



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**TAÍSE SEVERO AOZANI**

**PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E DA ALTURA DE ÁRVORES DE ESPÉCIES  
NATIVAS EM PLANTIOS PUROS NO ESPÍRITO SANTO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ADRIANO RIBEIRO DE MENDONÇA**

**COORIENTADOR: PROF. DR. GILSON FERNANDES DA SILVA**

**JERÔNIMO MONTEIRO – ES**

**JULHO - 2016**

TAÍSE SEVERO AOZANI

**PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E DA ALTURA DE ÁRVORES DE ESPÉCIES  
NATIVAS EM PLANTIOS PUROS NO ESPÍRITO SANTO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais, na Área de concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça  
Coorientador: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva

JERÔNIMO MONTEIRO – ES  
JULHO– 2016

## Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)

(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Aozani, Taíse Severo, 1990-

A638p      Projeção do diâmetro e da altura de árvores de espécies nativas em plantios puros no espírito santo / Taíse Severo Aozani. – 2016.

72 f. : il.

Orientador: Adriano Ribeiro de Mendonça.

Coorientadora: Gilson Fernandes da Silva.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Competição (Biologia). 2. Modelos estocásticos. 3. Angico-preto. 4. Aroeira do sertão. 5. Breu vermelho. I. Mendonça, Adriano Ribeiro de. II. Silva, Gilson Fernandes da. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 630

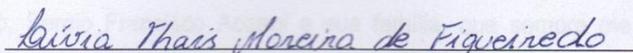
---

**PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E DA ALTURA DE ÁRVORES DE ESPÉCIES  
NATIVAS EM PLANTIOS PUROS NO ESPÍRITO SANTO**

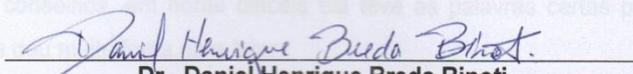
**Taise Severo Aozani**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

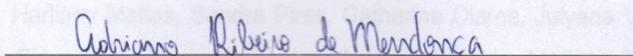
Aprovada em 27 de Julho de 2016.

  
**Dr<sup>a</sup>. Livia Thais Moreira de Figueiredo**

UFES  
Examinadora Externa

  
**Dr. Daniel Henrique Breda Binoti**

UFES  
Examinador Externo

  
**Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça**

UFES  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois creio que sem ele nada é possível.

Ao Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça, por toda paciência, incentivo, amizade e orientação ao longo de todo curso. Tenho-lhe grande estima não só como orientador, mas também pela pessoa que é.

Aos meus pais, Mauro David Aozani e Neiva Severo Aozani, por todo amor, apoio e incentivo.

Aos meus irmãos, Rafael Henrique Aozani e Munik Severo Aozani, que são meus fiéis e eternos amigos.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva pela importante ajuda e sugestões oferecidas.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade de estudo;

Ao meu tio, Sergio Francisco Aozani e sua família, que sempre me apoiaram e incentivaram.

A minha querida vizinha Nair Antoninha Aozani, que por muitas vezes me deu conforto e conselhos, em horas difíceis ela teve as palavras certas pra me dizer. Sempre me deu muita força para lutar.

Aos meus parceiros do laboratório de Manejo Florestal: Márcia Fernandes, Evandro Ferreira, Giovanni Correia, Luciana Lorenzoni, Luandson Souza, Janiel Cerqueira, Eth Rocha, Harliany Matias, Sandra Pires, Catherine Claros, Julyana Viana, Daniel Binoti, Livia Figueiredo, Jeangelis Santos, Antônio Almeida, Mariana Aragão, Anny Ataide, Jeferson Martins e Isáira Lopes, Antônio, Rodrigo e Clayton, pela ajuda, boa convivência e, principalmente, amizade. Em especial ao Giovanni que muito me auxiliou no desenvolvimento deste trabalho, e ao Evandro e a Marcia, meus parceiros e amigos de todas as horas, a vocês meu MUITO OBRIGADA!

Aos amigos Roberto Rorras, Sabrina Barros e Sara Freitas que me deram muita força e incentivo, mas principalmente pela amizade. Em especial ao Rorras, que morou comigo por mais de ano, sendo um irmão.

Aos amigos da pós, os quais vou levar em meu coração: Saulo Boldrini, Anderson (vulgo Pajé), Nicacio, Julia Moreau, Denise Soranso (que me recebeu em JM), o casal do Pará Elvis e Vanessa, Marcelo Dan (Marcelão), Flavio Carmo, Fabrina Ferraz, Marks, Sueliane, Genilda e Tamiris.

Aos meus amigos Denize Rocha, Adriana Ribeiro, Welyton Martins, Ilvan Junior, Jailson Machado e Felipe Barros, que sempre me deram força e estímulo para seguir minha caminhada.

Conhecer e/ou conviver com todos vocês me faz uma pessoa melhor!

