x) = \left(\frac{\gamma}{\beta}\right) \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma} & \text{para } x \geq 0 \\ f(x) = 0 & \text{para } x < 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

A função densidade acumulada é dada por:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma} \quad (8)$$

em que:

β = parâmetro de escala;

γ = parâmetro de forma; e

x = centro da classe de diâmetro, sendo $x \geq 0$, $\beta > 0$ e $\gamma > 0$.

O ajuste da função Weibull foi feito pelo método da máxima verossimilhança, utilizando o software FitFD (BINOTI, 2012). Para isto, os dados foram agrupados em classes de diâmetro com amplitude de 1 cm.

Aplicou-se o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov para verificar se a distribuição diamétrica observada seguia a distribuição Weibull, em nível de 5% de probabilidade:

$$D = \max |Fo(x) - Fe(x)| \quad (9)$$

em que:

D = diferença máxima absoluta

Fo(x) e Fe(x) = frequência observada acumulada e esperada, respectivamente.

O valor $D_{\text{calculado}}$ foi comparado com o valor $D_{\text{referência}}$, sendo que, nos casos em que o valor crítico é maior que o valor calculado se aceita a hipótese de que a variável em estudo adere-se ao modelo de distribuição testado.

3.5. Modelo de distribuição diamétrica

A partir de adaptações realizadas no Sistema de Equações 2, proposto por Nogueira (2003), foram ajustados os modelos a seguir, pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o software Statistica (STATSOFT, INC, 2016).

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \theta_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) \beta_1 + \varepsilon \quad (10)$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \theta_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \varepsilon \quad (11)$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \theta_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) \beta_1 + \varepsilon \quad (12)$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \theta_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) Dmax_2 + \varepsilon \quad (13)$$

$$\ln N_2 = \theta_5 + \theta_6 I_1 + \theta_7 N_1 + \varepsilon \quad (14)$$

$$\ln Ht = \theta_8 + \theta_9 I + \theta_{10} Hd + \theta_{11} dap^{-1} + \varepsilon \quad (15)$$

em que:

I_2 = idade futura, em meses;

I_1 = idade atual, em meses;

γ_2 = parâmetro de forma da função Weibull em uma idade futura;

γ_1 = parâmetro de forma da função Weibull em uma idade atual;

β_2 = parâmetro de escala função Weibull em uma idade futura;

β_1 = parâmetro de escala da função Weibull em uma idade atual;

$Dmax_2$ = diâmetro máximo em uma idade futura, em cm;

$Dmax_1$ = diâmetro máximo em uma idade atual, em cm;

$Dmin_2$ = diâmetro mínimo em uma idade futura, em cm;

$Dmin_1$ = diâmetro mínimo em uma idade atual, em cm;

N_2 = número de árvores por ha em uma idade futura;

N_1 = número de árvores por ha em uma idade atual;

\ln = logaritmo neperiano;

θ_i = parâmetros; e

ε = erros aleatórios independentes, com média zero e variância constante.

A distribuição diamétrica foi projetada a cada intervalo de 12 meses, bem como, da primeira medição para 84 meses, sempre partindo de uma distribuição observada. Realizou-se a validação da projeção selecionando dados observados de 42 parcelas nas idades entre 82 e 86 meses, comparando graficamente à distribuição projetada dessas parcelas.

3.6. Modelo de afilamento do fuste (*taper*)

Com finalidade de determinar o número de toras comerciais por classe diamétrica e o dap mínimo a partir do qual é possível obtê-las, foi ajustado o modelo de Garay (1979):

$$\frac{d}{dap} = \beta_0(1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} Ht^{-\beta_3})) + \varepsilon \quad (16)$$

em que:

d_i = diâmetro comercial na altura h_i (cm);
 dap = diâmetro a 1,30 m de altura (cm);
 β_i = parâmetro a ser estimado ($i = 0, 1, 2$ e 3);
 h_i = altura em que ocorre o diâmetro comercial d (m);
 Ht = altura total (m); e
 ε = erro aleatório supostamente com média zero e variância constante.

Para ajustamento do modelo 16 foram utilizados dados de 20 árvores-amostra abatidas para cubagem, com dap variando de 9,6 a 37,8 cm, e altura total de 17,8 a 46,6 m. Nessas árvores, foram medidos os diâmetros nas alturas comerciais de 0,1; 0,5; 1 e 2 m e, a partir daí, a cada 2 m, até um diâmetro de 4 cm.

3.7. Projeção do diâmetro (dap)

A fim de estimar o dap de uma árvore em uma determinada idade futura, foram ajustados modelos para projeção do dap , baseados na medição atual desse atributo e nas idades atual e futura. Foram testados os modelos:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-\alpha_0((I_2^{\alpha_1}) - (I_1^{\alpha_1})))} + \varepsilon \quad (17)$$

$$\ln dap_2 = \ln dap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \varepsilon \quad (18)$$

em que:

dap_1 = diâmetro a 1,30 m de altura (cm) na idade atual;

dap_2 = diâmetro a 1,30 m de altura (cm) na idade futura;

I_1 = idade atual, em meses;

I_2 = idade futura, em meses;

α_i = parâmetro a ser estimado ($i = 0, 1$ e 2);

\ln = logaritmo neperiano;

ε = erro aleatório supostamente com média zero e variância constante.

3.8. Avaliação das estimativas

A avaliação da precisão das estimativas das equações foi feita pela análise das estatísticas a seguir, conforme KVÅLSETH (1985), bem como a partir de

análises gráficas dos resíduos. Foram construídos gráficos de resíduos e gráficos relacionando os atributos estimados e os dados observados em campo.

$$R^2 = \left[1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \right] \quad (19)$$

$$\bar{R}^2(\%) = \left[1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) (1 - R^2) \right] 100 \quad (20)$$

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n-p-1}} \quad (21)$$

$$Erro (\%) = \frac{(\hat{y} - y)}{y} 100 \quad (22)$$

em que:

n = número de observações;

p = número de variáveis independentes;

y = valores observados da variável dependente;

\bar{y} = média aritmética simples dos valores observados da variável dependente; e

\hat{y} = valores estimados da variável dependente.

4. RESULTADOS

4.1. Classificação da capacidade produtiva

Na Figura 1 é apresentada a tendência de crescimento da altura dominante observada e estimada, e as curvas de índices de local construídas pelo método da curva-guia, destacando as três classes de local definidas. Utilizou-se uma idade-índice igual a 84 meses e a equação ajustada foi:

$$\ln Hd = 3,6666 - 23,9868I^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,7929 \quad (23)$$

$$S_{y,x} = 2,91$$

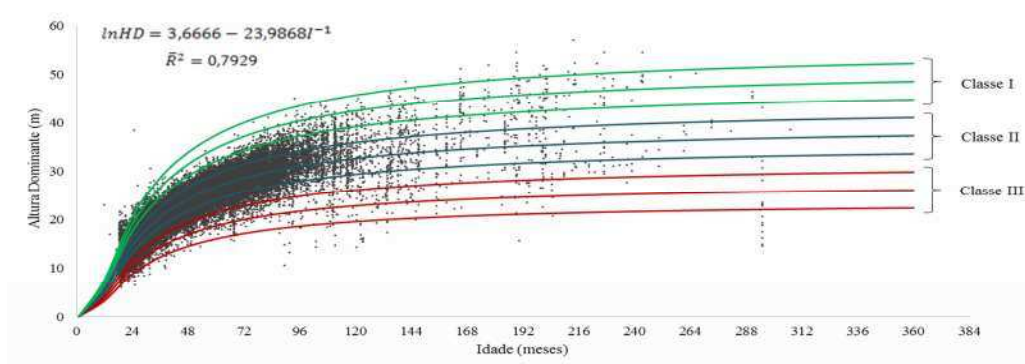


Figura 1 - Curvas de índices de local para um povoamento de clone de eucalipto não desbastado, com idade-índice de 84 meses, na região centro oeste de Minas Gerais.

4.2. Estimativas da altura total

Na Figura 2 é apresentada a relação entre a altura total observada e estimada para a equação selecionada (27). As equações ajustadas, com os respectivos coeficientes de determinação ajustados e o erro padrão da estimativa foram:

$$\ln Ht = 1,3895 + 0,0257S - 6,6048dap^{-1} + 0,3551\ln I \quad \bar{R}^2 = 0,9208 \quad (24)$$

$$S_{y,x} = 1,49$$

$$Ht = -12,3262 + 0,1282I + 0,8222dap + 0,5207S \quad \bar{R}^2 = 0,9004 \quad (25)$$

$$S_{y,x} = 1,67$$

$$Ht = -55,7412 - 0,0487I + 0,5775S + 9,6463\ln(I \text{ dap}) \quad \bar{R}^2 = 0,9121 \quad (26)$$

$$S_{y,x} = 1,57$$

$$\ln Ht = 2,7830 - 0,0009I + 0,0331Hd - 6,3062dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9513$$

$$S_{y,x} = 1,17 \quad (27)$$

$$Ht = -10,4165 + 0,8745dap + 0,1710SlnI \quad \bar{R}^2 = 0,8945$$

$$S_{y,x} = 1,72 \quad (28)$$

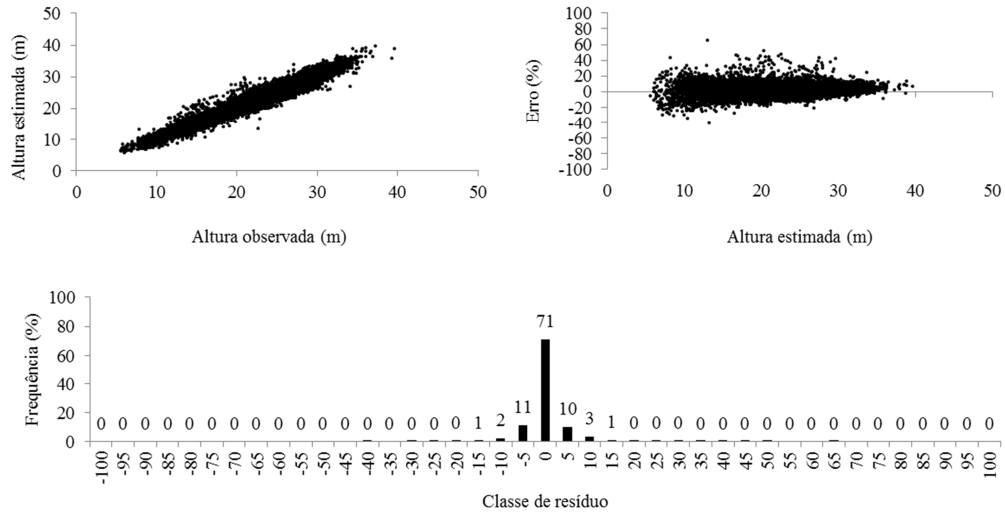


Figura 2 - Valores estimados e observados, distribuição do erro (%) e histograma de frequência do erro (%) utilizando a equação hipsométrica 27.

4.3. Frequência diamétrica observada e estimada

Para apresentar as distribuições diamétricas observadas e estimadas pelo ajuste da função Weibull de dois parâmetros foi selecionado, aleatoriamente, um talhão por projeto (Figura 3). O teste de aderência Kolmogorov-Smirnov, apresentou resultados não significativos para 72,8% das parcelas.

4.4. Modelos de distribuição diamétrica

As equações do modelo de distribuição diamétrica são apresentadas a seguir, por projeto, com seus respectivos coeficientes de determinação ajustados e erro padrão da estimativa.

Nas Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9 estão as relações entre as variáveis observadas e estimadas, bem como a relação entre os parâmetros β e γ estimados pela função Weibull e recuperados através do modelo de distribuição diamétrica.

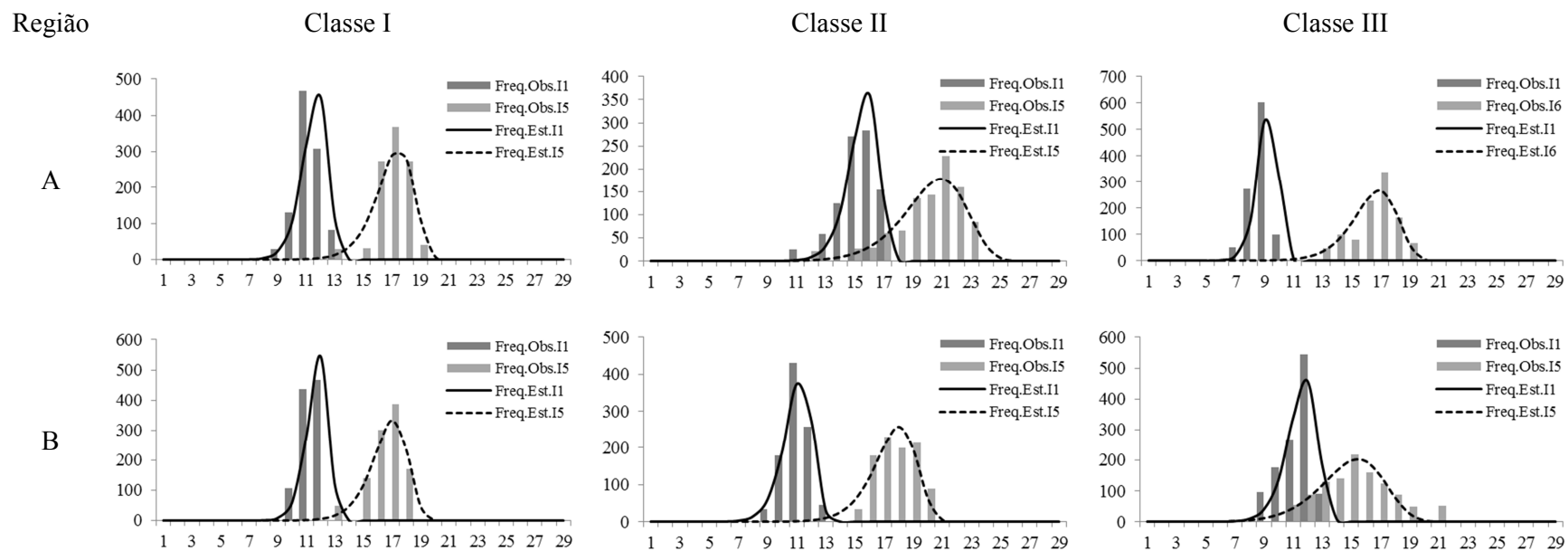


Figura 3 - Frequência diamétrica observada e estimada para a primeira e última medições, para cada classe de capacidade produtiva, projetos e unidades de manejo, selecionadas aleatoriamente.

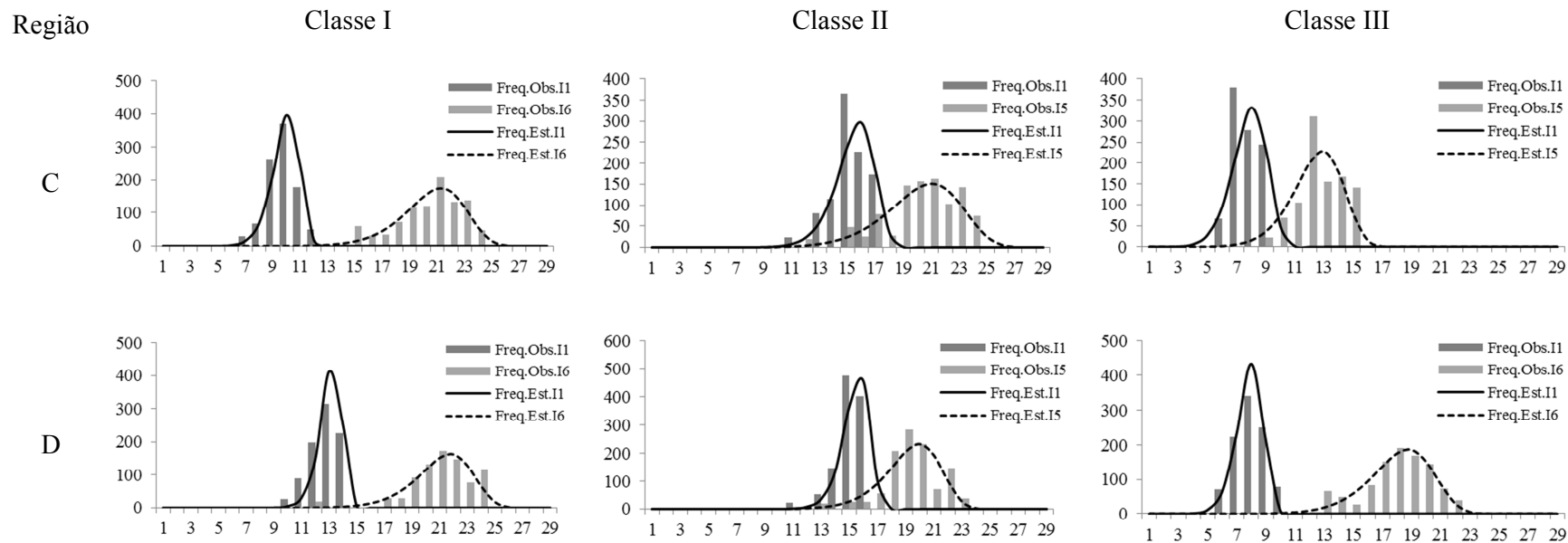


Figura 3 – Continuação.

Projeto A1:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,830956 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7099 \quad (29)$$

$$S_{y,x} = 1,12$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 10,80677 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,6730 \quad (30)$$

$$S_{y,x} = 3,00$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,76536 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7015 \quad (31)$$

$$S_{y,x} = 1,17$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,227508 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,8813 \quad (32)$$

$$S_{y,x} = 0,56$$

$$\ln N_2 = 6,012980 + 0,000735I_1 + 0,000855N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,4068 \quad (33)$$

$$S_{y,x} = 75,57$$

$$\ln Ht = 2,69003 - 0,000002232I + 0,03335Hd + -5,81851dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9674 \quad (34)$$

$$S_{y,x} = 4,58$$

Projeto A2:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,709866 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8801 \quad (35)$$

$$S_{y,x} = 0,86$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 6,132607 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,5340 \quad (36)$$

$$S_{y,x} = 3,26$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,671468 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9073 \quad (37)$$

$$S_{y,x} = 0,69$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,192652 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9178 \quad (38)$$

$$S_{y,x} = 0,49$$

$$\ln N_2 = 5,914903 + 0,001094I_1 + 0,0009337N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9250 \quad (39)$$

$$S_{y,x} = 24,28$$

$$\ln Ht = 2,72899 - 0,0008828I + 0,03432Hd - 6,14825dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9435 \quad (40)$$

$$S_{y,x} = 4,37$$

Projeto A3:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,812906 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7570 \quad (41)$$

$$S_{y,x} = 1,06$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 11,49912 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,4558 \quad (42)$$

$$S_{y,x} = 2,49$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,789077 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8030 \quad (43)$$

$$S_{y,x} = 1,14$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,321863 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9353 \quad (44)$$

$$S_{y,x} = 0,59$$

$$\ln N_2 = 6,017695 - 0,000753I_1 + 0,000924N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9209 \quad (45)$$

$$S_{y,x} = 22,08$$

$$\ln Ht = 2,78124 + 0,0003513I + 0,02955Hd - 6,1427dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9279 \quad (46)$$

$$S_{y,x} = 6,17$$

Projeto B1:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,781909 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8551 \quad (47)$$

$$S_{y,x} = 0,85$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 10,23765 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,7269 \quad (48)$$

$$S_{y,x} = 3,01$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,605595 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8572 \quad (49)$$

$$S_{y,x} = 0,87$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,099093 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,8905 \quad (50)$$

$$S_{y,x} = 0,49$$

$$\ln N_2 = 5,965593 - 0,000807I_1 + 0,000976N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8787 \quad (51)$$

$$S_{y,x} = 28,36$$

$$\ln Ht = 2,83716 - 0,0012746I + 0,0332Hd - 6,68199dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9389 \quad (52)$$

$$S_{y,x} = 4,27$$

Projeto B2:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,771725 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7628 \quad (53)$$

$$S_{y,x} = 1,15$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 12,40069 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,5936 \quad (54)$$

$$S_{y,x} = 3,11$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,653954 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8716 \quad (55)$$

$$S_{y,x} = 0,84$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,166267 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9289 \quad (56)$$

$$S_{y,x} = 0,45$$

$$\ln N_2 = 5,713163 - 0,001007I_1 + 0,001219N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8513 \quad (57)$$

$$S_{y,x} = 35,95$$

$$\ln Ht = 2,87284 - 0,00098233I + 0,03046Hd - 6,33256dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9419 \quad (58)$$

$$S_{y,x} = 5,24$$

Projeto B3:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,698694 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7400 \quad (59)$$

$$S_{y,x} = 0,73$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 7,218951 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,7528 \quad (60)$$

$$S_{y,x} = 1,73$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,598526 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7243 \quad (61)$$

$$S_{y,x} = 1,16$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,068114 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,8522 \quad (62)$$

$$S_{y,x} = 0,78$$

$$\ln N_2 = 5,922644 + 0,000464I_1 + 0,000938N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8218 \quad (63)$$

$$S_{y,x} = 51,30$$

$$\ln Ht = 2,89629 + 0,00062660I + 0,02517Hd - 6,49792dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9467 \quad (64)$$

$$S_{y,x} = 4,80$$

Projeto C1:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,750589 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7890 \quad (65)$$