## SUMÁRIO

RESUMO .....	8
ABSTRACT .....	10
1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1. Objetivo geral .....	14
2.2. Objetivos específicos .....	14
3.1. Florestas nativas .....	15
3.2. Modelos de crescimento e produção florestal .....	16
3.3. Modelos de crescimento de árvores individuais .....	18
3.4. Índices de competição .....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	22
4.1. Descrição da área de estudo e coleta dos dados .....	24
4.2. Índices de competição .....	26
4.3. Ajuste dos modelos de projeção do diâmetro e da altura .....	27
4.4. Avaliação do ajuste e da validação dos modelos de projeção do diâmetro e da altura .....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
5.1. Índices de competição .....	31
5.2. Avaliação dos modelos de projeção do diâmetro .....	34
5.3. Avaliação dos modelos de projeção da altura .....	40
5.4. Validação dos modelos de projeção do diâmetro e da altura .....	47
6. CONCLUSÕES .....	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58
8. ANEXOS .....	63

## RESUMO

AOZANI, Taíse Severo, **Projeção do diâmetro e da altura de árvores de espécies nativas em plantios puros no Espírito Santo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro. Orientador: Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça. Coorientador: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva.

A projeção do crescimento de florestas é essencial para o planejamento e análise econômica de projetos florestais. Os modelos de regressão são ferramentas utilizadas para se fazer esta projeção. Modelos de árvores individuais são usados quando se deseja um maior detalhamento da floresta e estes estimam o crescimento, a mortalidade e a competição de cada árvore. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar modelos para projeção do diâmetro e da altura total de árvores em plantios puros de três espécies nativas. As espécies avaliadas foram: breu vermelho (*Protium heptaphyllum* (Aubl.) March), angico preto (*Senegalia polyphylla* Dc.) e aroeira do sertão (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All). Primeiramente foram calculados seis índices de competição independentes da distância. Também foram obtidos os coeficientes de correlação entre estes índices e as variáveis idade, crescimento em altura, diâmetro e área basal. Após isso, foi aplicado o teste *t* de Student para avaliar a significância desta correlação. Foram selecionados seis modelos para projetar o diâmetro e a altura das árvores das espécies em estudo. A base de dados foi dividida em 70% dos dados para o ajuste dos modelos e 30% para utilizados para validação dos mesmos. Para selecionar o melhor modelo foram utilizadas as estatísticas Raiz do quadrado médio do erro (RQME); Viés (V); Média das diferenças absolutas (MD), além da análise gráfica dos resíduos. O IID<sub>5</sub> de Tomé e Burkart (1989) apresentou melhores resultados para avaliar a competição entre as árvores para o angico preto e a aroeira do sertão. Para o breu vermelho o melhor índice foi o IID<sub>4</sub> de Glover e Hool (1979). Após as análises dos modelos de projeção, pôde-se observar que o modelo de Pienaar e Schiver (1981) foi o mais exato para projetar o diâmetro de árvores de angico preto e o modelo de Schumacher adaptado de Campos e Leite (2009) para a aroeira do sertão, não havendo diferença entre os modelos ajustados para o breu vermelho. O modelo

Adaptado de Bella (1971), Sterba e Monserud (1997) foi o que melhor estimou as alturas para as três espécies em estudo.

**Palavras chave:** Competição; modelos estocásticos; angico preto; aroeira do sertão; breu vermelho.

## ABSTRACT

AOZANI, Taíse Severo, **Height and diameter projection of individual trees of native species in pure stands in the Espírito Santo state**. 2016. Dissertation (Master in Forest Science) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça. Coadvisor: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva.

The forest growth prognosis is essential for the planning and economic analysis of forest projects. The regression models are tools used to make this projection. Individual tree models are used when you want more detailing of forest and these are used for estimate of the growth, mortality and competition of each tree. In this sense, the objective of this study was to evaluate models for projection of the diameter and the total height of trees in pure stands of three native species. The evaluated species were: breu vermelho (*Protium heptaphyllum* (Aubl.) March), angico preto (*Senegalia polyphylla* Dc.) and aroeira do sertão (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All). First, were calculated six competition indexes independent of the distance. To evaluate the relationship of competition indexes were calculated the correlation coefficients between these indexes and the age, height growth, diameter and basal area variables. After that, was applied the Student t test to assess the correlation significance. Six models were selected to estimate the diameter and height of the species under study, where 70% of the data were used to adjust of the models and 30% for validation. To select the best projection model, were used the Root Mean Squared Error (RMSE); Bias (B); Absolute Differences Mean (DM), beyond residues graphical analysis statistics. The IID5 of Thomas and Burkart (1989) shows better results to evaluate the competition between the trees for the angico preto and aroeira do sertão. The best index for the breu vermelho was the IID4 of Glover and Hool (1979). After the analysis, it was possible to observe that the Pienaar and Schiver (1981) model was the most accurate to estimate the diameter of the angico preto specie, and the Schumacher model adapted from Campos and Leite (2009) for the aroeira do sertão, no having difference between the models that were adjusted for the breu vermelho. The adapted model from Bella (1971), Sterba and Monserud (1997), was the best that estimated the heights for the three species studied.

**Keywords:** Competition; stochastic models; angico preto; aroeira do sertão; breu vermelho.

## 1. INTRODUÇÃO

O alto índice de desmatamento e conseqüente diminuição da cobertura florestal no Brasil têm se tornado motivo de preocupação. Com isso, as indústrias madeireiras investem cada vez mais em plantios de espécies de elevado valor comercial e rápido crescimento, mantendo sua produção com madeiras oriundas de florestas plantadas, ao passo que preservam as florestas nativas.

A madeira de espécies nativas geralmente são de alto valor comercial e maior durabilidade quando comparadas a madeira de eucalipto, por exemplo. Neste contexto, o plantio de espécies nativas para fins comerciais é uma alternativa para suprir a demanda e ao mesmo tempo preservar as florestas nativas. Os plantios de árvores para fins industriais representam uma importante cadeia produtiva no cenário brasileiro, cujo maior benefício ao país pode ser resumido nos fundamentos da sustentabilidade – econômico, social e ambiental (IBÁ, 2015). No entanto o plantio de espécies nativas ainda é pequeno, a madeira de nativas comercializada ainda é, em sua maioria, oriunda de florestas nativas.

Nesse contexto, torna-se de grande importância o planejamento florestal adequado, em que algumas premissas devem acontecer antes da formulação e execução do mesmo, sendo uma delas a projeção do crescimento e da produção, que auxilia na tomada de decisões. A estimativa de estoques de crescimento é um importante elemento no manejo florestal, uma vez que fornece informações quantitativas sobre a floresta, auxiliando na definição de planos de manejo e em análises econômicas de prescrições de manejo (TEMPS, 2005).

O crescimento de uma floresta se dá pelo aumento das dimensões de um ou mais indivíduos em um determinado período de tempo, sendo este influenciado pelas características da espécie e interação com o ambiente. Por meio da modelagem é possível prognosticar o crescimento das variáveis dendrométricas em função de variáveis quantificadas do povoamento florestal, por meio de análise de regressão (CUNHA, 2009).

Nos reflorestamentos comerciais com espécies nativas, cujo objetivo é geralmente a produção de madeira serrada e produção de laminados, os modelos de crescimento de árvores individuais apresentam como vantagem o maior detalhamento do crescimento das árvores (CAMPOS; LEITE, 2013). Com esses modelos é possível obter a projeção do diâmetro e da altura para cada árvore do

povoamento, o que possibilita a exploração de multiprodutos da floresta e um melhor planejamento da produção.

Segundo Hasenauer (2000), os modelos de crescimento de árvores individuais são compostos de outros submodelos capazes de estimar a mortalidade e a competição. Os índices de competição são ferramentas importantes para modelagem do crescimento, pois por meio do seu emprego é possível determinar o nível de supressão da árvore em relação à sua competidora. Na predição do crescimento de árvores individuais, os índices de competição estão entre as variáveis explicativas mais utilizadas (MARTINS et al., 2011).

Ainda são poucos os estudos para modelagem de árvores individuais no Brasil, principalmente em plantios de nativas. Castro et al. (2013), Martins (2011), Fraga Filho (2016), Vieira (2015), trabalharam com modelos de regressão e redes neurais artificiais em nível de árvores individuais, porém esses autores utilizaram dados de plantios comerciais de eucalipto. Já Chassot (2009) modelou o crescimento em diâmetro de *Araucaria angustifolia*.

Martins (2011) afirma que a maior complexidade dos modelos de crescimento e produção de árvores individuais é responsável pela carência de estudos no Brasil sobre o tema. Tendo em vista que a quantificação do crescimento e da produção florestal é fundamental para a elaboração do planejamento, consequentemente resultando em produto final de qualidade, é possível identificar a importância da modelagem do crescimento e da produção florestal, ressaltando também a contribuição do setor florestal na economia do país. Nesse sentido, justificam-se trabalhos voltados a este tema, de forma a contribuir com essa área de conhecimento, desenvolvendo modelos com mais informação, que auxiliem melhor as tomadas de decisão.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar modelos para projeção do diâmetro e da altura total de árvores em plantios puros de três espécies nativas.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar a correlação entre os índices de competição e o crescimento em diâmetro e altura de árvores de três espécies nativas;
- Selecionar o melhor índice de competição para cada espécie;
- Analisar a exatidão de modelos para projeção de diâmetro e da altura total de árvores de três espécies nativas.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. Florestas nativas

Uma forma de diminuir a pressão sobre as florestas nativas e ao mesmo tempo preservá-las, é plantando florestas para suprir a demanda de madeira. Como há muitos anos os recursos da Mata Atlântica vêm sendo devastados, o plantio de espécies florestais tornou-se uma alternativa para suprir a demanda de madeira e garantir a colheita e a continuidade do uso da mesma em diversas finalidades e partes do mundo, além da preservação do bioma.