$$S_{y,x} = 1,14$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 13,07262 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,6162 \quad (66)$$

$$S_{y,x} = 2,79$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,634488 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8246 \quad (67)$$

$$S_{y,x} = 0,98$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,259181 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9152 \quad (68)$$

$$S_{y,x} = 0,56$$

$$\ln N_2 = 6,064281 - 0,000334I_1 + 0,000858N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8576 \quad (69)$$

$$S_{y,x} = 21,25$$

$$\ln Ht = 2,80141 - 0,0025647I + 0,03669Hd - 6,86884dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9628 \quad (70)$$

$$S_{y,x} = 5,01$$

Projeto C2:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,783315 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8541 \quad (71)$$

$$S_{y,x} = 0,98$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 9,071569 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,7455 \quad (72)$$

$$S_{y,x} = 2,44$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,731443 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9268 \quad (73)$$

$$S_{y,x} = 0,73$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,178427 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9382 \quad (74)$$

$$S_{y,x} = 0,49$$

$$\ln N_2 = 5,935372 + 0,000060I_1 + 0,000971N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9375 \quad (75)$$

$$S_{y,x} = 19,97$$

$$\ln Ht = 2,90158 - 0,0012532I + 0,0308Hd - 7,21164dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9344 \quad (76)$$

$$S_{y,x} = 4,38$$

Projeto C3:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,934727 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8507 \quad (77)$$

$$S_{y,x} = 0,87$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 14,62092 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,6129 \quad (78)$$

$$S_{y,x} = 2,92$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,709691 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9134 \quad (79)$$

$$S_{y,x} = 0,65$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,23554 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9445 \quad (80)$$

$$S_{y,x} = 0,47$$

$$\ln N_2 = 5,961566 - 0,000421I_1 + 0,000959N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9483 \quad (81)$$

$$S_{y,x} = 18,61$$

$$\ln Ht = 2,66392 + 0,00025594I + 0,03333Hd - 5,55603dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9644 \quad (82)$$

$$S_{y,x} = 4,36$$

Projeto D1:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,793802 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8530 \quad (83)$$

$$S_{y,x} = 0,78$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 9,55638 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,6905 \quad (84)$$

$$S_{y,x} = 2,84$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,658699 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9266 \quad (85)$$

$$S_{y,x} = 0,68$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,186706 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9537 \quad (86)$$

$$S_{y,x} = 0,41$$

$$\ln N_2 = 5,876084 - 0,000027I_1 + 0,001030N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9666 \quad (87)$$

$$S_{y,x} = 11,42$$

$$\ln Ht = 2,89414 - 0,00078684I + 0,02959Hd - 6,8702dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9531 \quad (88)$$

$$S_{y,x} = 4,57$$

Projeto D2:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,701239 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7969 \quad (89)$$

$$S_{y,x} = 0,93$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 10,72837 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,5434 \quad (90)$$

$$S_{y,x} = 2,70$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,663687 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9043 \quad (91)$$

$$S_{y,x} = 0,60$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,228214 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9160 \quad (92)$$

$$S_{y,x} = 0,45$$

$$\ln N_2 = 6,024042 + 0,000140I_1 + 0,000879N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,9736 \quad (93)$$

$$S_{y,x} = 17,62$$

$$\ln Ht = 2,7917 - 0,0010071I + 0,03249Hd - 6,13286dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9514 \quad (94)$$

$$S_{y,x} = 4,29$$

Projeto D3:

$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 0,968302 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,6337 \quad (95)$$

$$S_{y,x} = 1,16$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 13,18735 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,5185 \quad (96)$$

$$S_{y,x} = 3,73$$

$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,875366 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad \bar{R}^2 = 0,8242 \quad (97)$$

$$S_{y,x} = 1,13$$

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 1,270295 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 \quad \bar{R}^2 = 0,9158 \quad (98)$$

$$S_{y,x} = 0,64$$

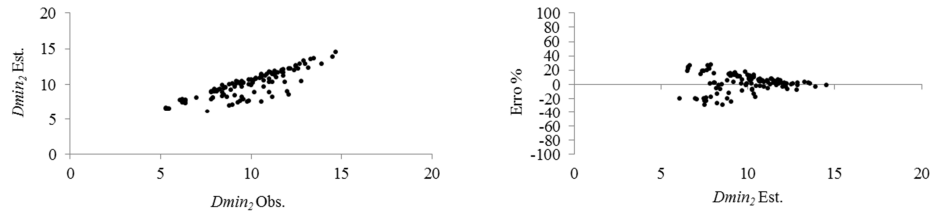
$$\ln N_2 = 6,184121 - 0,001147I_1 + 0,000780N_1 \quad \bar{R}^2 = 0,7257 \quad (99)$$

$$S_{y,x} = 46,05$$

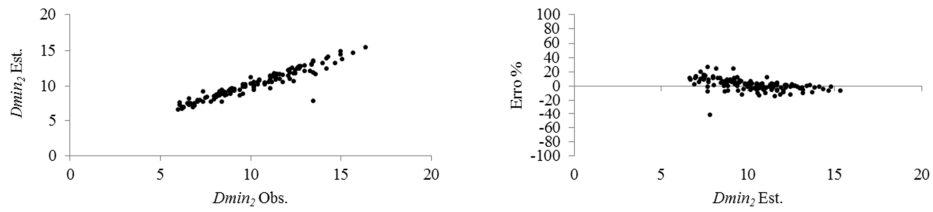
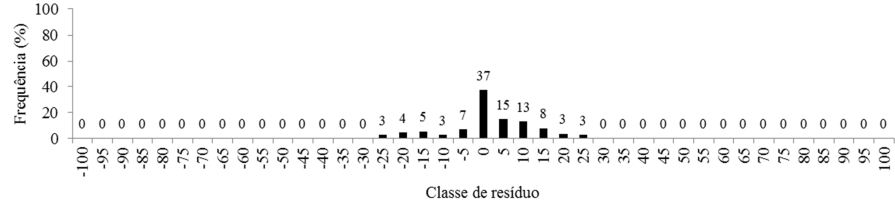
$$\ln Ht = 2,73484 - 0,00074595I + 0,03475Hd - 6,40317dap^{-1} \quad \bar{R}^2 = 0,9689 \quad (100)$$

$$S_{y,x} = 4,49$$

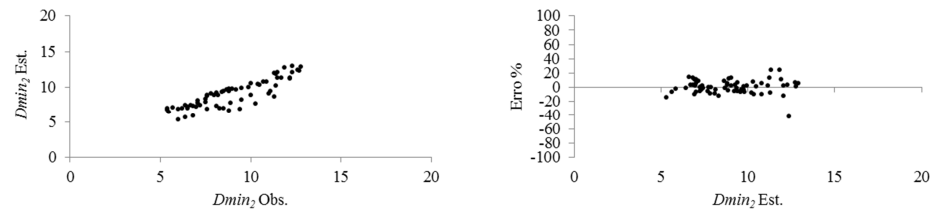
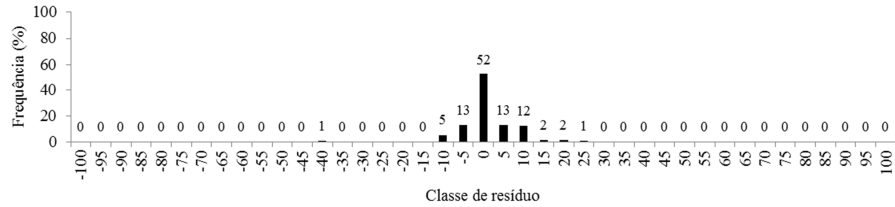
$$Dmin_2 = Dmin_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \theta_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + \varepsilon$$



A1



A2



A3

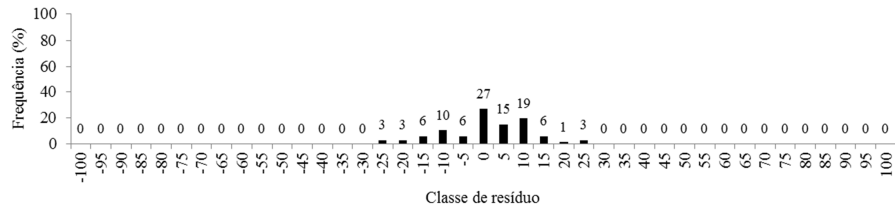


Figura 4 - Valores observados e estimativas de $Dmin_2$, distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.

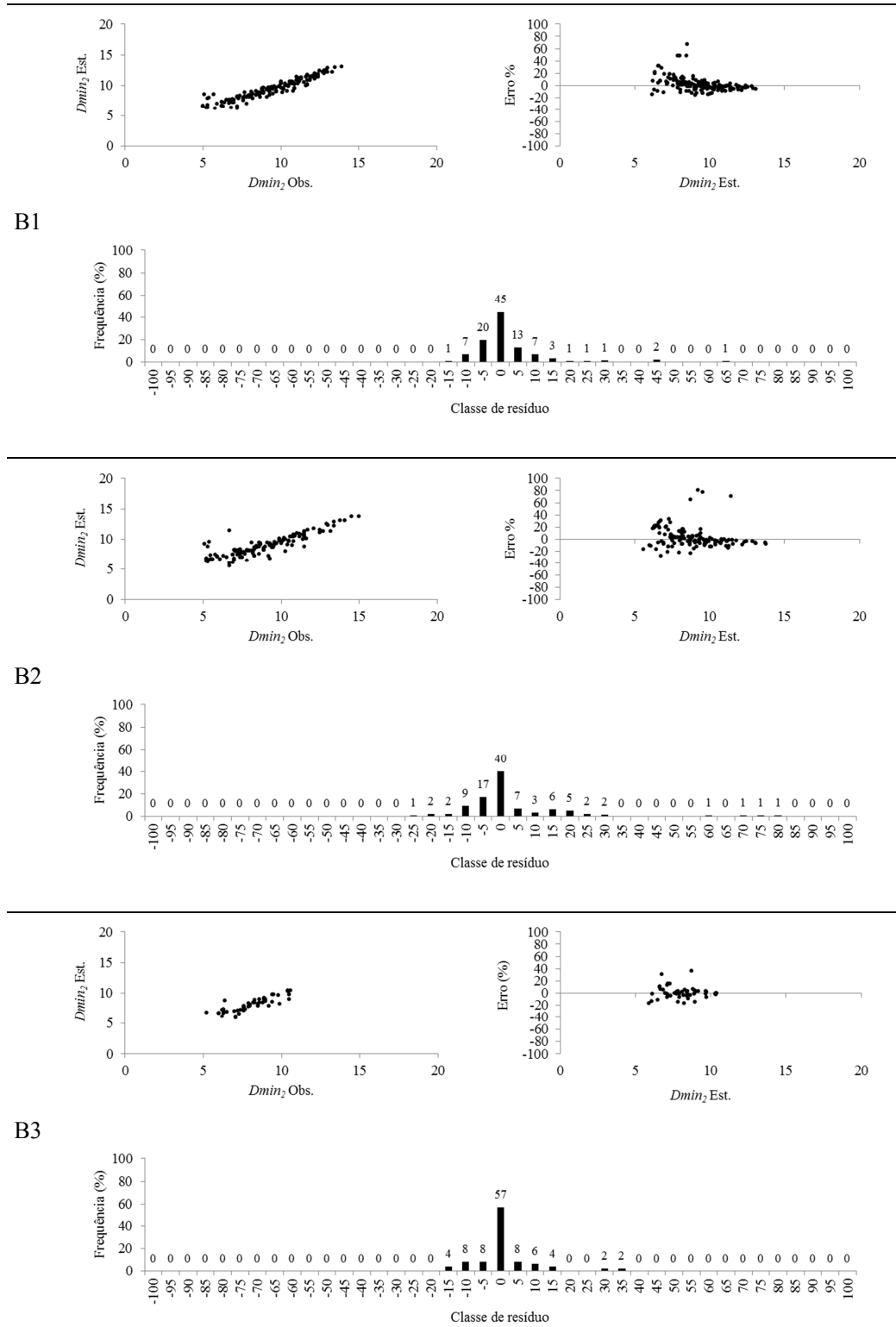
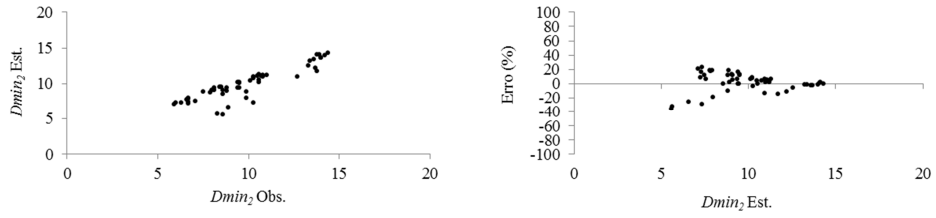
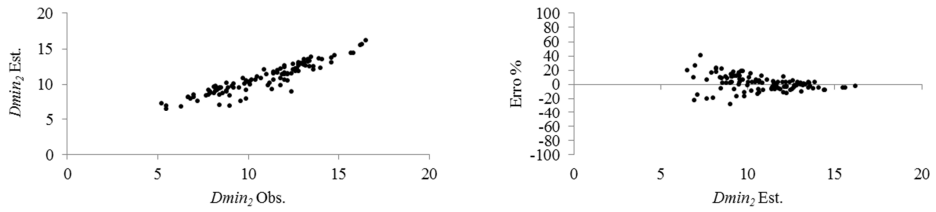
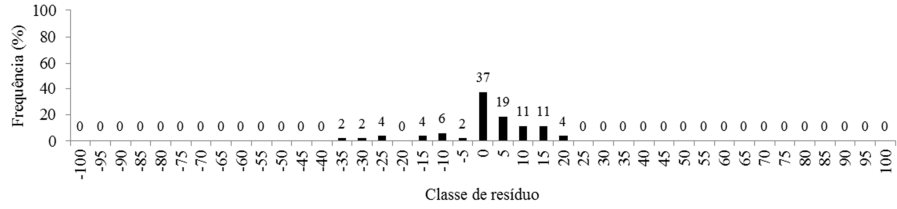


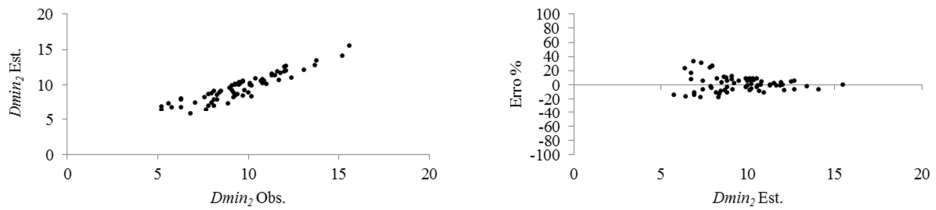
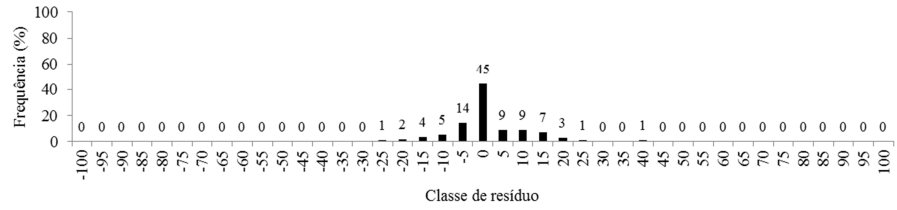
Figura 4 - Continuação.



C1



C2



C3

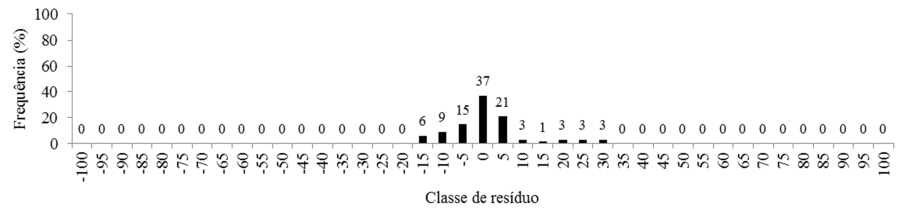
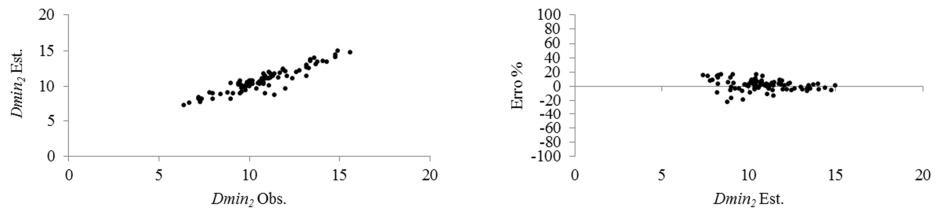
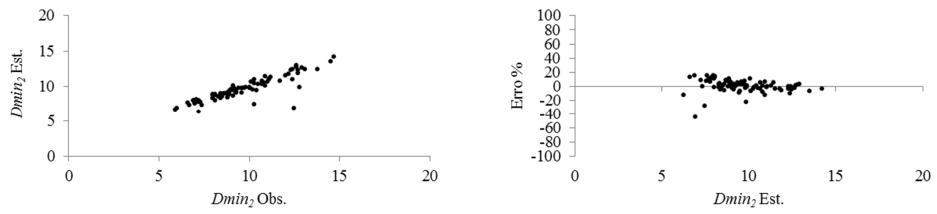
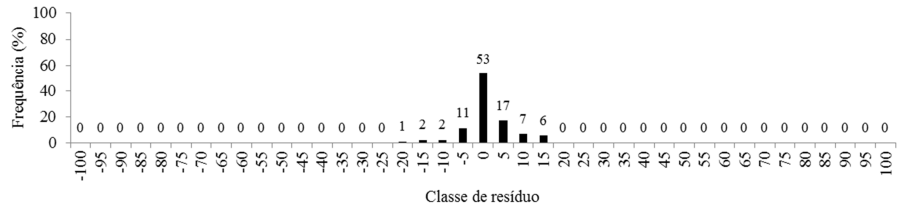


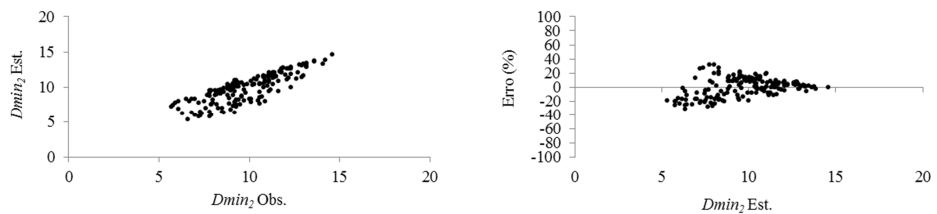
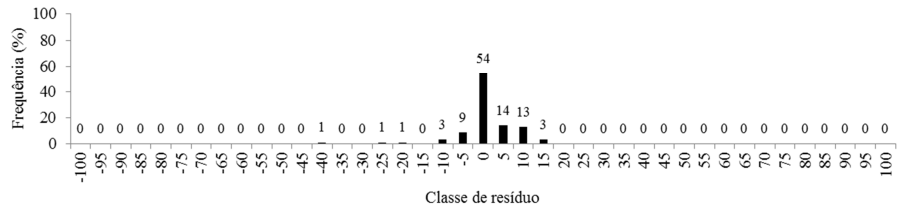
Figura 4 - Continuação.



D1



D2



D3

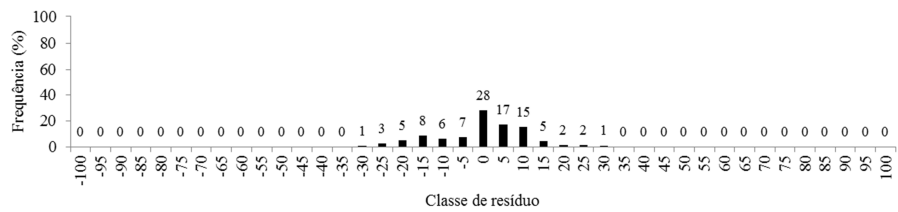


Figura 4 - Continuação.