O pouco conhecimento sobre a silvicultura e o manejo das espécies nativas para plantios comerciais torna o investimento de plantio arriscado e, conseqüentemente, pouco atrativo e tendo em vista o grande conhecimento que já se tem sobre o eucalipto, ele se torna primeira opção ao se pensar em plantar florestas (SCOLFORO, 2006).

No ano de 2014, o Brasil teve 7,74 milhões de hectares plantadas com árvores, obtendo um crescimento de 1,8% quando comparado com o ano de 2013. Dessa área plantada, 5,56 milhões de hectares é de *Eucalyptus*, e 1,59 milhões de hectares é de *Pinus*, sendo que apenas 0,59 milhões de hectares são ocupadas por outras espécies, como por exemplo, a acácia (*Acacia saligna*), teca (*Tectona grandis*), seringueira (*Hevea brasiliensis*), paricá (*Schizolobium parahyba*), entre outras (IBÁ, 2015). Dentre as mais variadas espécies florestais existentes no Brasil estão o breu vermelho (*Protium heptaphyllum* Aubl. March), o angico preto (*Senegalia polyphylla* Dc.) e a aroeira do sertão (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All.), que são espécies nativas utilizadas para diversas finalidades.

O breu vermelho é largamente encontrado na região amazônica, porém ocorre em todo o Brasil, em terrenos arenosos, úmidos ou secos, em várias formações vegetais. Possui madeira pesada, compacta, dura, dócil ao cepilho, bastante elástica, de grande durabilidade quando em lugares secos. Sua utilização é amplamente difundida, sendo usada na medicina popular, como analgésico, cicatrizante e expectorante; na indústria de verniz; na calafetagem de embarcações e em rituais religiosos (incenso), pela extração de resina de sua casca (CITÓ et al., 2006). É também usado para construção civil, obras internas, assoalhos, serviços de

torno, carpintaria e marcenaria. Tem madeira de cor bege-claro e marrom-vermelho-claro, com superfície lisa (LORENZI, 2008).

O angico preto ocorre na região amazônica até o Paraná, na floresta latifoliada semidecídua, nos os biomas Amazônia, Cerrado, Pantanal, Caatinga, Mata Atlântica. É particularmente frequente nos estados de Mato Grosso, Paraná e São Paulo. Tem madeira moderadamente pesada, mole, porém resistente, dócil ao cepilho e a serra, sua superfície é boa para envernizamento. Sua madeira é própria para o uso em marcenaria, peças torneadas, torno e obras internas, celulose e papel, carvão, lenha, carpintaria e marcenaria. Sua casca serve para curtimento de couros. É uma planta pioneira e rústica, que não pode faltar nos reflorestamentos destinados à preservação permanente (LORENZI, 2008).

A aroeira do sertão apresenta distribuição natural limitada a América do Sul, ocorrendo desde o Ceará (caatinga) até os estados do Paraná e Mato Grosso do Sul. É mais frequente no nordeste do país, oeste dos estados da BA, MG, SP e sul dos estados de MS, MT e GO (LORENZI, 2008). É uma espécie arbórea que apresenta grande valor econômico devido às propriedades químicas, biológicas e medicinais. Essas propriedades têm sido muito exploradas pela indústria de curtimento de couros e medicina popular nordestina no tratamento de doenças dermatológicas, ginecológicas e como cicatrizante natural (SOUZA et al., 2007). Sua madeira de cor bege-rosada ou pardo-avermelhada até muito escura, com superfície lisa, apresenta alta densidade (densidade  $1,19 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e alta resistência mecânica, considerada imputrescível, própria para ser usada em obras externas, construção civil, dormentes de linhas férreas, armações de pontes, assoalhos, na construção de caibros, ripas, vigas, peças torneadas, etc (PEREIRA et al., 2014).

### **3.2. Modelos de crescimento e produção florestal**

Segundo Clutter et al. (1983) e Davis e Johnson (1987), entender como ocorre o crescimento das árvores de um povoamento, qual tratamento silvicultural adotar, prever qual será a época de corte e a produtividade do povoamento são tarefas atribuídas aos profissionais da área florestal. O crescimento de uma árvore ou do povoamento é o fenômeno mais importante da floresta, sendo que o mesmo consiste no alongamento e engrossamento das raízes, tronco e galhos

(SCOLFORO, 2006). Isso causa mudanças na árvore, influenciando no volume, peso e na forma da árvore. Esse crescimento das árvores não é algo constante durante toda sua vida. O incremento em diâmetro e altura é maior até um determinado estágio, após isso começa a decrescer. Para a maioria das espécies o crescimento começa a estabilizar numa certa idade (CHASSOT, 2009).

A produção expressa a quantidade total de volume. É possível se obter o cálculo de volume sólido, árvore a árvore, por meio das equações volumétricas. As equações de volume, cujos modelos incluem como variável independente a altura e o DAP da árvore são mais gerais, podendo abranger sítios diferentes (COUTO; BASTOS, 1987). A produção é obtida ao somar os incrementos anuais até a idade de interesse, que pode expressa por meio de equações de produção (CAMPOS; LEITE, 2013).

Por meio dos modelos de crescimento e produção florestal é possível simular a dinâmica natural de um povoamento de modo a prever a sua produção no decorrer do tempo, em diferentes possibilidades de exploração. A projeção do crescimento e da produção florestal é importante para o planejamento e análise da viabilidade econômica dos projetos florestais, influenciando diretamente na decisão do manejador (SCOLFORO, 2006). Existem três categorias principais de modelos de crescimento e produção florestal, sendo eles os modelos de povoamento total (MPT), os modelos de distribuição diamétrica ou classe de tamanho (MDD) e os modelos de árvores individuais - MAI (DAVIS; JOHNSON, 1987). A escolha do modelo que se vai adotar depende basicamente do nível de detalhamento que se quer.

Os modelos de povoamento total são mais simples. Devem ser aplicados quando estimativas gerais sobre a população são desejadas. Estes modelos são inflexíveis para analisar desbastes a serem simulados no povoamento, além de não fornecer elementos para a avaliação econômica das várias opções de utilização dos produtos florestais (SCOLFORO, 2006). Os modelos de povoamento total estimam o crescimento e, ou, a produção a partir de atributos do povoamento e são indicados quando o objetivo é apenas o volume para a área plantada, como é o caso da fabricação de celulose ou carvão (CAMPOS; LEITE, 2013).

Os modelos de distribuição diamétrica possibilitam a avaliação econômica de produtos discriminados por classe de tamanho. Estes são utilizados na predição do crescimento em altura e volume das árvores por classe de diâmetro. Obtendo maior

detalhamento da produção é possível otimizar os rendimentos do povoamento por meio da utilização de multiprodutos (SCOLFORO, 2006). Empregando uma equação de volume, de *taper* ou de razão volumétrica, é possível estimar a produção por classe. Este modelo tem como principal característica o emprego de função de densidade de probabilidade, sendo comum o uso da função Weibull. É preciso estimar valores futuros de altura dominante e número de árvores por hectare, para que se possa obter produções futuras (CAMPOS; LEITE, 2013).

Já os modelos para árvore individual apresentam maior detalhamento e flexibilidade para avaliar opções de utilização e tratamentos no povoamento. Estes são mais complexos que os modelos para povoamento e de distribuição diamétrica, pois são constituídos por submodelos (MARTINS, 2011). Estes modelos estimam o crescimento e produção de cada árvore, em vez da parcela. Os dados para o ajuste destes modelos devem ser provenientes de parcelas permanentes, com número significativo de medições. As dimensões das árvores, diâmetro e altura, podem ser estimadas utilizando modelos de predição ou de projeção. Para o cálculo da produção, o volume individual de cada árvore é somado e extrapolado para a área total.

### **3.3. Modelos de crescimento de árvores individuais**

Modelos de árvores individuais são sistemas de equações e procedimentos utilizados para estimar crescimento e produção de povoamentos, utilizando as árvores como unidades de modelagem, em vez da parcela (CAMPOS; LEITE, 2013). O primeiro modelo simulador de árvore individual foi desenvolvido por Newhan, no ano de 1964, para povoamentos puros (HASENAUER, 2000). A partir de então, os pesquisadores passaram a trabalhar muito com a modelagem, orientada em árvores individuais.

Os modelos para árvores individuais (MAI) são mais complexos. Porém, tem como vantagem o detalhamento sobre a dinâmica da estrutura dos povoamentos. Nesses modelos cada árvore é a unidade de prognose. Estes modelos permitem estudar cada árvore individualmente, levando-se em conta suas características, a capacidade produtiva do local e as condições de competição às quais a árvore está submetida (HASENAUER, 2006). A mortalidade, a regeneração ou ingresso e o

crescimento dimensional (altura e diâmetro) são os três módulos ou submodelos que compõe um modelo de árvore individual (CAMPOS; LEITE, 2013).

A mortalidade é importante nos MAI, porém é uma variável muito difícil de ser avaliada e modelada (TEMPS, 2005). Ela pode ser regular ou irregular, sendo que a primeira é causada por fatores não catastróficos como competição, fatores genéticos e senescência, a qual pode ser mensurada. Já a irregular é gerada por causas catastróficas, que não são intrínsecas à árvore como pragas, incêndios, estresses ambientais e danos mecânicos, sendo sua ocorrência difícil de prever e mensurar (CAMPOS; LEITE, 2013). O recrutamento ou ingresso refere-se ao número de indivíduos medidos em uma idade qualquer que não foram medidos em idades anteriores, por não alcançarem um tamanho mínimo predeterminado (HASENAUER, 2000; CAMPOS; LEITE, 2013). Este, normalmente, é desconsiderado em florestas plantadas, tendo em vista o diâmetro mínimo de medição e a idade inicial de medição. O crescimento dimensional das árvores individuais pode ser abordado de duas maneiras: a primeira diz respeito à utilização de funções de crescimento e o segundo é a utilização de funções modificadoras do crescimento potencial (DAVIS; JOHNSON, 1987).