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \theta_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \varepsilon$$

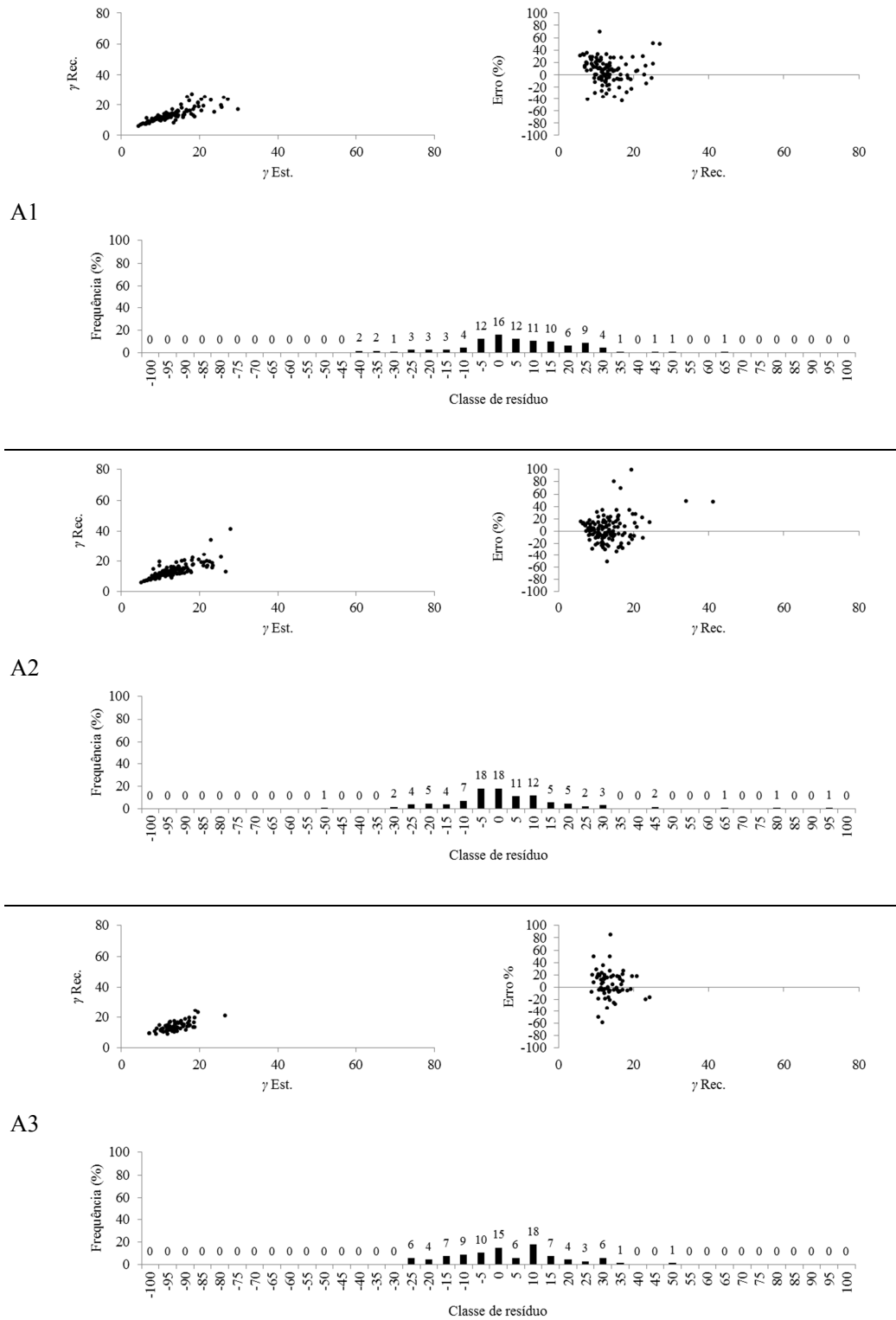


Figura 5 - Valores estimados e recuperados de γ_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos seleccionados.

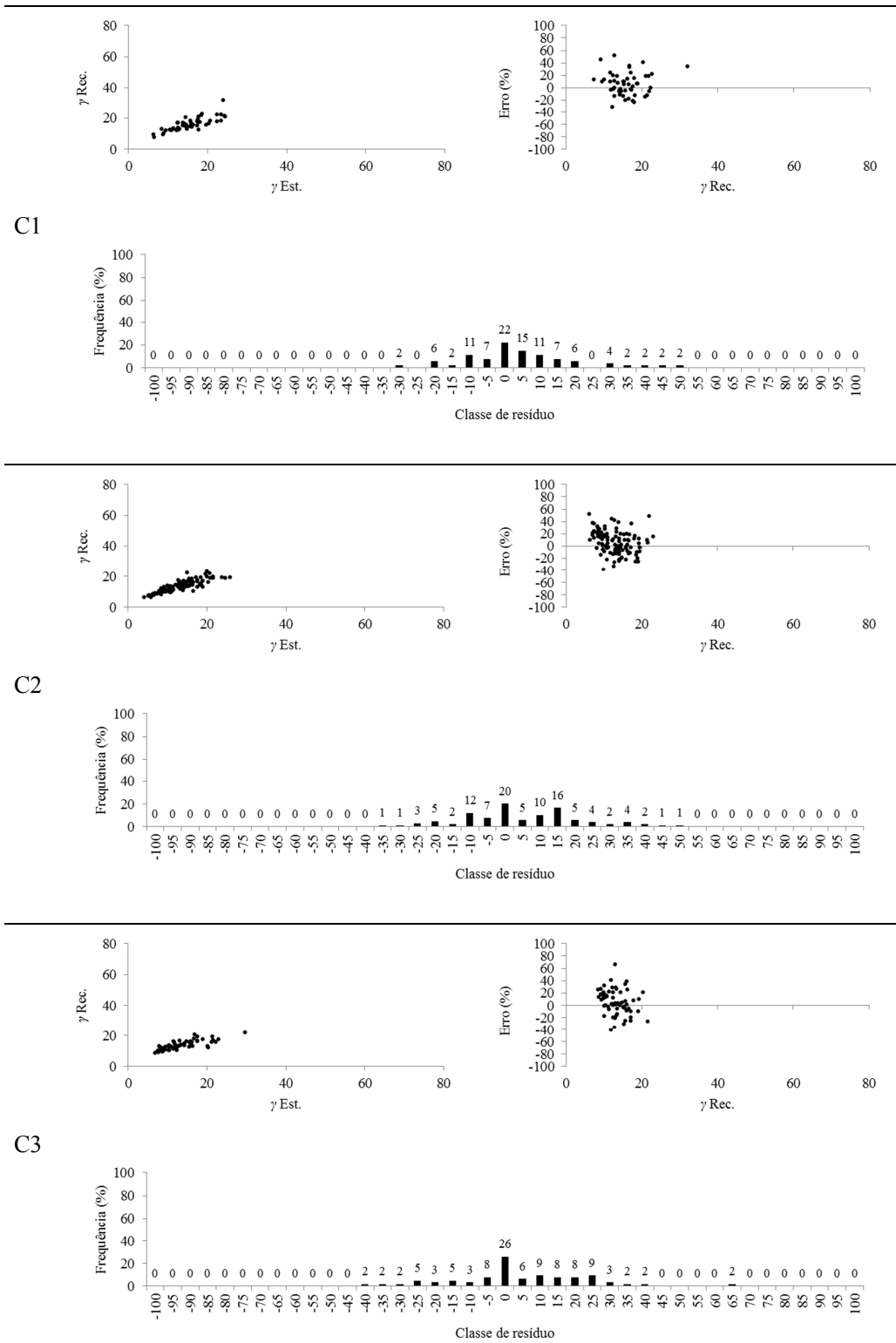
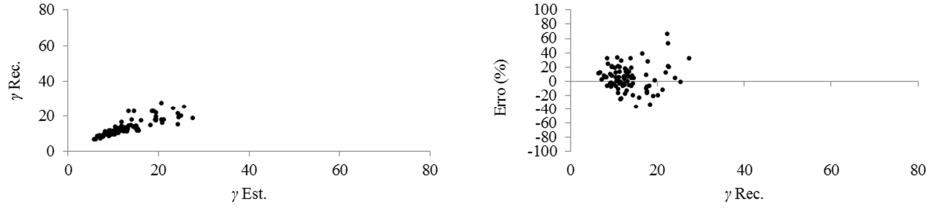
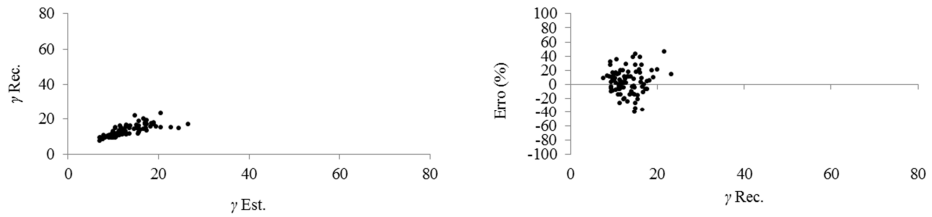
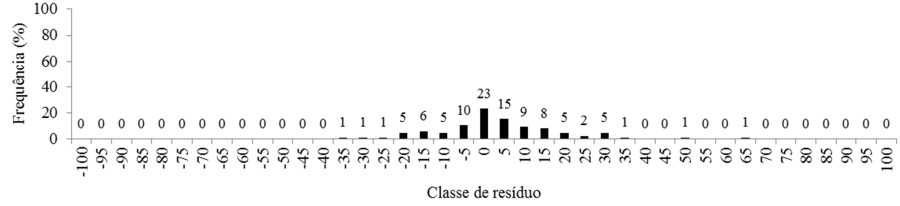


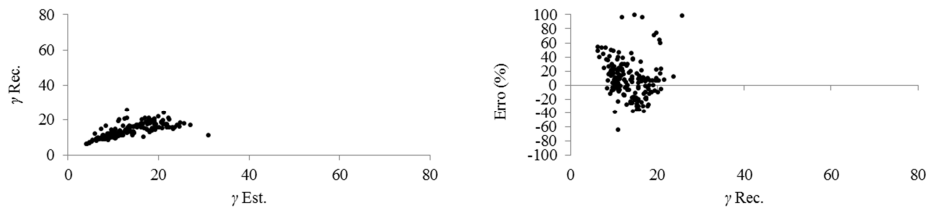
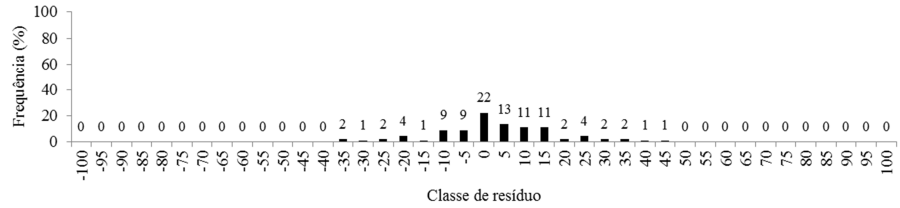
Figura 5 - Continuação.



D1



D2



D3

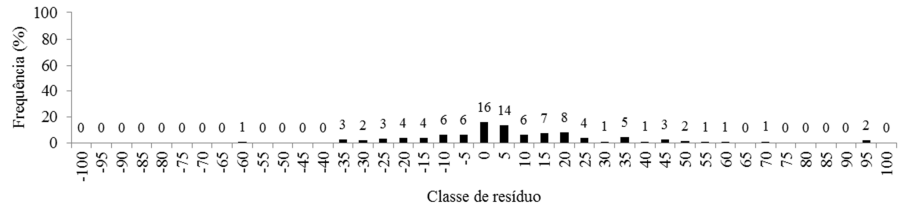
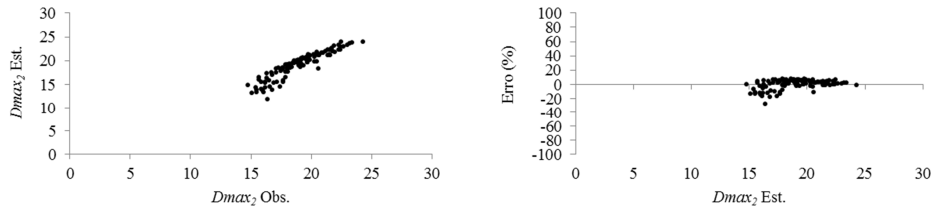
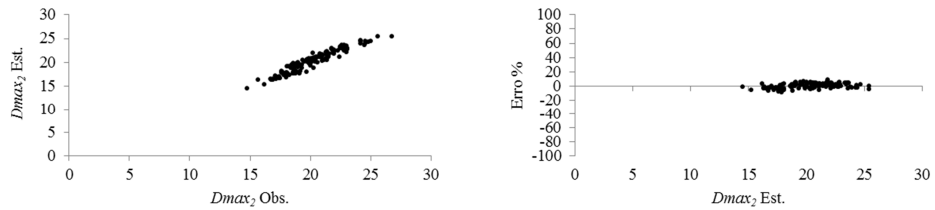
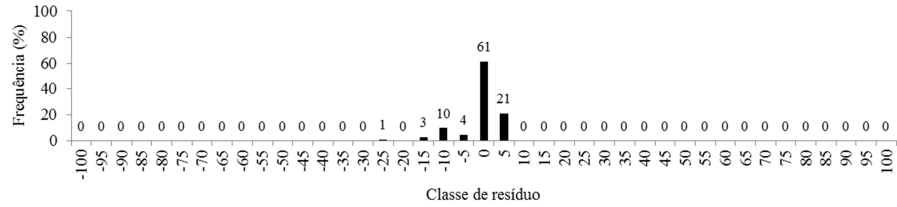


Figura 5 - Continuação.

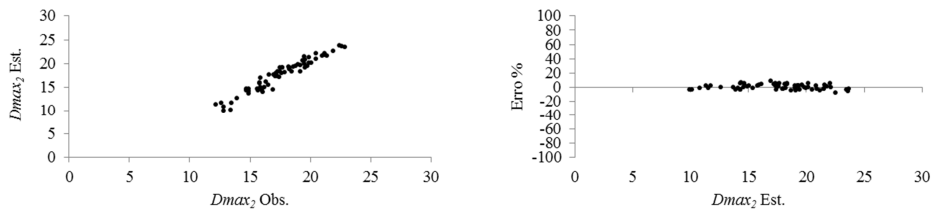
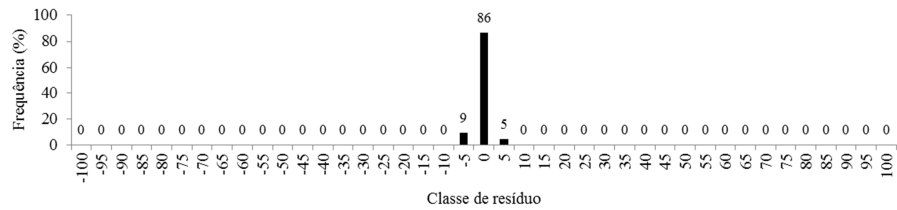
$$Dmax_2 = Dmax_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \theta_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + \varepsilon$$



A1



A2



A3

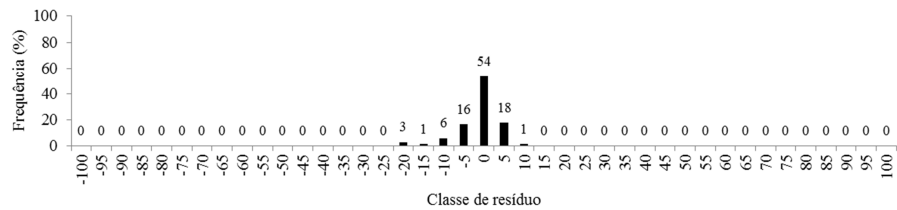
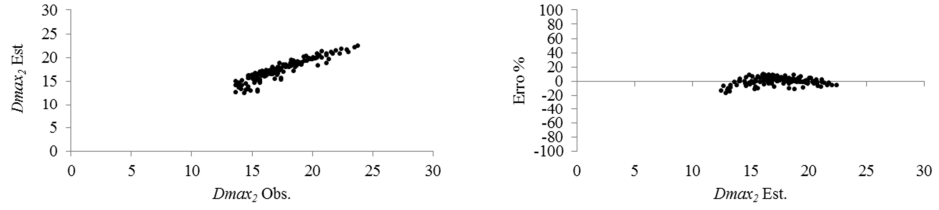
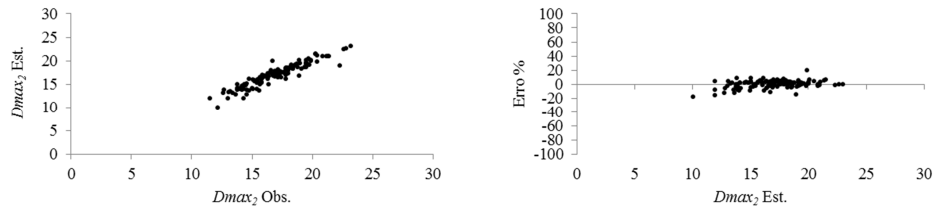
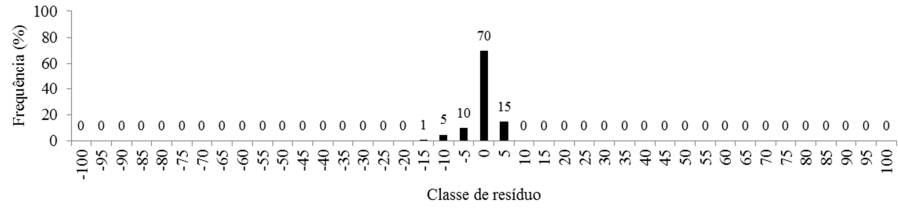


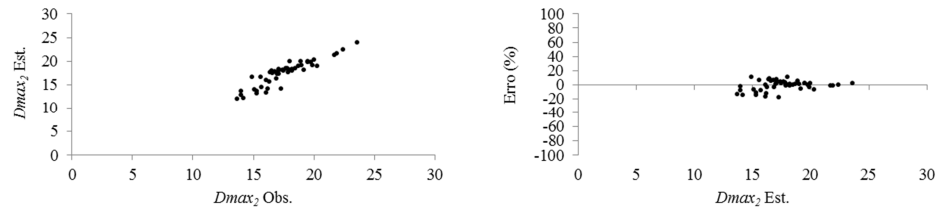
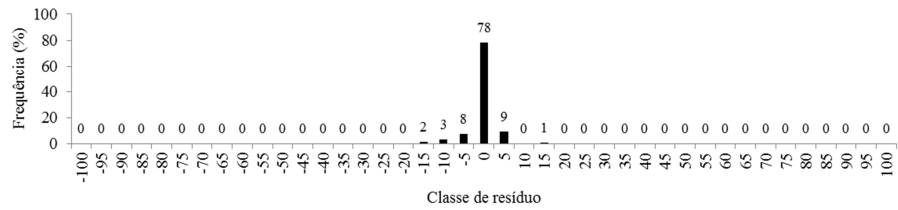
Figura 6 - Valores observados e estimativas de $Dmax_2$, distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.



B1



B2



B3

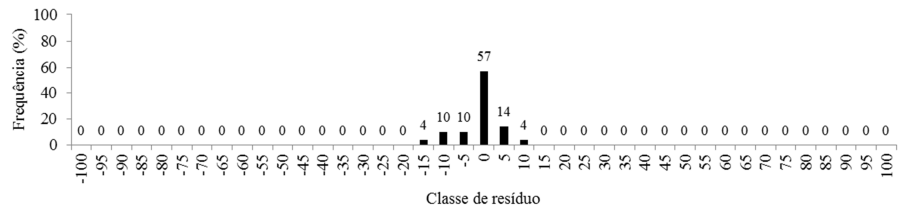


Figura 6 - Continuação.

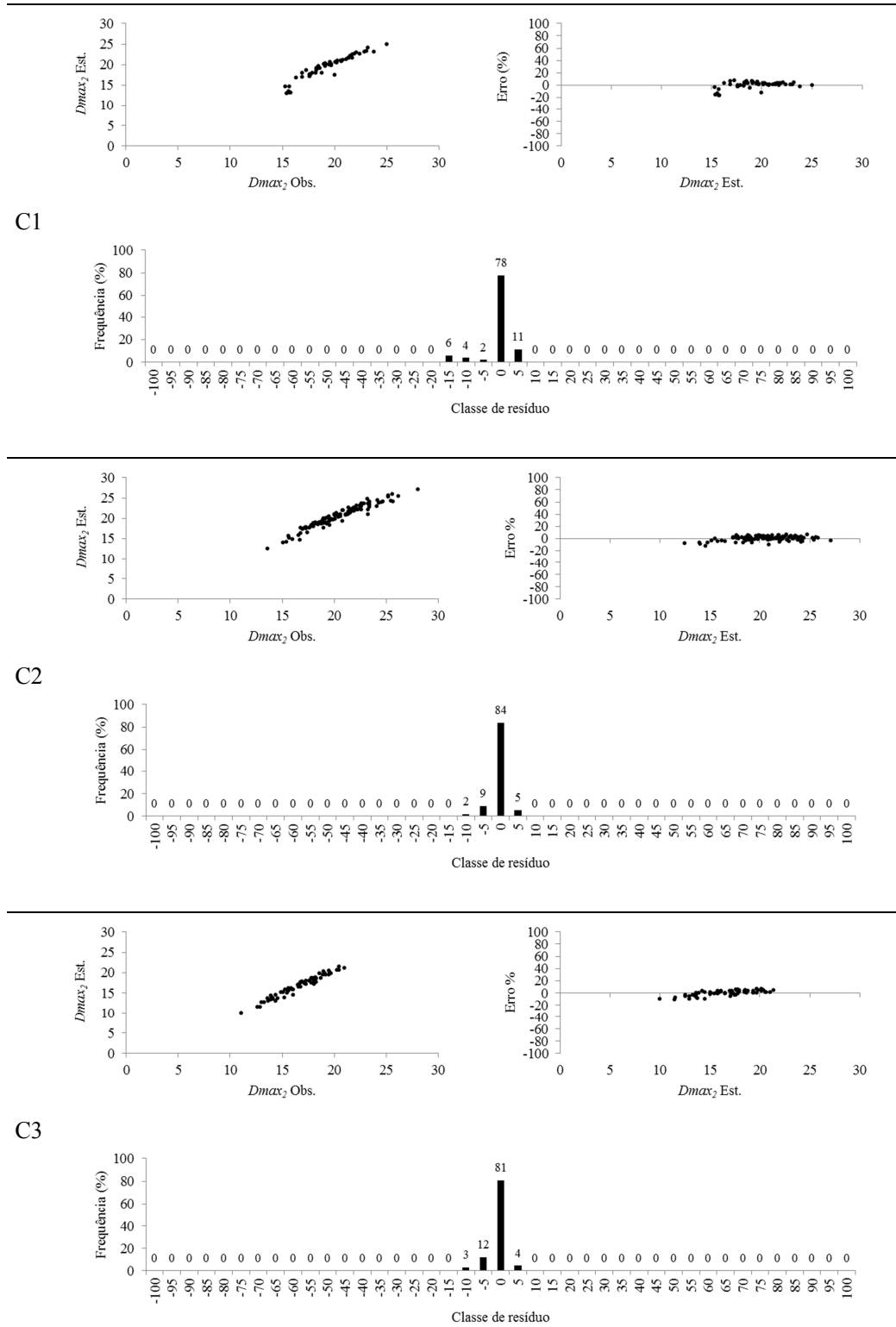
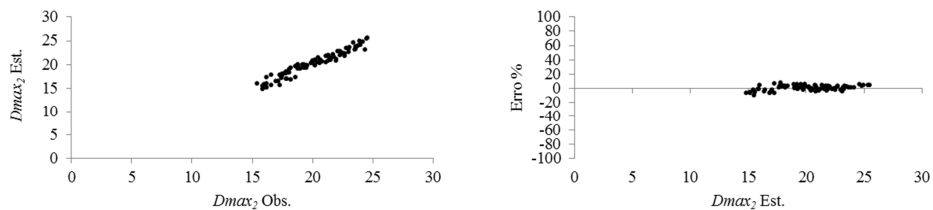
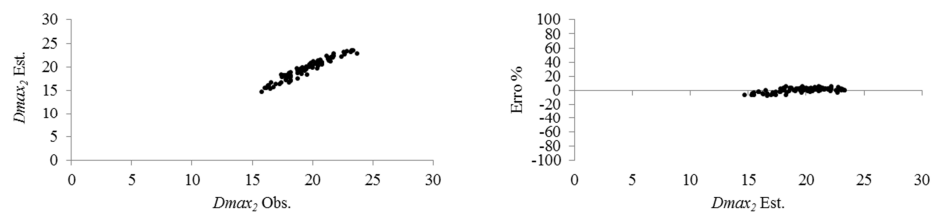
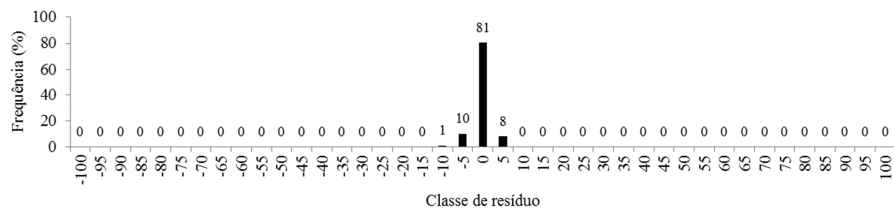


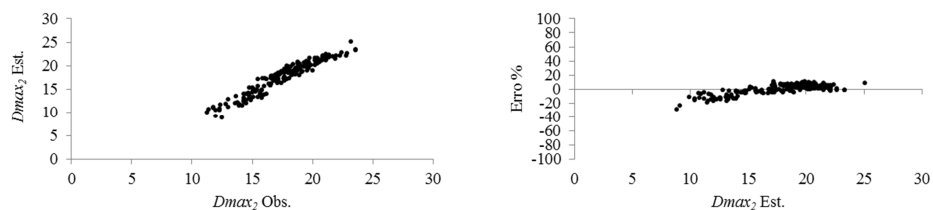
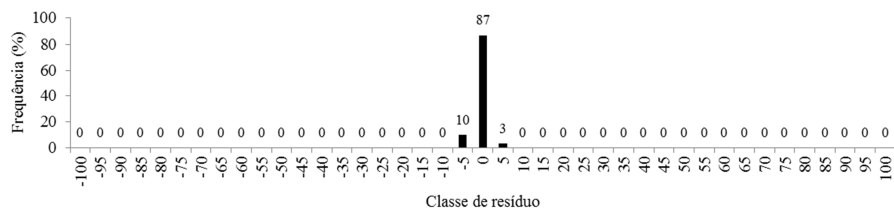
Figura 6 - Continuação.



D1



D2



D3

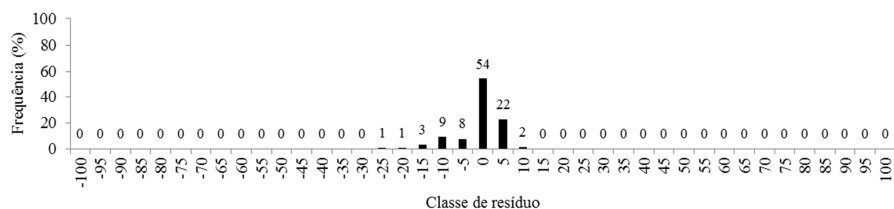
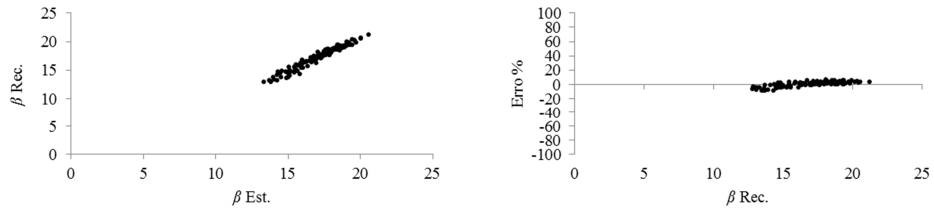
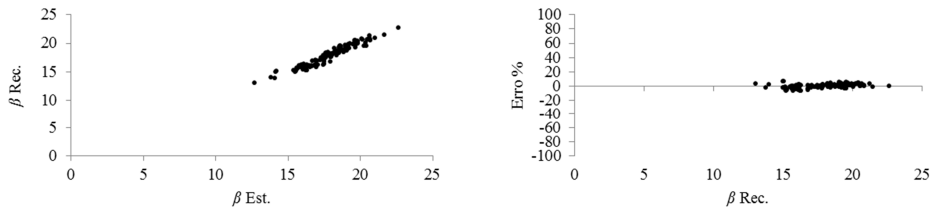
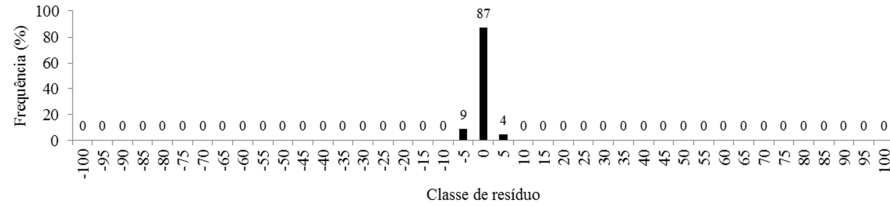


Figura 6 - Continuação.

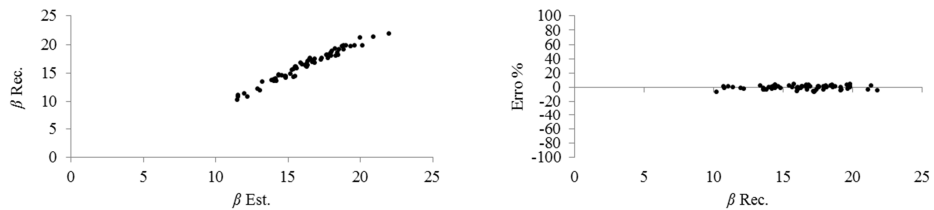
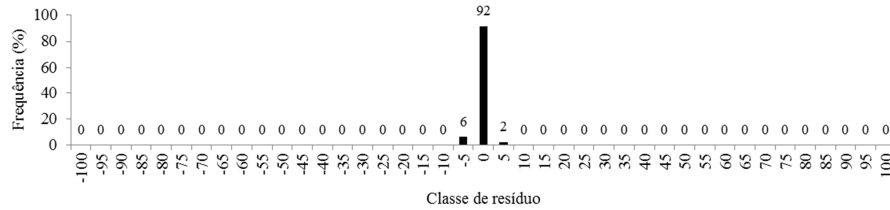
$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \theta_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 + \varepsilon$$



A1



A2



A3

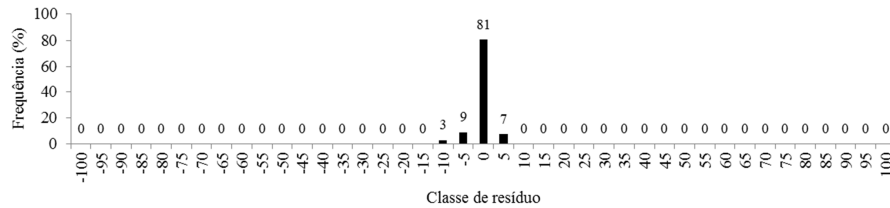
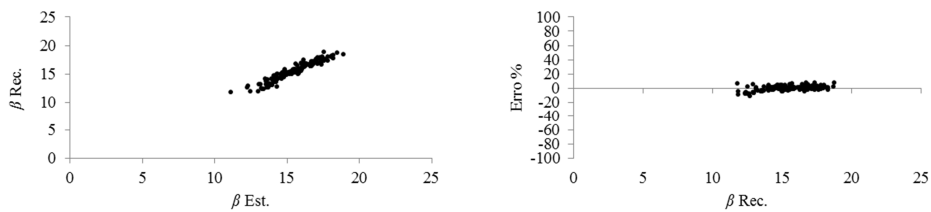
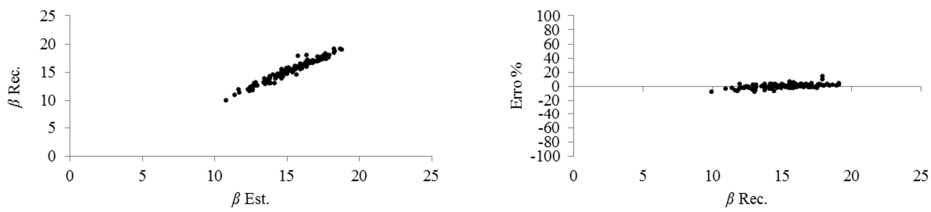


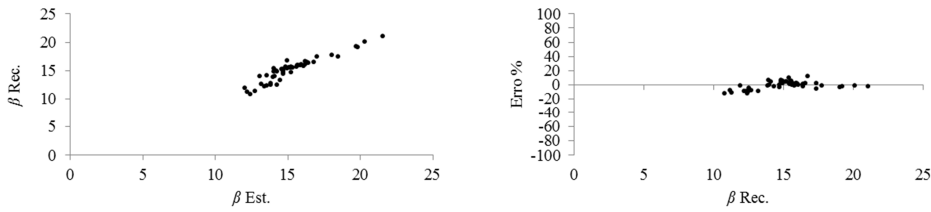
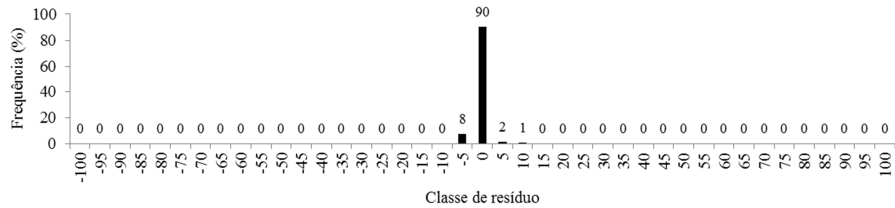
Figura 7 - Valores estimados e recuperados de β_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.



B1



B2



B3

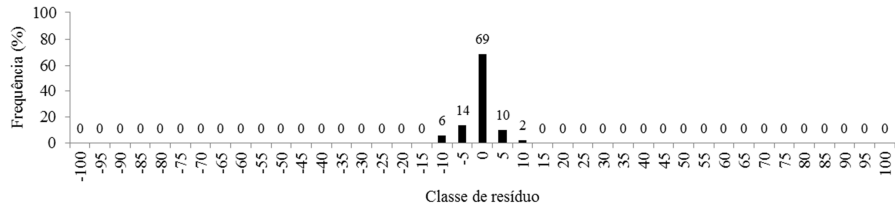


Figura 7 - Continuação.

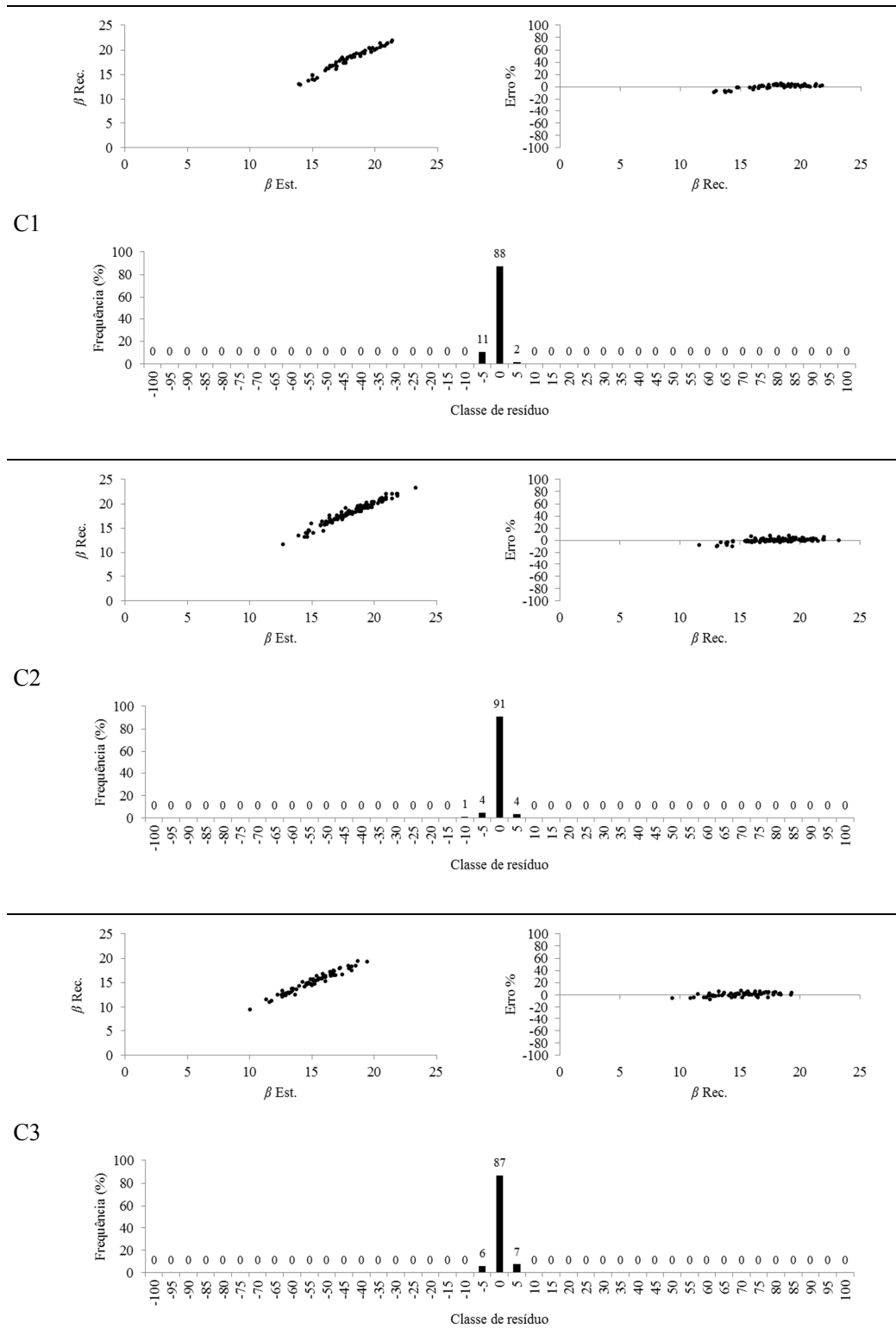
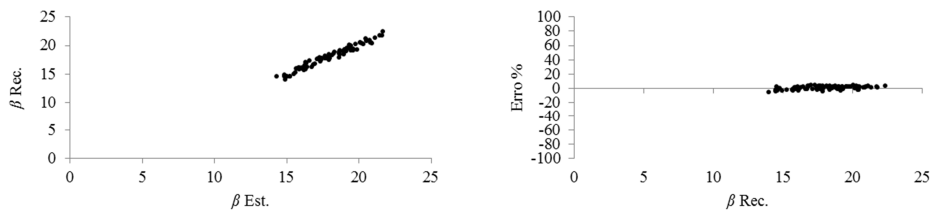
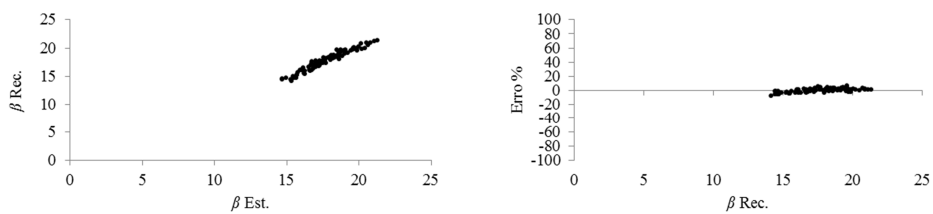


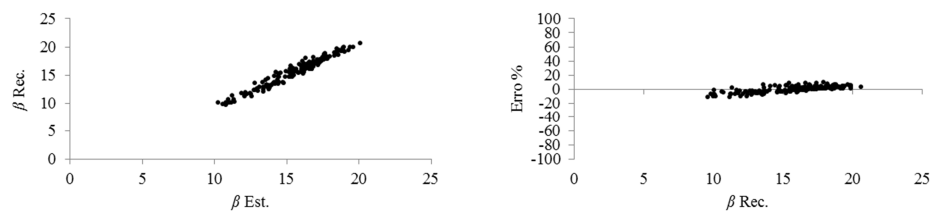
Figura 7 - Continuação.



D1



D2



D3

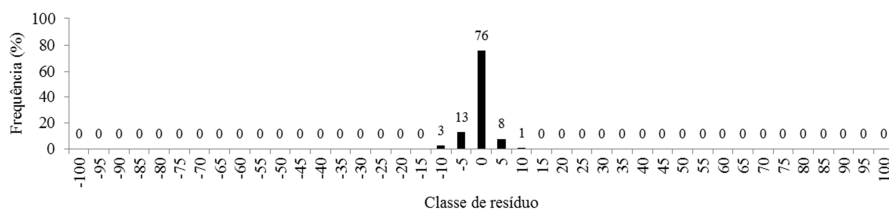


Figura 7 - Continuação.

$$\ln N_2 = \theta_5 + \theta_6 I_1 + \theta_7 N_1 + \varepsilon$$

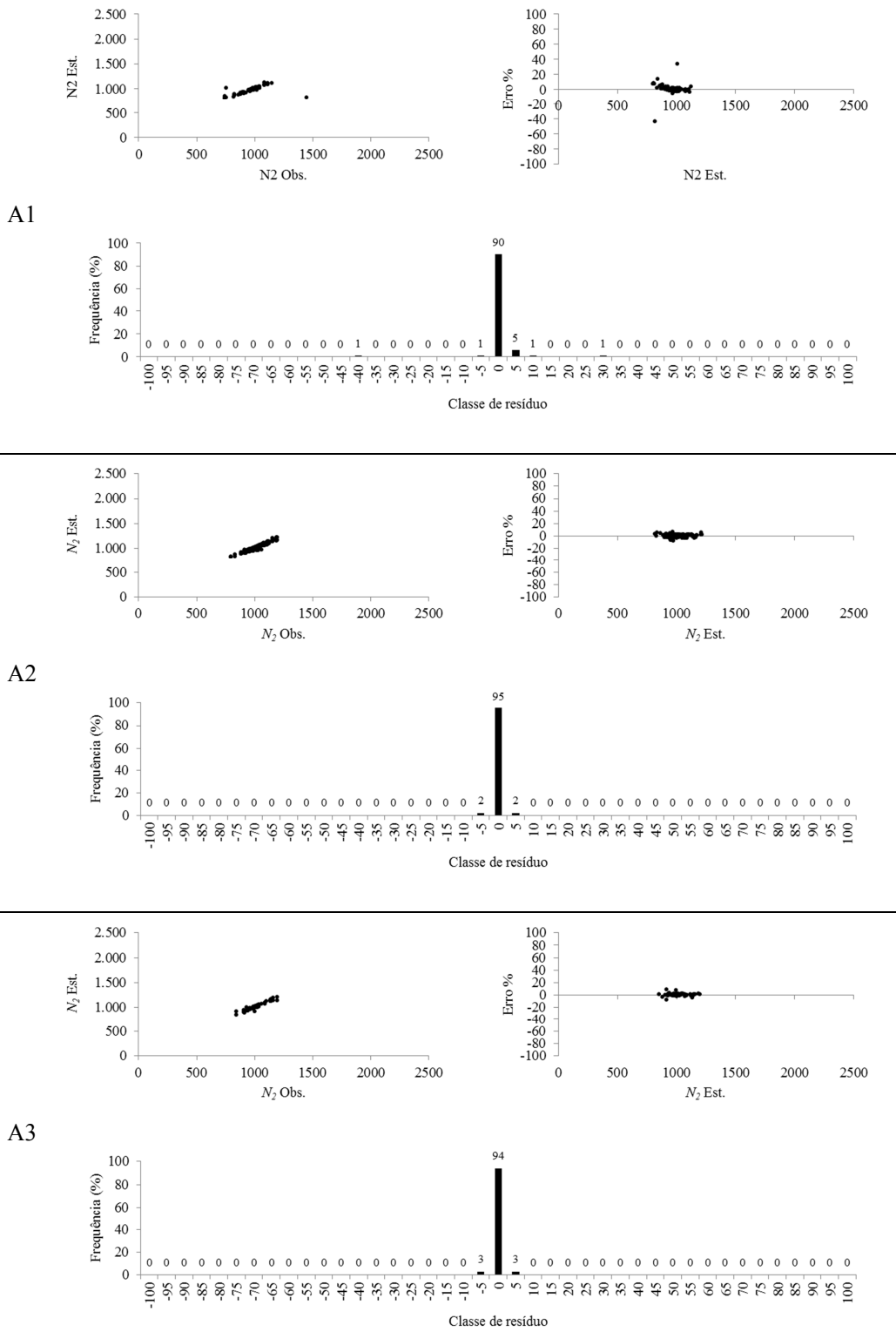
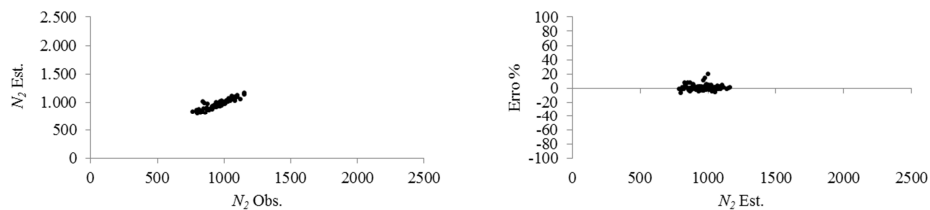
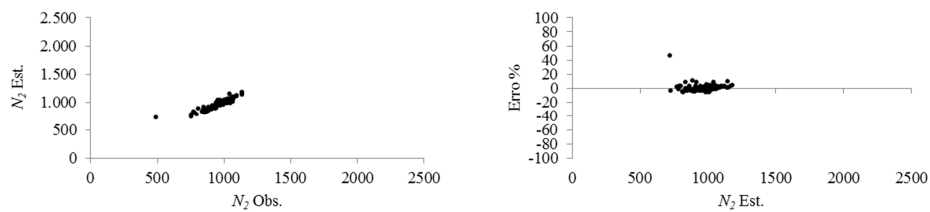