Existem ainda dois tipos de modelos de árvores individuais, que são os independentes da distância e os dependentes da distância. O primeiro é composto de uma função de projeção do diâmetro, uma função para projeção da altura e um componente de mortalidade, o qual não leva em consideração o porte e a distância das árvores vizinhas. Já o segundo é semelhante, no entanto, a competição é controlada utilizando índices de competição que na maioria das vezes contemplam características de árvores vizinhas (CAMPOS; LEITE, 2013).

Martins (2011), avaliando sete modelos para estimar o crescimento em altura para árvores individuais, concluiu que o modelo que melhor estimou a altura de plantios clonais híbridos não desbastados de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* foi o de Lundqvist – Korf. Vieira (2015) avaliou o desempenho de técnicas de inteligência artificial para projeção do *DAP* e *H* de árvores de eucalipto e concluiu que estas técnicas apresentam boa precisão na estimativa destas variáveis, podendo ser utilizadas na prognose do *DAP* e altura total das árvores. Já Fraga Filho (2016) avaliou duas estratégias para a estimação de volume pela projeção do *DAP* e altura total de modelos em nível de árvore individual, com e sem efeitos aleatórios. Chassot (2009) formulou um modelo de crescimento diamétrico para

árvores individuais da espécie *Araucaria angustifolia*, da Floresta Ombrófila Mista e concluiu que o diâmetro futuro é dependente do diâmetro atual e da posição sociológica.

### 3.4. Índices de competição

A competição é uma variável importante nos modelos de crescimento e produção, porém sua avaliação constitui um problema contínuo na área florestal, pois sua quantificação é algo difícil (CASTRO et al., 2014). Quando os recursos necessários para o crescimento da planta estão abaixo da sua demanda, afetando seu crescimento, então está havendo competição entre plantas (WEBER et al., 2008). Por meio dos índices de competição pode-se estimar a competição entre as plantas, permitindo assim, quantificar o quanto uma árvore-objeto está competindo com as demais competidoras (DAVIS et al., 2005). Os estudos sobre os índices em áreas com diversidade de espécies ainda são escassos (OHEIMB et al., 2011).

Os índices de competição podem ser independentes, dependentes ou semi-independentes da distância. Nos índices independentes da distância, o arranjo espacial é o mesmo para todos os indivíduos. Estes não utilizam informações da distribuição espacial dos indivíduos, sendo quantificados pela razão entre diâmetro e/ou altura das árvores e variáveis do povoamento, tais como área basal, diâmetro médio e altura média. Nos índices dependentes da distância (espaciais), os competidores são identificados baseados em seu tamanho e distância em relação à árvore-objeto. Já nos índices semi-independentes, que são similares aos independentes, consideram-se as parcelas ao redor da árvore objeto, ou seja, são aplicados os índices independentes da distância, porém espacialmente restrito a um número menor de árvores vizinhas, ao invés de todas as árvores da unidade amostral (CAMPOS; LEITE, 2013).

Por meio da utilização dos índices de competição, pode-se ter maior eficiência na modelagem do crescimento e da mortalidade de árvores individuais (CASTRO, 2011). A seguir são apresentados exemplos de índices de competição.

a) Índices de competição independentes da distância:

*a<sub>1</sub>) Índice de Glover e Hool (1979)*

$$IID = \frac{DAP_i^2}{\overline{DAP}^2} \quad (1)$$

em que:  $DAP_i$  = diâmetro da árvore-objeto (cm); e  $\overline{DAP}$  = média dos diâmetros das árvores da unidade amostral (cm).

a<sub>2</sub>) Índice de Glover e Hool (1979)

$$IID = \frac{H_i}{\bar{H}} \quad (2)$$

em que:  $H_i$  = altura total da árvore objeto (m); e  $\bar{H}$  = altura média das árvores da unidade amostral (m).

a<sub>3</sub>) Índice de Stage (1973)

$$IID = \frac{AS_i^2}{AS_q^2} \quad (3)$$

em que:  $AS_i$  = área seccional do fuste da árvore-objeto, medido a 1,30 m de altura ( $m^2$ ),  $AS_q$  = área seccional correspondente ao diâmetro quadrático médio ( $q$ ) dos fustes das árvores vizinhas ( $m^2$ );

b) Índices de competição dependentes da distância:

B<sub>1</sub>) Índice de Hegyi (1974)

$$IDD = \sum_{j=1}^{n_j} \frac{\left( \frac{DAP_i}{DAP_j} \right)}{L_{ij}} \quad (4)$$

em que:  $DAP_j$  = diâmetro da árvore-competidora (cm);  $DAP_i$  = diâmetro da árvore-objeto (cm);  $L_{ij}$  = distância entre as árvores-objeto e a árvore competidora (cm); e  $n_j$  = número de árvores competidoras.