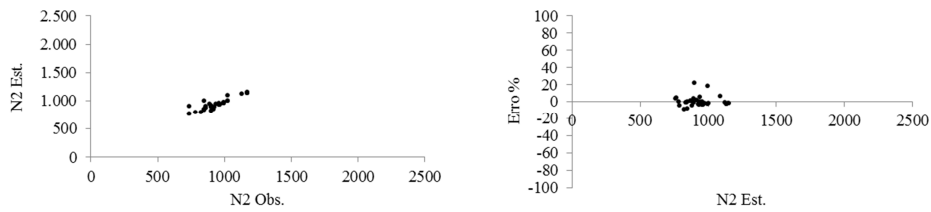
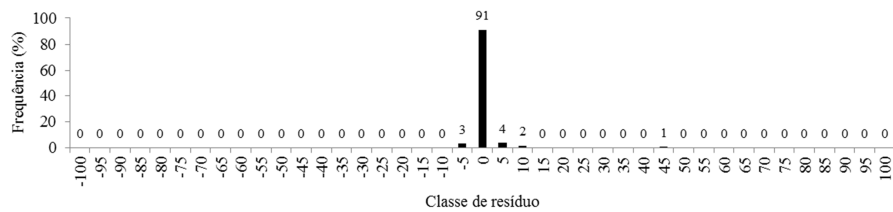
Figura 8 - Valores observados e estimados de N_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.



B1



B2



B3

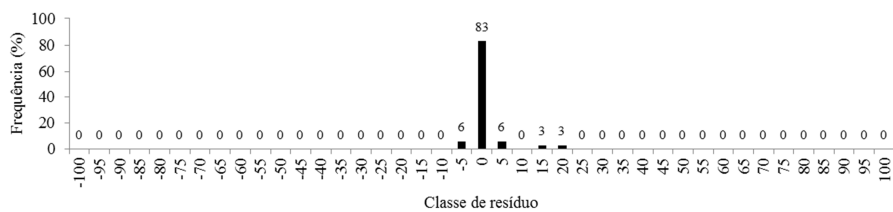


Figura 8 - Continuação.

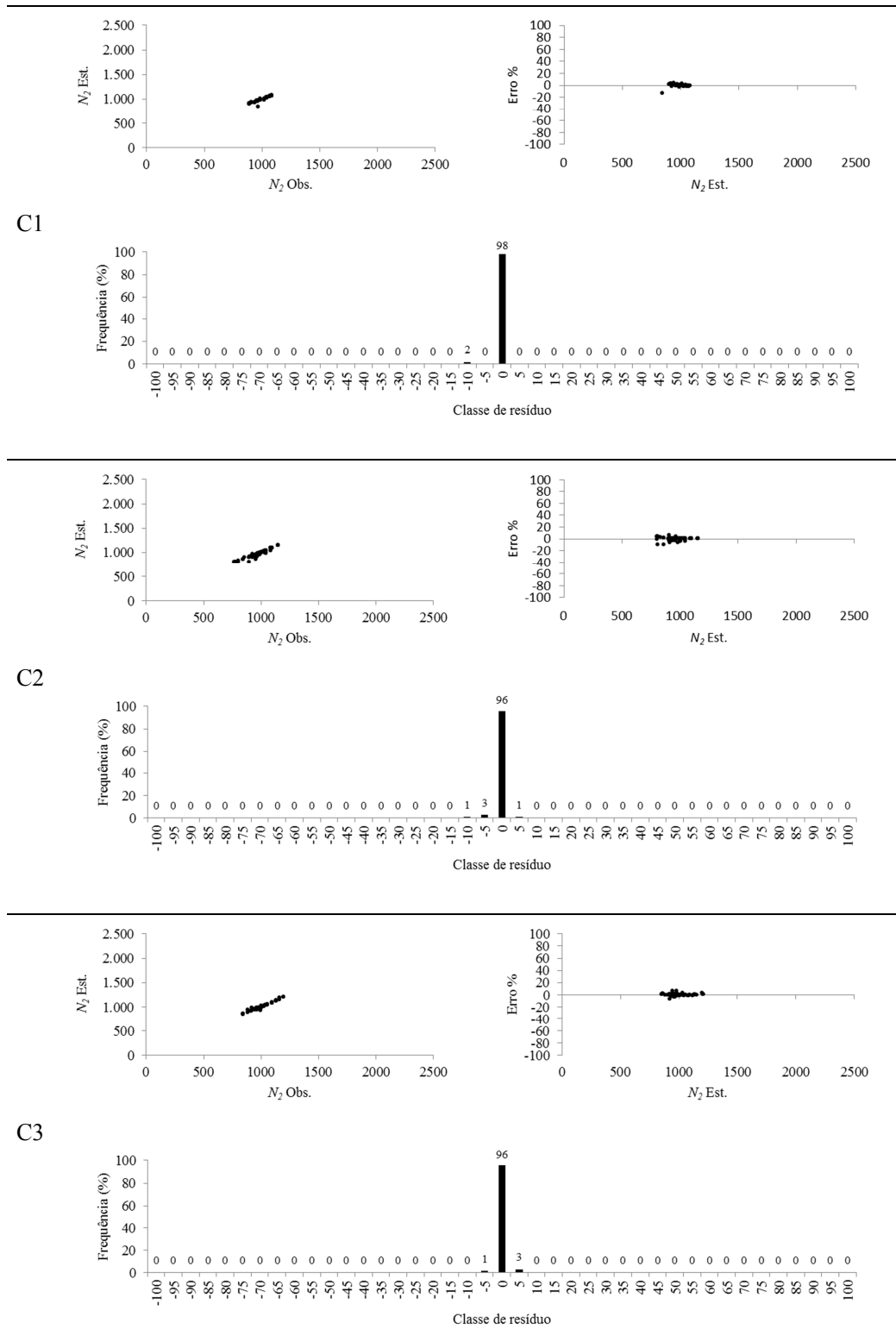


Figura 8 - Continuação.

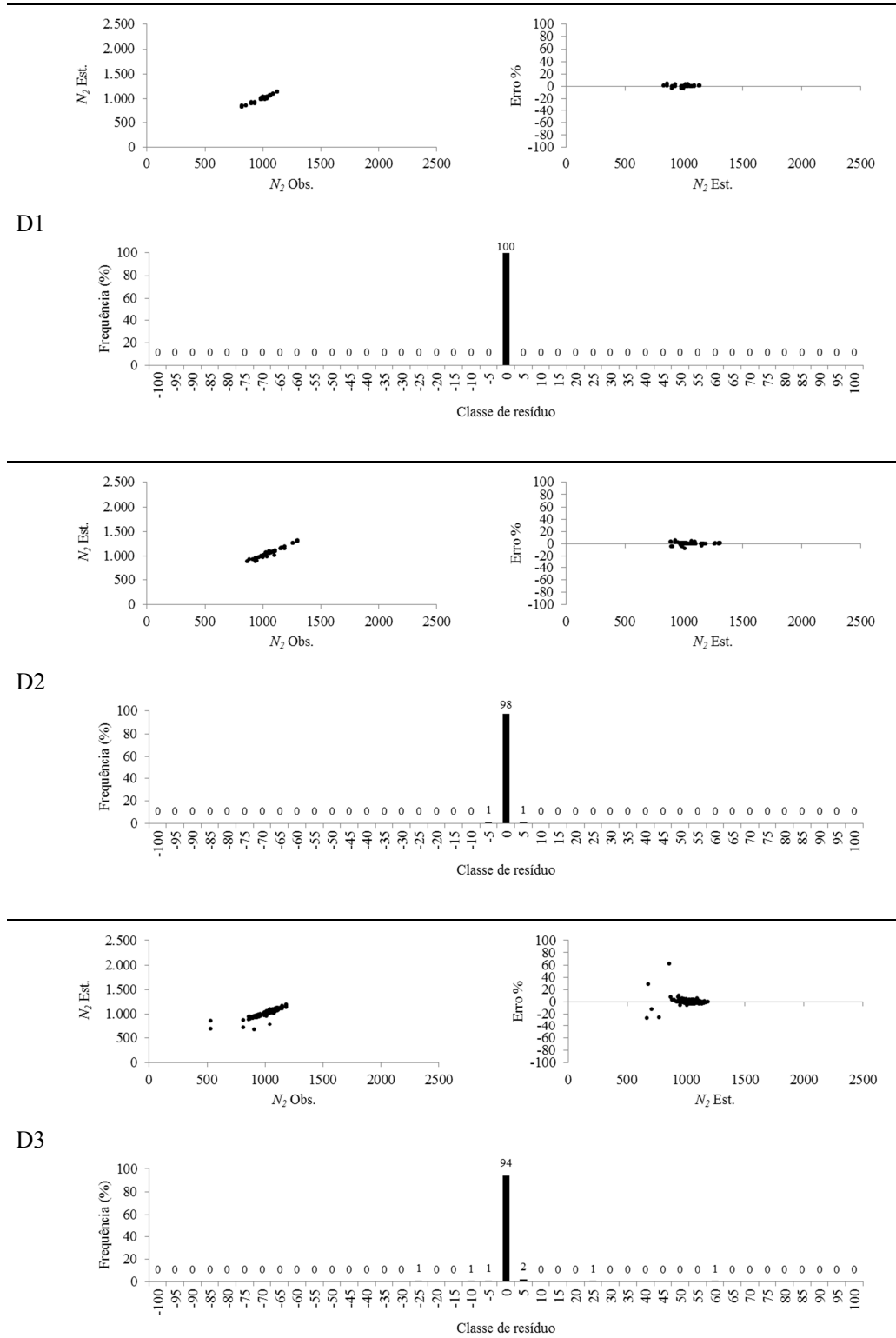


Figura 8 - Continuação.

$$\ln Ht = \theta_8 + \theta_9 I + \theta_{10} Hd + \theta_{11} dap^{-1} + \varepsilon$$

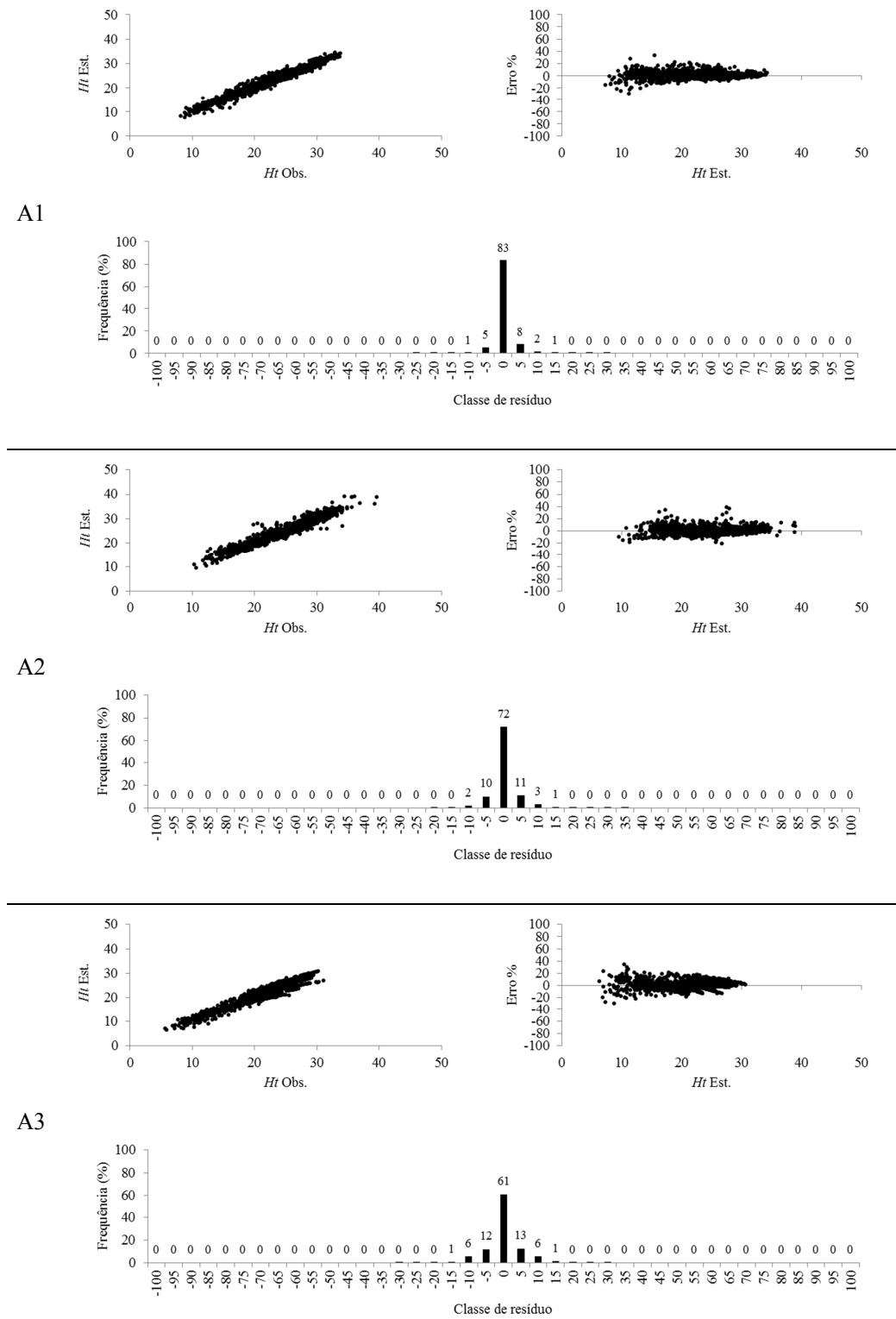
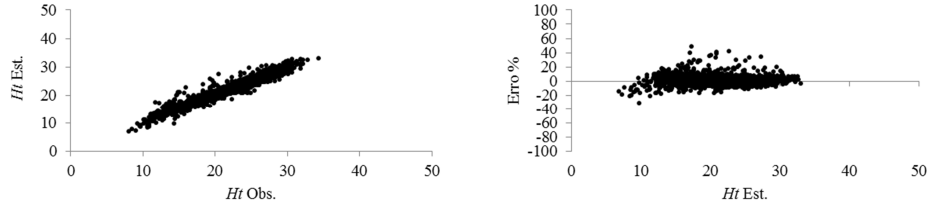
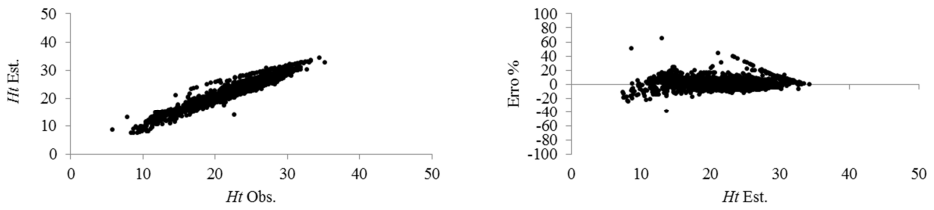
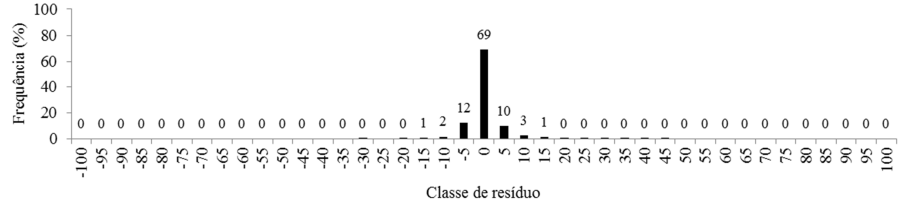


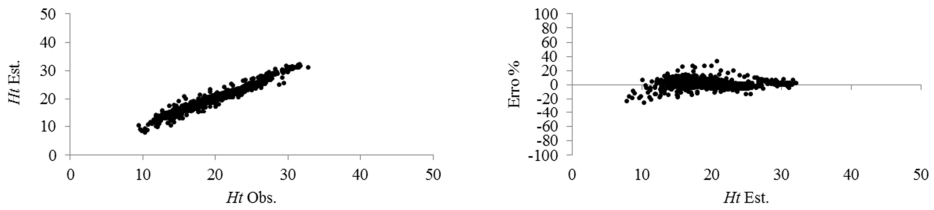
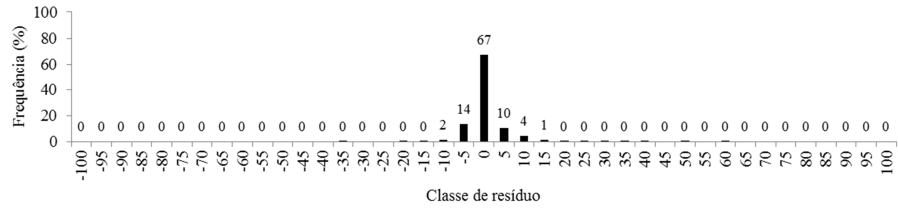
Figura 9 - Valores observados e estimados de Ht_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%) para os 12 projetos selecionados.



B1



B2



B3

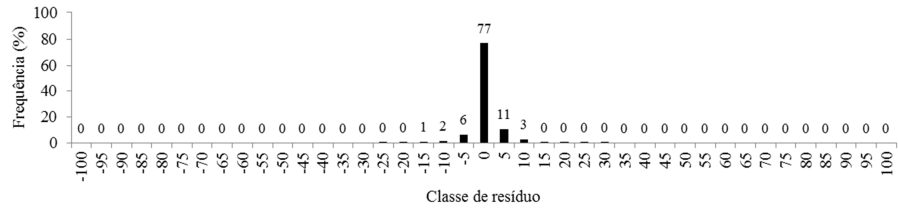
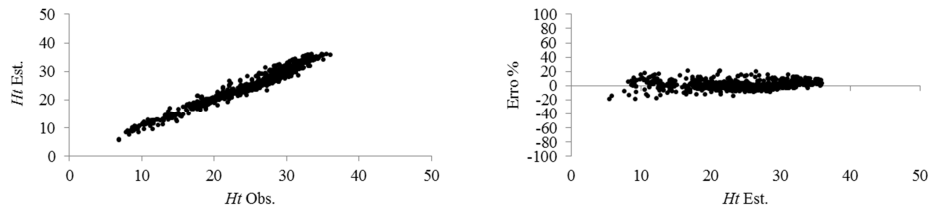
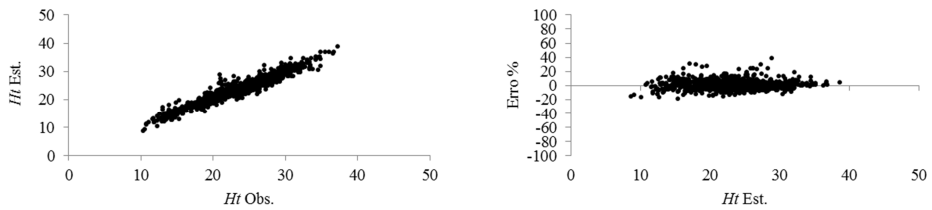
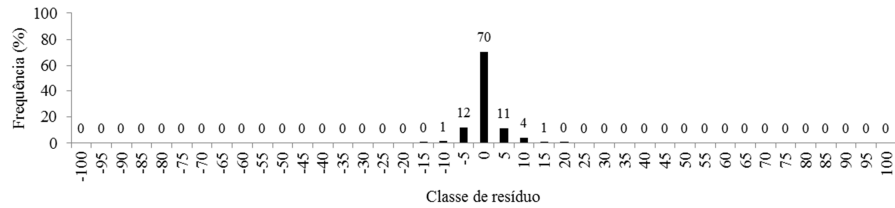


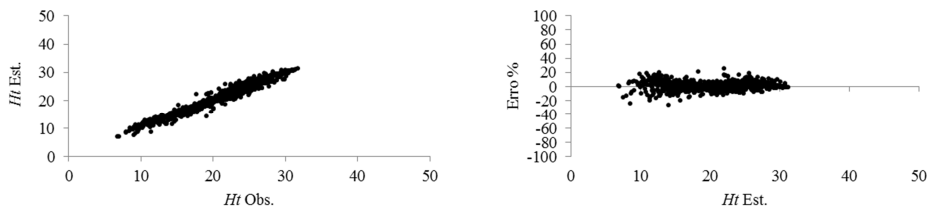
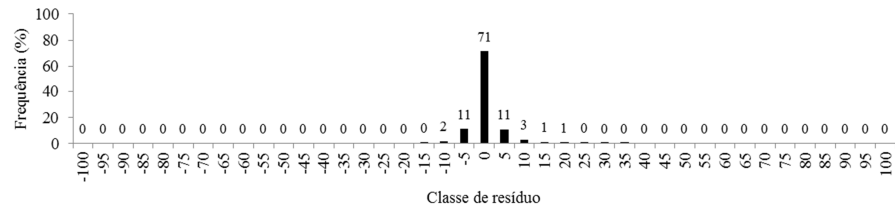
Figura 9 - Continuação.