*b<sub>2</sub>) Índice de Moore et al. (1973)*

$$IDD = \frac{DAP_i^2}{DAP_i^2 + DAP_j^2} L_{ij} \quad (5)$$

em que:  $DAP_i$  = diâmetro da árvore-objeto (cm);  $DAP_j$  = diâmetro da árvore competidora (cm);  $L_{ij}$  = distância entre a árvore-objeto e a árvore competidora (cm);

c) Índices de competição semi-independentes da distância:

*Índice adaptado por Glover e Hool (1979)*

$$ISD = \frac{DAP_i^2}{\overline{DAP}_n^2} \quad (6)$$

em que:  $DAP_i$  = diâmetro com casca do fuste da árvore-objeto, medido a 1,30 m (cm);  $\overline{DAP}_n$  = média aritmética dos diâmetros dos fustes de  $n$  árvores próximas da árvore-objeto (cm), limitadas a um raio de competição de 6 ou 3 m;

Martins (2011), avaliando cinco índices de competição independentes da distância, observou que o índice de BAL (*Basal Area Larger*), que é dado pela razão entre o diâmetro ( $DAP$ ) da árvore-objeto elevado ao quadrado e o diâmetro quadrático (cm) elevado ao quadrado, foi o que apresentou melhor desempenho para descrever a competição entre árvores, em plantios comerciais clonais híbridos não desbastados de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. Já Castro et al. (2014), avaliando a competição em nível de árvore individual em uma floresta

estacional semidecidual, estimou índices de competição para cada fuste, em cada medição, e observou que existe correlação significativa entre índices de competição, o crescimento e a mortalidade das árvores, e indicou os índices semi-independentes da distância para o estudo de crescimento e de mortalidade regular. Vieira (2015) avaliou competição entre clones de eucalipto de plantio comercial, por meio de cinco índices de competição e observou correlações significativas em classes de alta e média produtividade, encontrando correlações menores na classe de baixa produtividade.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Descrição da área de estudo e coleta dos dados

Os dados da pesquisa são oriundos de plantios puros de três espécies nativas, provenientes da Reserva Natural Vale, localizada no município de Linhares, ES, situados entre as coordenadas 19° 06' a 19° 18' de latitude sul e 39° 45' a 40° 19' de longitude oeste. Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo Aw, com clima tropical, com pluviosidade média de 1200 mm e temperatura média de 23,3 °C (ROLIM, 2006). As árvores foram plantadas em espaçamento de 2 x 2 m, em que cada espécie foi plantada em uma área de 784 m<sup>2</sup>, totalizando 196 árvores de cada espécie. As espécies utilizadas no presente estudo foram: *Protium heptaphyllum* (Aubl.) March (breu vermelho), *Senegalia polyphylla* (Dc.) Britton e Rose (angico preto) e *Myracrodruon urundeuva* (Fr.All.) Engl. (aroeira do sertão).

Foram coletados anualmente o diâmetro a 1,30 m da superfície do solo (*DAP*) e altura total (*H*) das árvores. O banco de dados foi dividido aleatoriamente, para cada espécie, em dois conjuntos: 70% para o ajuste dos modelos e 30% para validação. Na Tabela 1 são apresentadas as estatísticas descritivas relacionadas às variáveis dos povoamentos onde foram coletados os dados.

Tabela 1: Estatísticas descritivas das variáveis relacionadas ao povoamento das espécies analisadas.