C1



C2



C3

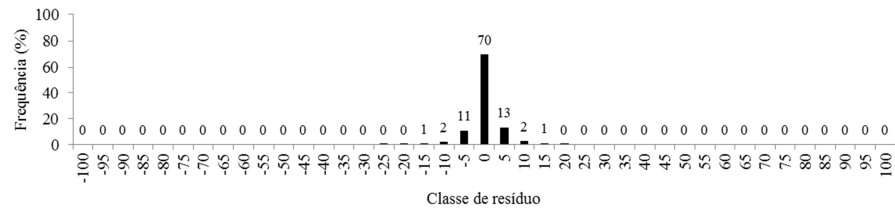
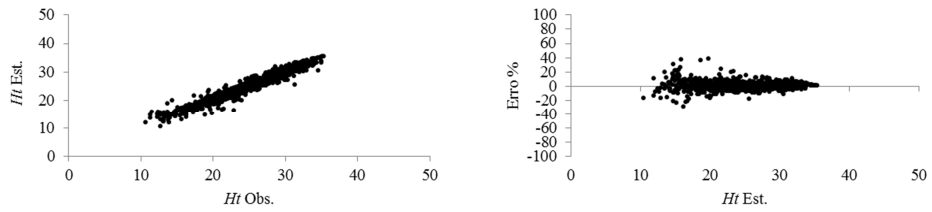
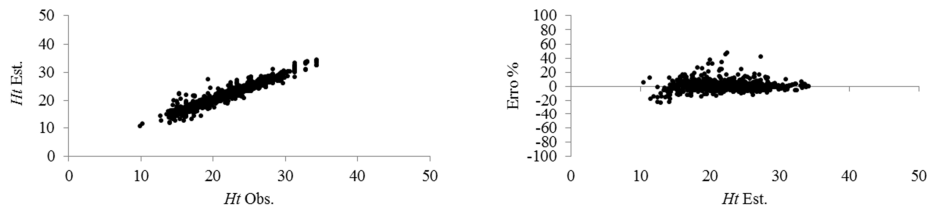
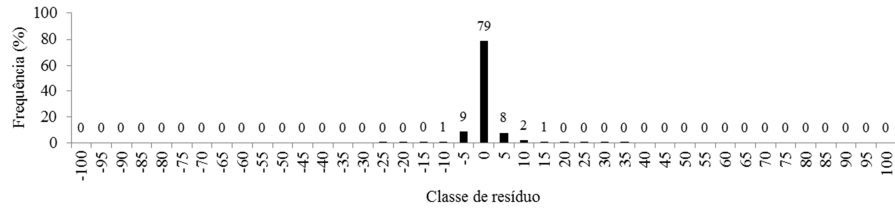


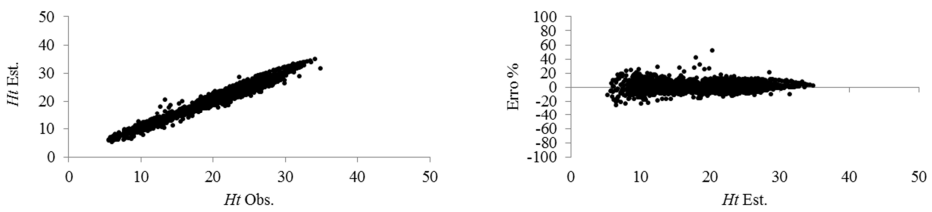
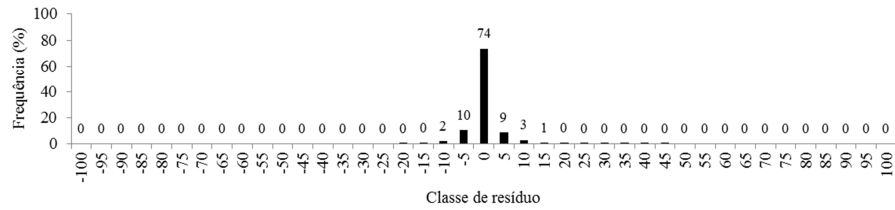
Figura 9 - Continuação.



D1



D2



D3

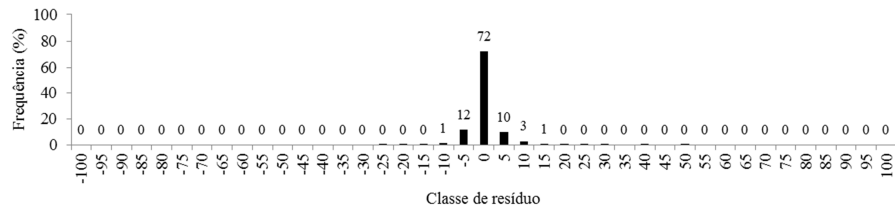


Figura 9 - Continuação.

4.5. Modelo de afilamento do fuste (*taper*)

A equação de *taper* obtida, com o respectivo coeficiente de determinação ajustado e o erro padrão da estimativa, foi:

$$\frac{d}{dap} = 1,17126(1 + 0,30096 \ln(1 - 0,96233h^{0,30445}Ht^{-0,30445})) \quad (101)$$

$$\bar{R}^2 = 0,9972$$

$$S_{y,x} = 0,93$$

Na Figura 10 é apresentada a relação entre os valores de diâmetro observados e estimados, bem como a distribuição e o histograma de frequência dos erros percentuais.

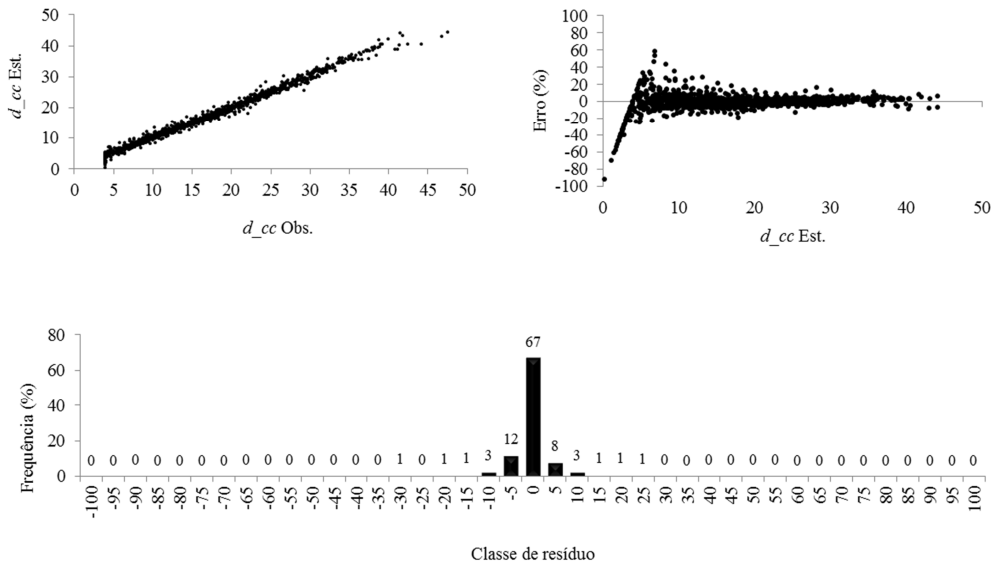


Figura 10 - Diâmetro observado *versus* diâmetro estimado conforme modelo de Garay, distribuição dos erros percentuais e histograma de frequência de erros percentuais.

4.6. Projeção do diâmetro (*dap*)

As equações ajustadas para projeção do *dap* são apresentadas por projeto, com seus respectivos coeficientes de determinação ajustados e erro padrão da estimativa.

Nas Figuras 11 e 12 observam-se as relações entre os valores de *dap* observados e estimados, a distribuição dos erros percentuais e histograma de frequência dos erros percentuais.

Projeto A1:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-231,7211((I_2^{-1,8783}) - (I_1^{-1,8783})))} \quad \begin{array}{l} \bar{R}^2 = 0,9121 \\ S_{y,x} = 0,80 \end{array} \quad (102)$$

$$\ln dap_2 = \ln dap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,114295 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \begin{array}{l} \bar{R}^2 = 0,8772 \\ S_{y,x} = 0,95 \end{array} \quad (103)$$

Projeto A2:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-104,8763((I_2^{-1,5441}) - (I_1^{-1,5441})))} \quad \begin{array}{l} \bar{R}^2 = 0,9670 \\ S_{y,x} = 0,51 \end{array} \quad (104)$$

$$\ln dap_2 = \ln dap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,096868 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \begin{array}{l} \bar{R}^2 = 0,9227 \\ S_{y,x} = 0,79 \end{array} \quad (105)$$

Projeto A3:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-41,64977((I_2^{-1,20199}) - (I_1^{-1,20199})))} \quad \begin{array}{l} \bar{R}^2 = 0,9346 \\ S_{y,x} = 0,72 \end{array} \quad (106)$$

$$\ln dap_2 = \ln dap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,132587 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \begin{array}{l} \bar{R}^2 = 0,9236 \\ S_{y,x} = 0,78 \end{array} \quad (107)$$

Projeto B1:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-3,000792((I_2^{-0,331282}) - (I_1^{-0,331282})))}$$

$$\bar{R}^2 = 0,9216$$

$$S_{y,x} = 0,68 \quad (108)$$

$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 2,870341 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right)$$

$$\bar{R}^2 = 0,8812$$

$$S_{y,x} = 0,84 \quad (109)$$

Projeto B2:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-7,233425((I_2^{-0,729028}) - (I_1^{-0,729028})))}$$

$$\bar{R}^2 = 0,9348$$

$$S_{y,x} = 0,65 \quad (110)$$

$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 2,898723 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right)$$

$$\bar{R}^2 = 0,8988$$

$$S_{y,x} = 0,81 \quad (111)$$

Projeto B3:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-4,703331((I_2^{-0,549216}) - (I_1^{-0,549216})))}$$

$$\bar{R}^2 = 0,9187$$

$$S_{y,x} = 0,83 \quad (112)$$

$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 2,850276 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right)$$

$$\bar{R}^2 = 0,8913$$

$$S_{y,x} = 0,96 \quad (113)$$

Projeto C1:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-35,55143((I_2^{-1,27629}) - (I_1^{-1,27629})))}$$

$$\bar{R}^2 = 0,9302$$

$$S_{y,x} = 0,73 \quad (114)$$

$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,123594 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right)$$

$$\bar{R}^2 = 0,9165$$

$$S_{y,x} = 0,80 \quad (115)$$

Projeto C2:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-19,62455((I_2^{-0,99087}) - (I_1^{-0,99087})))}$$

$$\bar{R}^2 = 0,9707$$

$$S_{y,x} = 0,51 \quad (116)$$

$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,126649 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,9337$$

$$S_{y,x} = 0,77 \quad (117)$$

Projeto C3:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-12,23831((I_2^{-0,82467}) - (I_1^{-0,82467})))} \quad \bar{R}^2 = 0,9588$$

$$S_{y,x} = 0,51 \quad (118)$$

$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 2,986295 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,9398$$

$$S_{y,x} = 0,62 \quad (119)$$

Projeto D1:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-5,093147((I_2^{-0,479887}) - (I_1^{-0,479887})))} \quad \bar{R}^2 = 0,9519$$

$$S_{y,x} = 0,61 \quad (120)$$

$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,068164 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,9274$$

$$S_{y,x} = 0,74 \quad (121)$$

Projeto D2:

$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-74,83467((I_2^{-1,39498}) - (I_1^{-1,39498})))} \quad \bar{R}^2 = 0,9681$$

$$S_{y,x} = 0,49 \quad (122)$$

$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,093428 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,9310$$

$$S_{y,x} = 0,73 \quad (123)$$

Projeto D3:

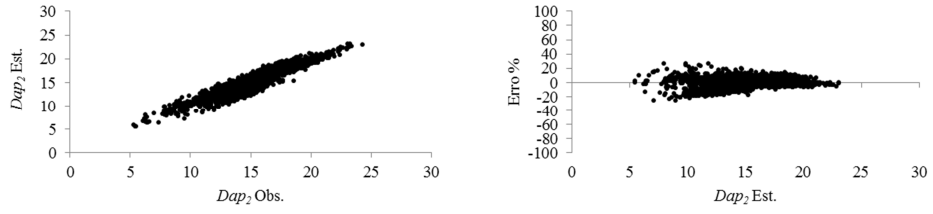
$$dap_2 = dap_1 \exp^{(-29,18935((I_2^{-1,10059}) - (I_1^{-1,10059})))} \quad \bar{R}^2 = 0,9217$$

$$S_{y,x} = 0,76 \quad (124)$$

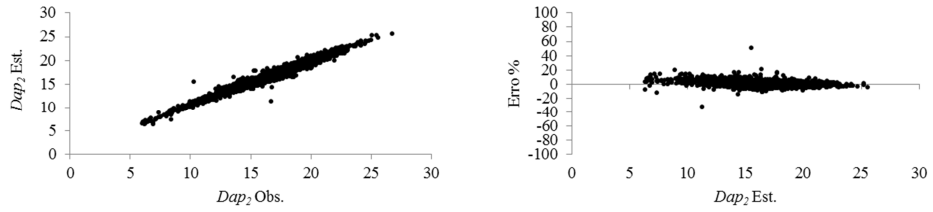
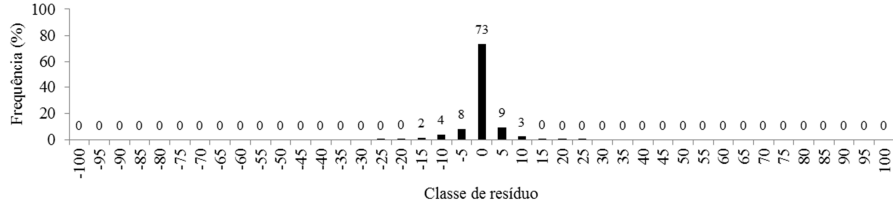
$$lndap_2 = lndap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,105165 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \quad \bar{R}^2 = 0,9157$$

$$S_{y,x} = 0,79 \quad (125)$$

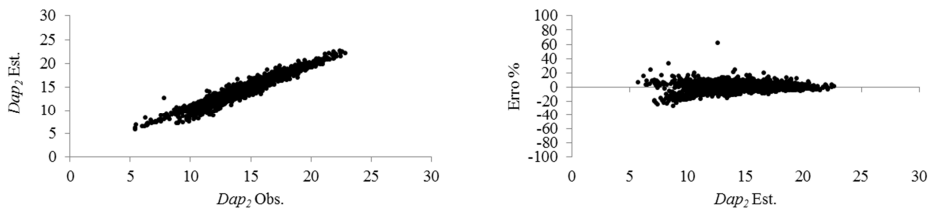
$$dap_2 = dap_1 \exp(-\alpha_0((I_2^{\alpha_1}) - (I_1^{\alpha_1}))) + \varepsilon$$



A1



A2



A3

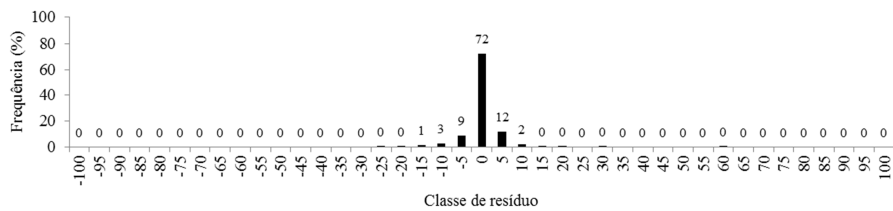
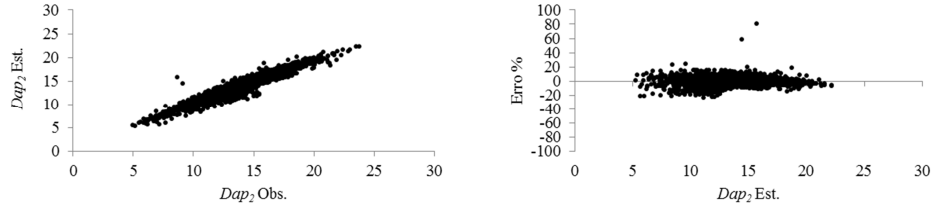
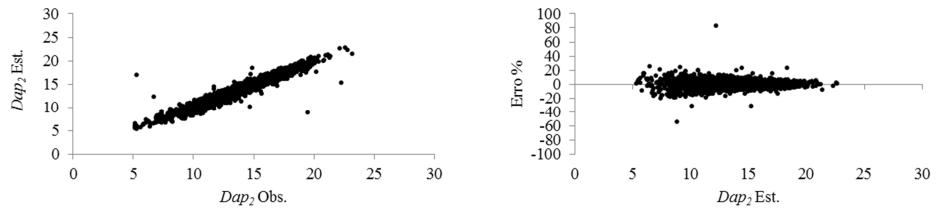
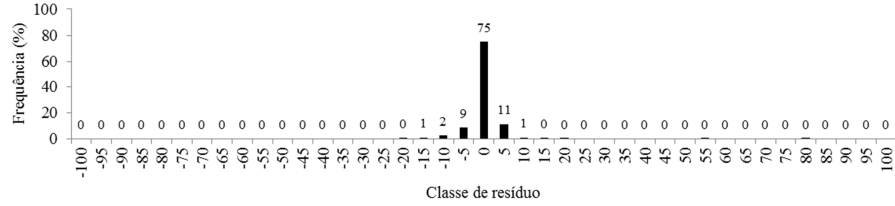


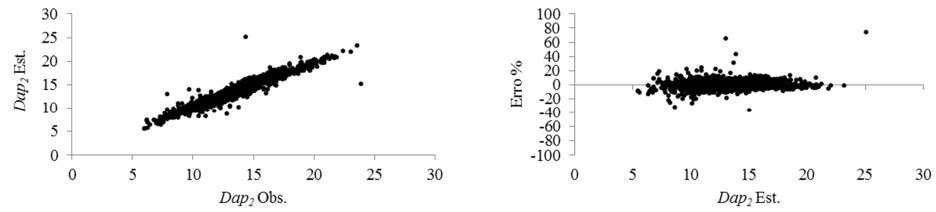
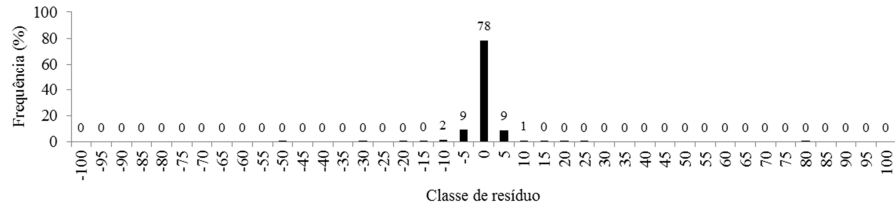
Figura 11 - Valores observados e estimativas de dap_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%), conforme o Modelo 1.



B1



B2



B3

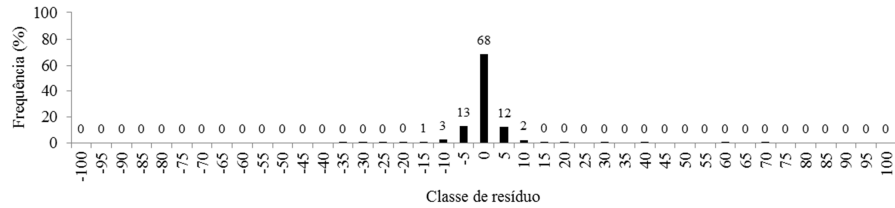
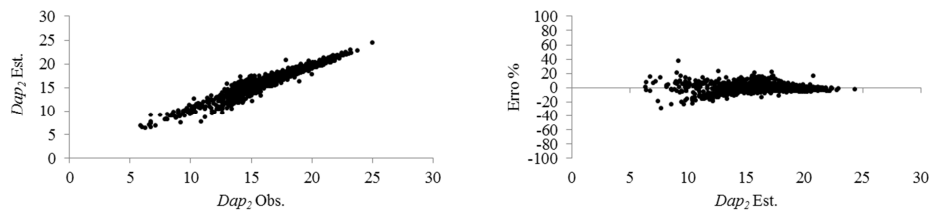
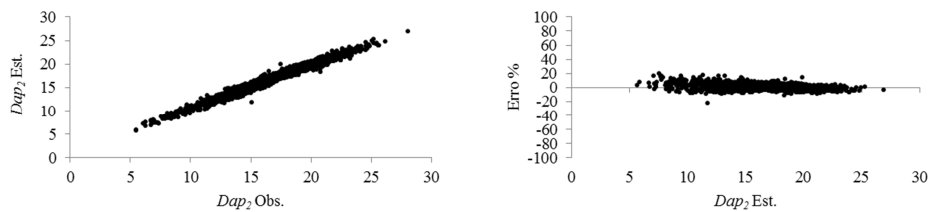
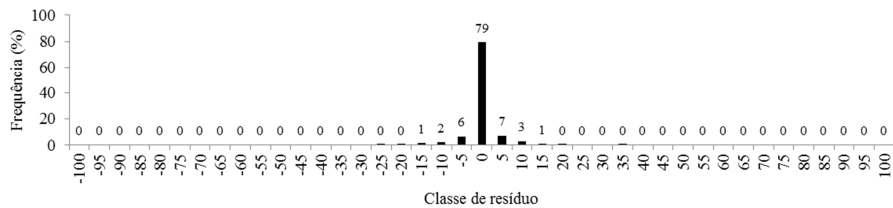


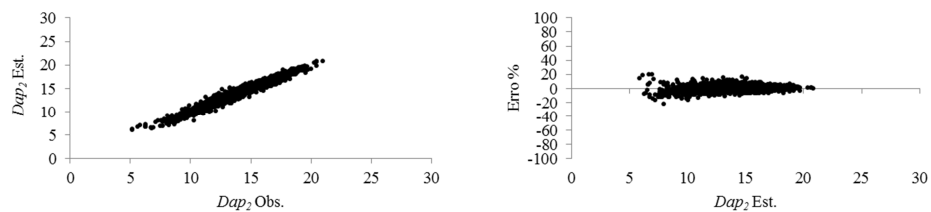
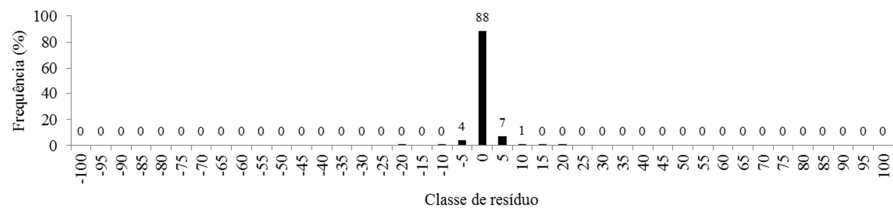
Figura 11 – Continuação.



C1



C2



C3

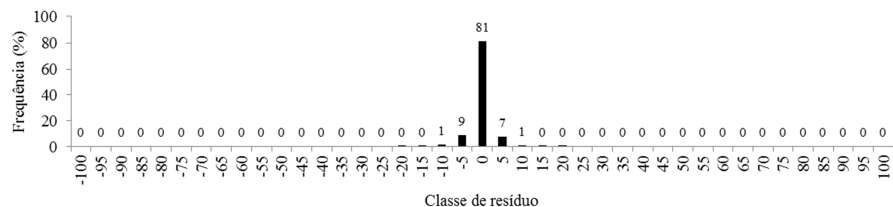


Figura 11 – Continuação.

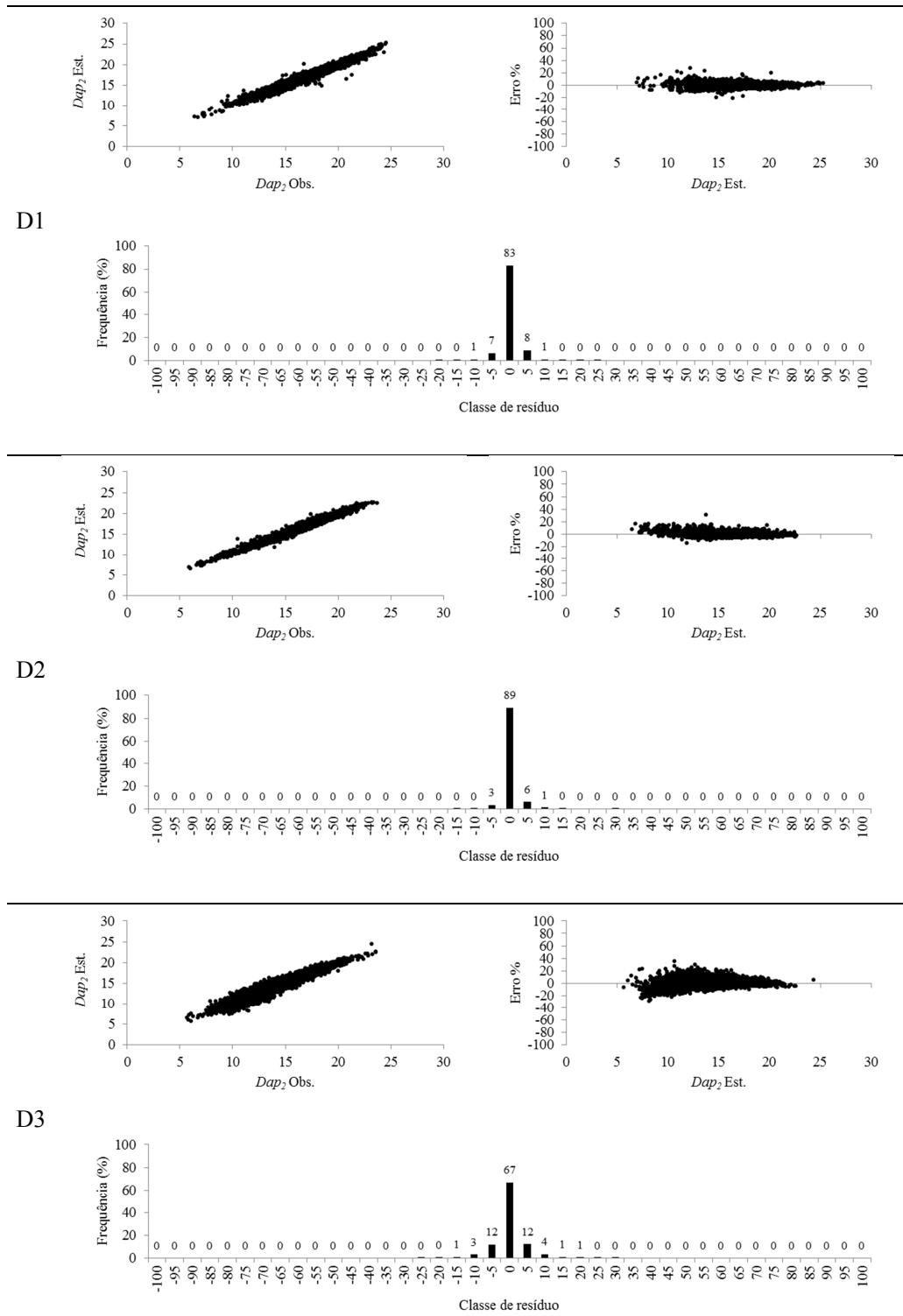
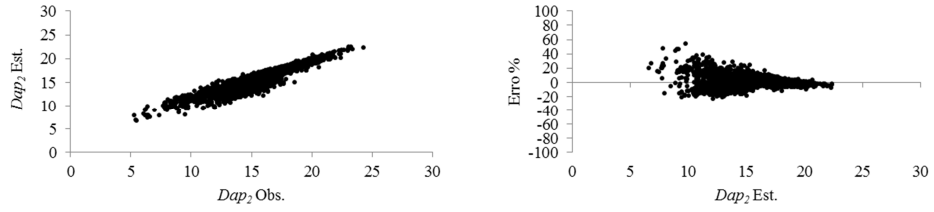
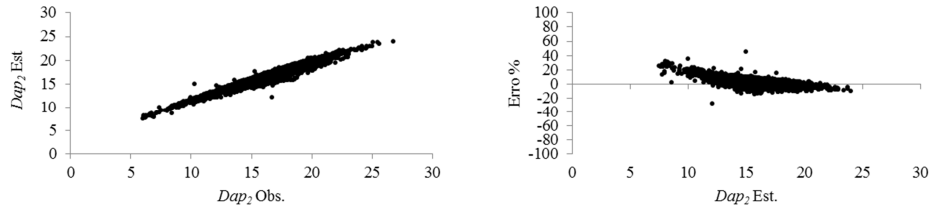
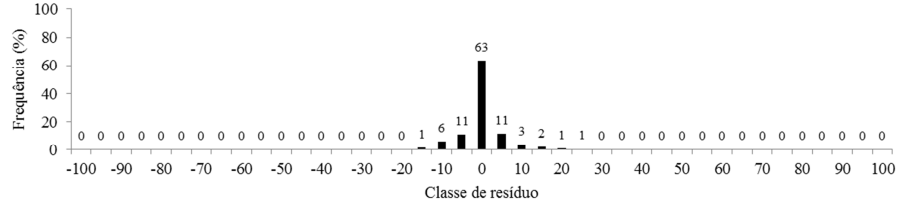


Figura 11 – Continuação.

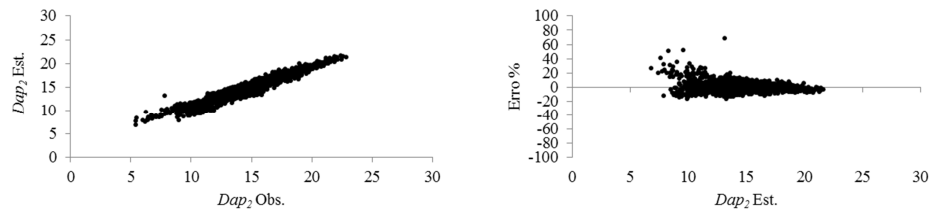
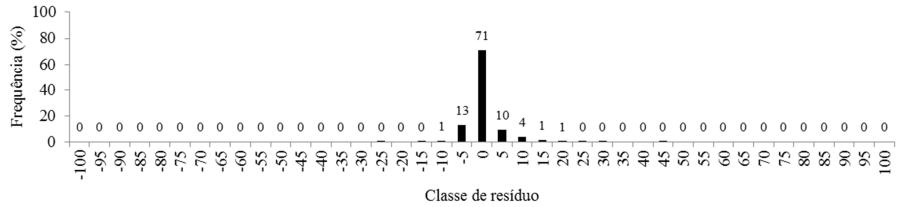
$$\ln dap_2 = \ln dap_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \varepsilon$$



A1



A2



A3

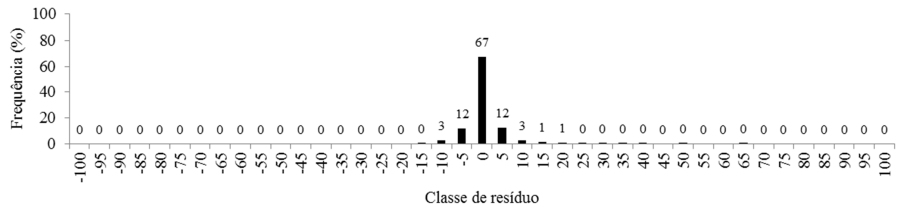
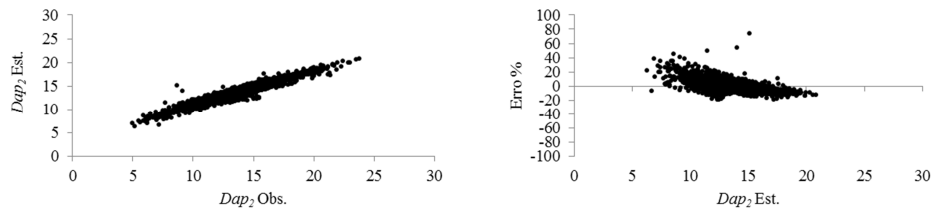
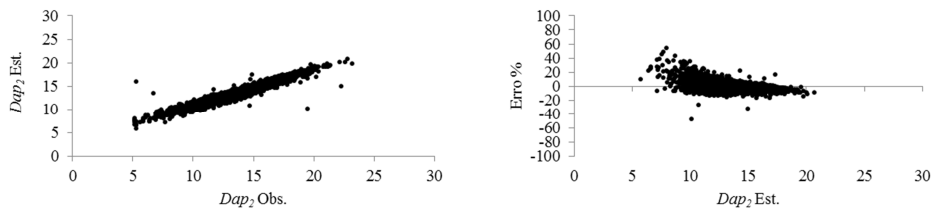
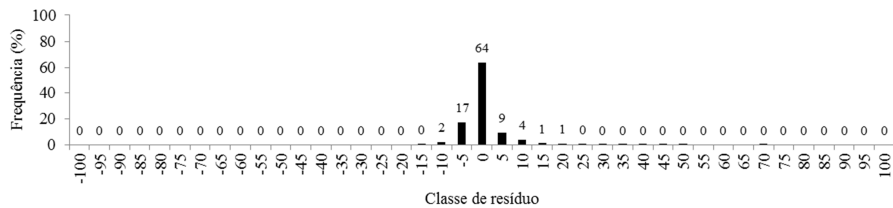


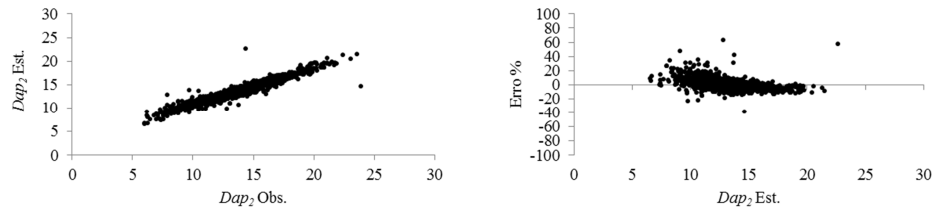
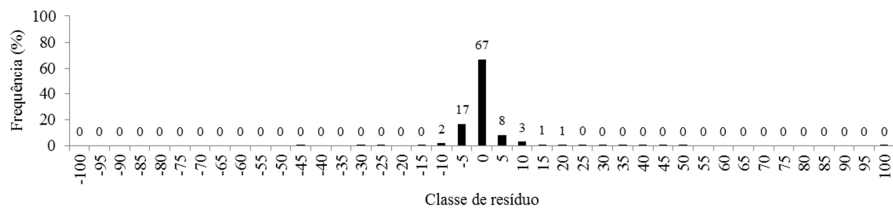
Figura 12 - Valores observados e estimativas de dap_2 , distribuição dos erros (%) e histograma de frequência de erros (%), conforme o Modelo 2.



B1



B2



B3

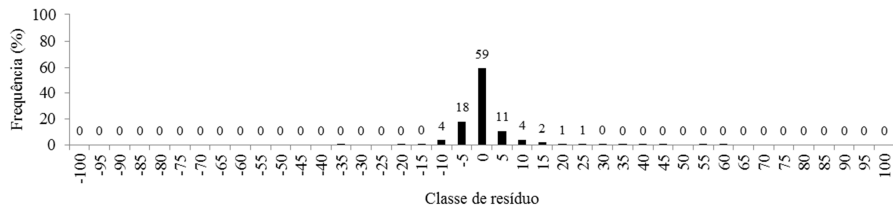
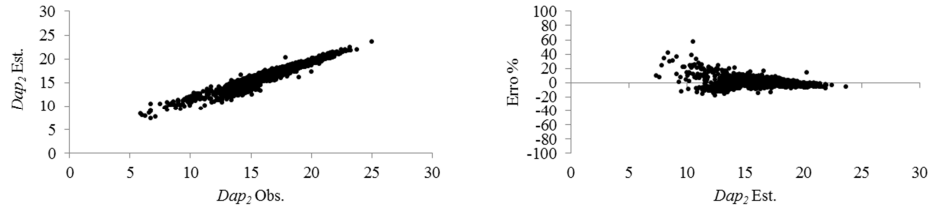
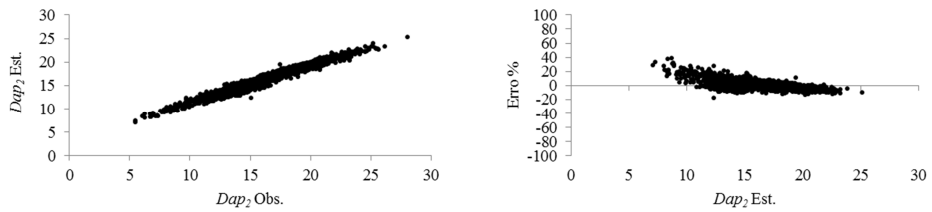


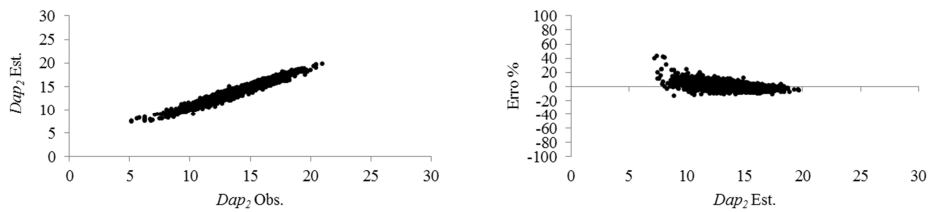
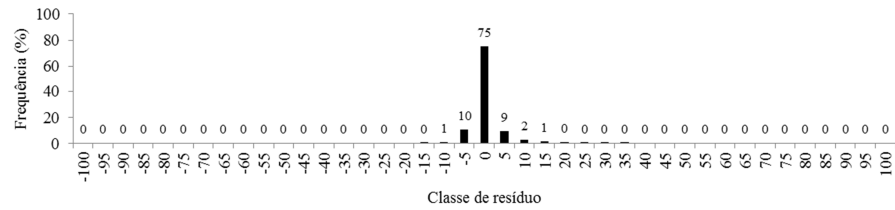
Figura 12 – Continuação.



C1



C2



C3

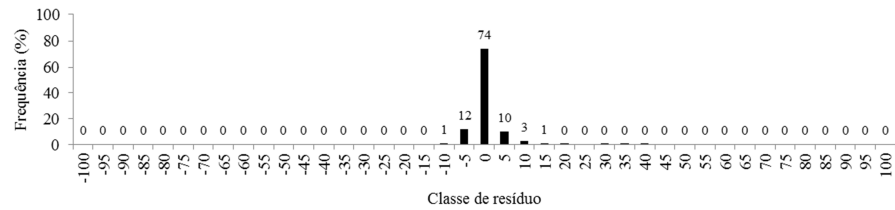
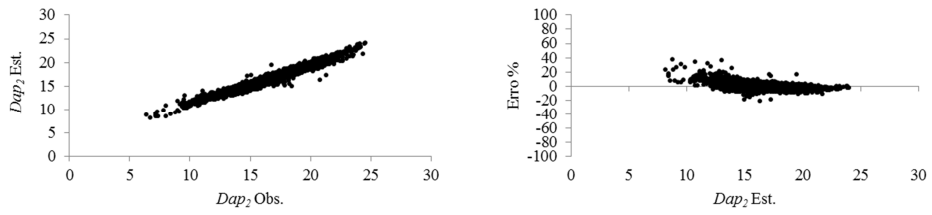
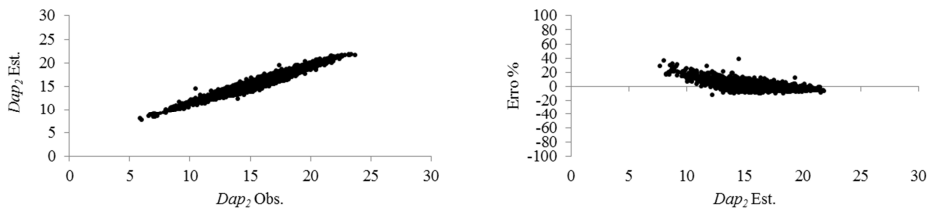
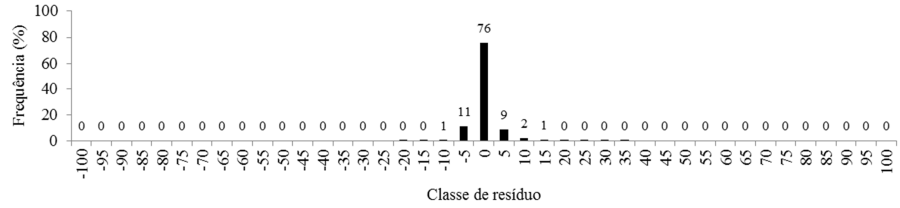


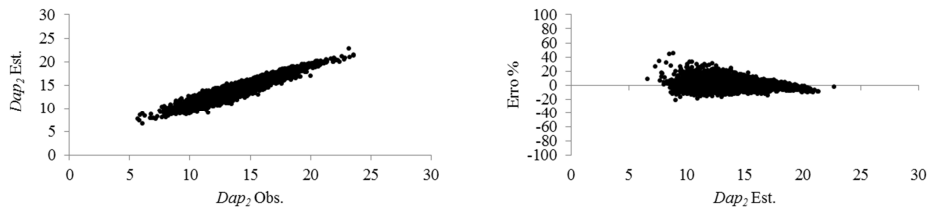
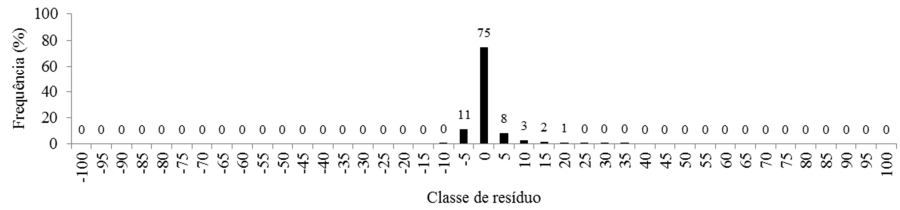
Figura 12 – Continuação.



D1



D2



D3

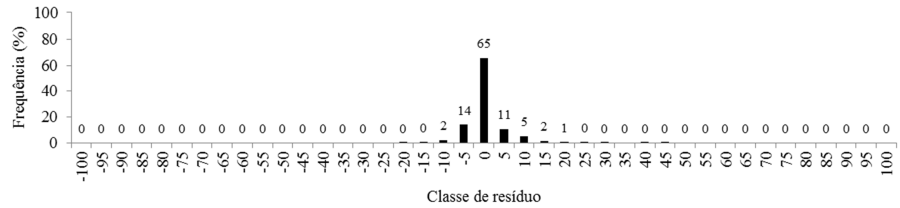


Figura 12 – Continuação.

4.7. Identificação do *dap* mínimo para geração de toras comerciais e número de toras por classe de diâmetro

Com base na quantificação do número médio de toras comerciais, de 6 m de comprimento e diâmetro maior ou igual a 7 cm, por classe de diâmetro e por classe de capacidade de local, determinou-se o percentual de indivíduos em cada classe que, após o processamento, resultariam em 0, 1, 2, 3 ou 4 toras (Tabela 3), bem como, foi determinado o percentual de volume obtido em cada classe, a partir de 0, 1, 2, 3 e 4 toras (Tabela 4).

A representação gráfica foi organizada conforme a média da distribuição diamétrica e o número médio de toras comerciais por projeto. No entanto, os dados foram processados em nível de parcela.

Os gráficos mostram a distribuição diamétrica e a frequência de árvores, por classe de diâmetro, projetadas para 84 meses. No eixo vertical secundário é apresentado o número de toras comerciais com as medidas aludidas obtidas em cada classe diamétrica (Figura 13).

Tabela 3 - Percentual do número médio de toras comerciais geradas por indivíduo em cada classe de local

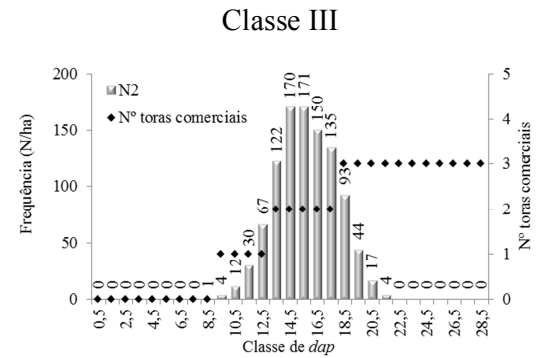
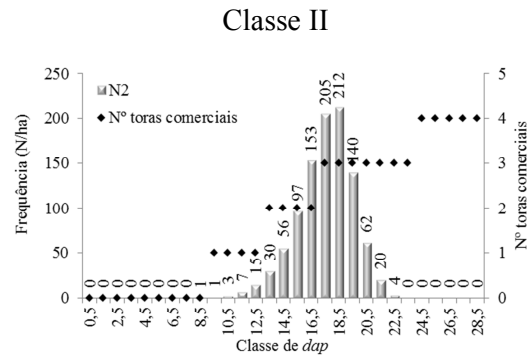
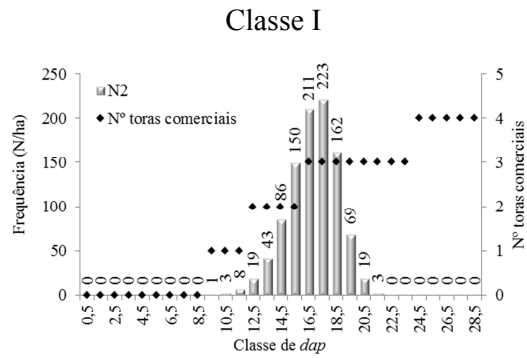
Nº de toras comerciais	Classe I	Classe II	Classe III
0	0,0%	0,0%	0,1%
1	0,8%	1,4%	8,8%
2	26,6%	37,5%	79,9%
3	72,0%	61,1%	11,1%
4	0,6%	0,0%	0,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%

Tabela 4 - Percentual volume obtido conforme o número de toras geradas por indivíduo e por classe de local

Nº de toras comerciais	Classe I	Classe II	Classe III
0	0,1%	0,1%	0,6%
1	1,9%	3,3%	16,4%
2	33,6%	46,5%	76,7%
3	64,1%	50,1%	6,4%
4	0,4%	0,0%	0,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%

Região

A



B

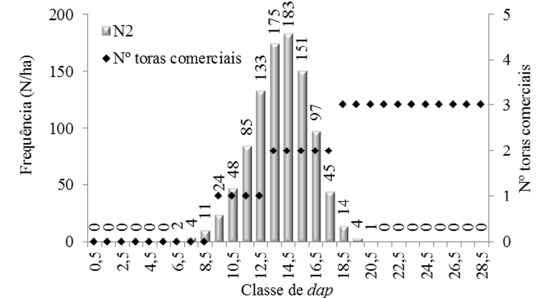
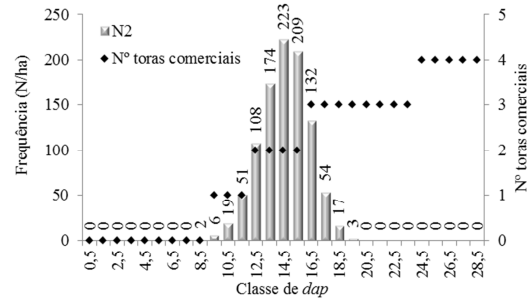
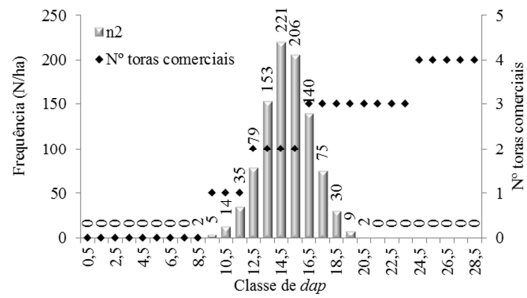
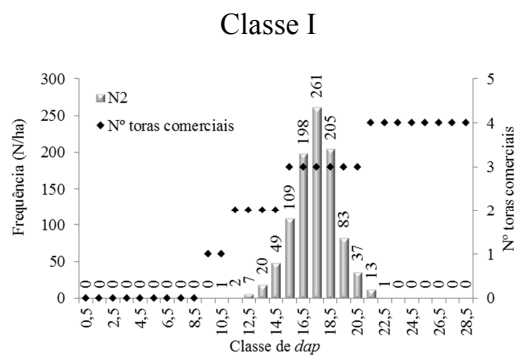


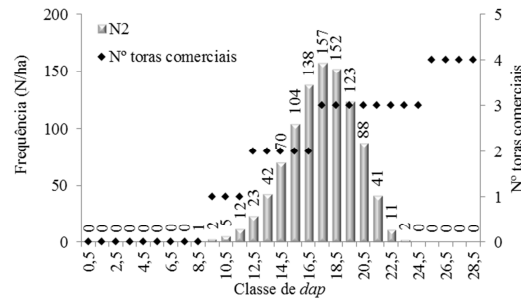
Figura 13 - Número médio de toras comerciais, de 6 m de comprimento e diâmetro comercial maior ou igual a 7 cm, por classe de diâmetro e por projeto, e identificação do *dap* mínimo para geração de toras comerciais por classe de capacidade produtiva.

Região

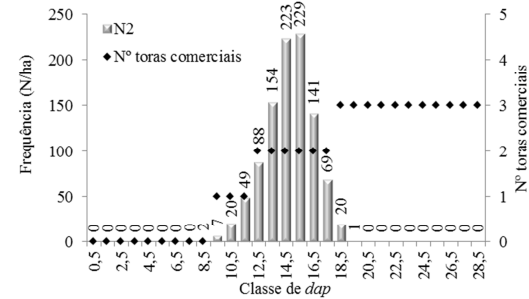
C



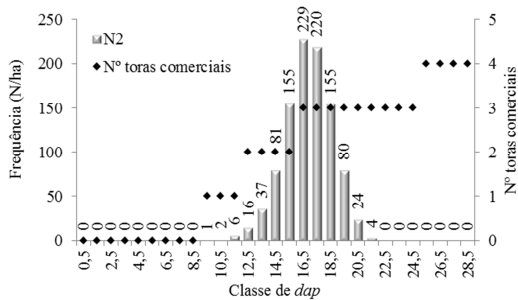
Classe II



Classe III



D



5. DISCUSSÃO

De acordo com as Figuras 1 e 2, os modelos de altura dominante e altura total ajustaram-se bem aos dados. Em relação aos modelos de altura total testados, todos apresentaram alto valor dos coeficientes de determinação. No entanto, optou-se pela equação (5) por apresentar melhor distribuição dos resíduos, quando comparada com as demais.

Através da análise gráfica da distribuição diamétrica (Figura 3) é possível ressaltar que os dados observados não seguem uma distribuição normal perfeita, existindo até mesmo classes intermediárias sem a ocorrência de indivíduos. Fato que destaca a principal desvantagem da função Weibull, a unimodalidade, conforme citado por Ayala (2002). Contudo, nota-se que a função Weibull ajustou-se adequadamente aos dados observados, como mostra o resultado obtido pelo teste Kolmogorov-Smirnov (KS).

Os resultados significativos obtidos no teste KS podem ser explicados tanto pela amplitude de classe nas quais os dados foram agrupados, como pela idade das árvores. Ao estudar a projeção da distribuição diamétrica em diferentes amplitudes de classe, Araújo Júnior et al. (2010) afirmaram que a amplitude de classe modifica significativamente a forma da distribuição, bem como influem no teste não paramétrico, cujos valores de referência são dados em função do número de classes presentes na distribuição. Em relação à idade das parcelas, Ferraz Filho et al. (2015) ressaltaram que os dados observados com menor idade apresentaram menor aderência à distribuição estimada pelo teste KS, a 1% de probabilidade.

O ajuste dos modelos de distribuição diamétrica mostrou-se adequados aos dados, sendo que, os maiores valores de coeficientes de determinação ajustados foram obtidos para as equações de N_2 e Ht , 98,17% e 96,89%, respectivamente.

Já os menores coeficientes de determinação ajustados foram 37,89% e 45,58%, para N_2 e γ_2 , respectivamente. Entretanto, a partir de uma avaliação holística de todos os projetos, adicionada à análise gráfica (Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9) observou-se que as equações de $Dmin_2$ e γ_2 apresentaram estimativas mais distantes dos valores observados.

As equações foram ajustadas por projeto, o que reduziu o número de dados observados para cada ajustamento. Por esse motivo, evitou-se a eliminação de outliers para não suscitar descaracterização da amostra da área em estudo.

Ademais, o modelo utilizado mostrou-se biologicamente correto e consistente, visto que as distribuições diamétricas se achataram e deslocaram para a direita com o passar do tempo, comportamento natural em povoamentos equiâneos (Leite et al., 2005).

Em referência ao ajuste do modelo de afilamento, é possível constatar que aproximadamente 93% dos casos resultaram em um erro relativo de $\pm 5,0\%$ (Figura 10). Em análise simultânea ao coeficiente de determinação ajustado (99,72%) atesta-se um ajuste adequado.

O desempenho do modelo de Garay (1979) para povoamentos equiâneos dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* foram comprovados por vários autores (CAMPOS et al., 2014; SOUZA et al., 2008), bem como, para outros gêneros também (LEITE et al., 2006). Destarte, o supracitado modelo foi selecionado para compor este estudo.

As funções de crescimento em diâmetro geralmente são empregadas em modelos de árvores individuais, nos quais a árvore é a unidade básica de modelagem. Esses modelos resultam em conhecimentos detalhados da estrutura horizontal e vertical dos povoamentos florestais (CAMPOS E LEITE, 2013).

As equações utilizadas para estimar o diâmetro futuro apresentaram ajuste satisfatório, uma vez que os maiores valores de coeficiente de determinação ajustado foram 97,07% e 93,98%, para os modelos 1 e 2 respectivamente. Os valores mínimos obtidos para os modelos 1 e 2 foram 91,21% e 87,72%, respectivamente. Diante do exposto, ressalta-se que o ajuste da equação 1 mostrou-se mais adequado aos dados observados.

Ao propor uma metodologia para inclusão de variáveis sociais em modelos de planejamento florestal, Monte (2012) recomendou a doação à comunidade de árvores que, no momento do corte, apresentarem *dap* inferior a 11 cm, posto que, na maioria das vezes, não originam toras de 6 m de comprimento, a serem destinadas à celulose.

A aplicação de uma equação de afilamento a um povoamento cuja estrutura diamétrica é conhecida, resulta em indicações da menor classe de diâmetro apta a gerar pelo menos uma tora com atributos comerciais, conforme supracitado. Do mesmo modo, o modelo de *taper* possibilita a quantificação do total de toras obtidas a partir da distribuição diamétrica e, ainda, extrapolar por hectare.

Empregando essa metodologia verificou-se que, aos 84 meses de idade, o *dap* mínimo para a geração de pelo menos uma (1) tora comercial é 9 cm, independente da capacidade produtiva (Figura 13). No entanto, a classe produtiva influencia a

ocorrência de indivíduos em classes inferiores ao *dap* mínimo. Para a Classe I, com maiores índices de local, houve a geração de pelo menos 1 tora comercial, a exceção é observada no projeto localizado na Região B em que se estimou 2 árvores/ha com *dap* inferior a 9 cm.

Para a classe intermediária, a maioria dos projetos apresentou pelo menos um indivíduo com diâmetro inferior a 9 cm, logo não sendo viável a produção de nenhuma tora comercial. Nesta classe, a ressalva é o projeto localizado na Região D, cuja distribuição diamétrica média demonstrou a ocorrência de indivíduos com *dap* superior a 9 cm.

Na Classe III, cujo potencial de produção é inferior às demais classes, é possível constatar que a distribuição de diâmetros para todos os projetos resulta em pelo menos um indivíduo com o *dap* inferior ao *dap* mínimo aludido. Evidenciando o projeto localizado na Região B, que possui 16 árvores/ha com *dap* inferior a 9 cm.

Ressalta-se também que a geração de 3 ou 4 toras comerciais por indivíduo é notadamente superior nas Classes de produtividade I e II, em relação à Classe III, em que na maioria das classes de diâmetro são geradas apenas 2 toras por indivíduo.

Essas constatações são importantes para o planejamento da produção florestal, principalmente no que se refere à colheita, visto que o custo dessas atividades decresce em relação ao aumento do *dap*. Ademais, os investimentos de formação de floresta não são recuperados no caso daqueles indivíduos inaptos a geração de pelo menos uma tora de dimensões ditas comerciais. Para saber quais árvores não atingirão o diâmetro mínimo de 9 cm podem ser empregadas as equações ajustadas para projeção do *dap* futuro em função do *dap* atual. Este tipo de aplicação pode ser utilizado com dados de um primeiro inventário, geralmente feitos numa idade entre 1,5 e 2,5 anos.

Recomenda-se, portanto, estudos para inclusão da projeção do *dap* em modelos de planejamento florestal, bem como, avaliações de multiprodutos, visando, respectivamente, a identificação prévia dos indivíduos que no momento do corte não gerarão toras comerciais e alternativas rentáveis para estes. Depreende-se a importância de utilizar modelos de distribuição de diâmetros, ou de árvores individuais, e de modelos de *taper*, como parte do terceiro elemento essencial do manejo, que é a prognose.

6. CONCLUSÕES

Árvores com *dap* menor ou igual a 9 cm, no momento do corte, não resultam em madeira para produção de celulose, considerando um comprimento de 6 m e um diâmetro comercial mínimo de 7 cm.

A distribuição de diâmetros dos povoamentos amostrados segue a distribuição Weibull.

O método proposto para determinar o *dap* mínimo em que se obtém pelo menos uma tora de dimensões comerciais, destinada à produção de madeira para celulose, e para quantificar o número de toras geradas por classe de diâmetro, é consistente e de aplicação simples em manejo florestal.

Os modelos testados para estimar o crescimento em *dap* são eficientes e podem ser utilizados para definir, em um primeiro inventário, indivíduos que não vão gerar madeira para celulose.

É possível prever, em uma idade inicial jovem, quais árvores não irão resultar em madeira para celulose, por ocasião do corte final.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; MIRANDA, R. O. V.; CASTRO, R. V. O; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1275-1281, 2010.
- AYALA, D. M.; NÁVAR-CHÁIDEZ, J. Ajuste y predicción de la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de plantaciones de pino de Durango, México. **Madera y Bosques**, v. 8, p. 61-72, 2002.
- BATISTA, J. L. F.; MARQUESINI, M.; VIANA, V. M. Equações de volume para árvores de caxeta (*Tabebuia cassinoides*) no Estado de São Paulo e sul do Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 162-175, 2004.
- BIGING, G. S. *Taper* equations for second mixed-conifers of Northean California. **Forest Science**, v. 30, n. 4, p. 1103-1117, 1984.
- BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; SILVA, M. L. M.; GARCIA, S. L. R.; CRUZ, J. P. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, p. 147-156, 2010.
- BINOTI, D. H. B. **Sistemas computacionais aplicados ao Manejo Florestal**. 2012. 113f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.
- CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S. Efeito do modelo de afilamento utilizado sobre a conversão de fustes de árvores em multiprodutos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 513-520, 2014
- DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987. 790 p.
- DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible *taper* equations. **Forest Science**, v. 18, n. 3, p. 241-245, 1972.
- FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M. Modeling growth and yield of loblolly pine stands under intensive management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 8, p. 707-717, 2015.

GARAY, L. **Tropical forest utilization system**. VIII. A *taper* model for entire stem profile including buttressing. Seatlhe. Coll. Forest. Resour., Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64p.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. H. G. *Taper* functions and their application in Forest inventory. **Forestry Chronicle**, v. 45, n. 4, p. 278-283, 1969.

KVÅLSETH, T. O. Cautionary note about R^2 . **The American Statistician**, v. 39, n. 4, p. 279-285. 1985

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CAMPOS, J. C. C.; SOUZA, A. L.; CARVALHO, A. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamento de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 271-280, 2005.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CAMPOS, J. C. C.; TAKIZAWA, F. H.; RODRIGUES, F. L. Um modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v. 30, p. 89-98, 2006

LEITE, H. G.; NETO, R. R. O.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M.; BINOTI, M. L. M. S.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 53-59, 2011

LIMA, F. S. **Análise de funções de taper destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii***. 1986. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

MAX, T. A; BURKHART, H. E. Segmented polinomial regression applied to *taper* equations. **Forest Science**, v. 22, n. 3, p. 283-289, 1976.

MONTE, M. A. **Inclusão de critérios sociais na modelagem matemática do planejamento florestal**. 2012. 74p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MURTHY, D. N. P.; XIE, M.; JIANG, R. **Weibull models**. Wiley series in probability and statistics, 2004. 396p.

NOGUEIRA, G. S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2003. 132p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; CARVALHO, A. F.; SOUZA, A. L. de. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v. 29, p. 579-589, 2005.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; Campos, J.C.C.; TAKIZAWA, F. H.; Couto, L. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de

Tectona grandis submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, p. 377-387, 2006.

PRODAN, M., PETERS, R., COX, F., et al. **Mensura forestal**. San José, Costa Rica: IICA, 1997. 586p.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Estimativas de volume, peso seco, peso de óleo e quantidade de moirões para candeia (*Eremanthus erytropappus*). **Revista Cerne**, v. 10, n. 1, p. 87-102, 2004.

SOARES, T. S. **Otimização do uso da madeira em povoamentos de eucalipto**. 2002. 49f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SOARES, T. S., VALE, A. B., LEITE, H. G., MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 811-820, 2003.

SOARES, C. P. B.; DEMOLINARI, R. A.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. de. Predição do crescimento em povoamentos clonais de eucalipto não desbastados utilizando matrizes de transição não estacionárias. **Revista Árvore**, v. 33, p. 831-840, 2009.

SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE JUNIOR, H. U.; SILVA, G. F.; FIGUEIREDO, L. T. M. Equações hipsométricas, volumétricas e de *taper* para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, 2011.

SOUZA, C. A. M. de; SILVA, G. F. da; XAVIER, A. C.; MENDONÇA, A. R. de; ALMEIDA, A. Q. de. Avaliação de modelos de afilamento não segmentados na estimação da altura e volume comercial de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 387 - 399, 2008