angico preto							
Idade	N	DAP (cm)			H (m)		
		Min	Méd	Max	Min	Méd	Max
3	2411	5,0	5,5	6,8	3,5	4,4	5,5
4	2385	5,0	6,7	10,3	4,0	6,0	8,0
5	2372	5,0	7,7	13,4	4,5	6,8	10,5
6	2334	5,0	8,4	15,1	5,5	8,3	11,5
7	1531	5,0	9,2	17,3	5,5	8,6	12,0
8	1531	5,0	9,8	17,7	6,0	9,0	12,0
9	1531	5,0	9,9	18,6	6,0	9,1	12,5
10	1531	5,4	10,1	19,4	6,0	9,4	13,0
11	1518	5,5	10,7	21,0	6,5	9,7	13,5
12	1505	5,9	11,6	21,3	6,6	10,3	14,5
13	1505	5,9	11,9	22,6	7,5	10,6	15,0
14	1505	6,0	12,1	24,2	7,5	10,9	15,5
15	1480	6,7	12,6	24,2	7,5	11,1	15,5
aroeira do sertão							
2	2449	5,0	5,6	6,7	2,0	4,6	6,0
3	2449	5,0	6,8	10,2	3,0	5,5	6,5
4	2449	5,0	7,7	11,9	3,5	6,5	8,5
5	2449	5,3	8,4	12,7	4,0	7,3	10,5
6	2449	5,3	8,9	14,0	4,0	8,0	10,9
7	2449	5,4	10,0	16,1	4,0	8,1	11,0
8	2449	5,4	10,2	17,2	4,5	8,4	11,5
9	2449	5,7	11,0	18,1	4,5	8,8	12,0
10	2436	5,9	11,6	20,1	6,0	9,2	13,0
11	2398	6,0	12,5	22,0	6,0	11,0	15,0
12	2398	6,7	12,9	23,1	6,0	11,2	15,1
13	2245	6,7	12,9	24,2	6,5	11,5	15,1
14	2245	8,6	16,2	24,5	10,0	12,9	15,5
breu vermelho							
4	2500	5,0	5,1	5,4	3,0	3,4	4,0
5	2500	5,0	5,4	6,2	3,5	4,3	5,0
6	2474	5,0	5,7	7,5	4,0	5,1	6,0
7	1696	5,0	6,4	8,4	5,0	5,9	7,0
8	1696	5,3	7,1	9,2	5,0	6,2	7,0
9	1696	5,3	7,3	10,0	5,5	6,6	7,5
10	1696	5,4	7,9	11,1	5,5	7,0	8,0
11	1696	5,6	8,5	12,4	6,5	7,3	8,5
12	1696	5,6	9,0	12,9	7,0	8,1	9,0
13	1696	5,6	9,1	13,4	7,0	8,4	9,5
14	1696	5,6	9,7	14,2	7,5	8,8	9,5

15	1696	7,0	10,6	14,2	7,5	9,2	10,0
----	------	-----	------	------	-----	-----	------

Em que: Min, Méd e Máx = mínimos, médios e máximos; N = número de árvores por hectare; H = altura total; DAP = diâmetro a 1,3 m do solo.

#### 4.2. Índices de competição

A competição entre as árvores por recursos foi estimada por meio de índices de competição independentes da distância (Tabela 2).

Tabela 2. Índices de competição independentes da distância analisados.

Autor	Índice independente da distância (IID)	Equação
Glover e Hool (1979)	$IID_1 = \frac{DAP_i^2}{\overline{DAP}^2}$	(1)
Glover e Hool (1979)	$IID_2 = \frac{H_i}{\overline{H}}$	(2)
STAGE (1973)	$IID_3 = BAI = \frac{DAP_i^2}{q^2}$	(7)
Glover e Hool (1979)	$IID_4 = \frac{DAP_i^2 \cdot H_i}{DAP^2 \cdot \overline{H}}$	(8)
Tomé e Burkart (1989)	$IID_5 = \frac{DAP_i}{DAP_{dom}}$	(9)
STAGE (1973)	$IID_6 = BAL_i$	(10)

em que:  $DAP_i$  = diâmetro da árvore-objeto (cm);  $\overline{DAP}$  = média dos diâmetros das árvores da unidade amostral (cm);  $H_i$  = altura total da árvore objeto (m);  $\overline{H}$  = altura média das árvores da unidade amostral (m);  $q$  = diâmetro quadrático (cm);  $DAP_{dom}$  = diâmetro médio das árvores dominantes (cm);  $BAL_i$  = somatório das áreas seccionais das árvores maiores que a árvore-objeto.

Foi realizada a análise de correlação linear simples de Pearson entre os índices de competição analisados e o crescimento em diâmetro, altura e área basal, conforme Martins (2011), Daniels et al. (1986) e Sánchez-González et al. (2006).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})^2 \right\} \left\{ \sum_{i=1}^n (Y_i - \overline{Y})^2 \right\}}}$$

(11)

Em que:  $X_i$  e  $Y_i$  são as variáveis analisadas;  $n$ = número de observações;  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  são os valores médios das variáveis analisadas.

Para analisar a significância desta correlação foi feito o teste  $t$  de Student, a 5% de significância (GUJARATI, 2006). A estatística  $t$  é dada por (12):

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (12)$$

$n$ = tamanho da amostra;  $r$  = coeficiente de correlação.

### 4.3. Ajuste dos modelos para projeção do diâmetro e da altura

Neste estudo foram avaliados sete modelos, que apresentam relação linear e não linear, para projeção do diâmetro e da altura total de árvores (Tabela 3).

O ajuste dos modelos não lineares foi realizado pelo algoritmo de Gauss-Newton por meio da função *nls* e os modelos lineares pela função *lm* do *software* R, versão 3.2.2015-04-16 (R Core Team, 2015). O índice de competição aplicado nos modelos foi aquele a ser escolhido pelo teste  $t$  para correlação (item 4.2).

Visando melhor organização na apresentação dos resultados, os modelos serão apresentados da seguinte forma: Modelo 1 (Pienaar e Schiver); Modelo 2 (Schumacher adaptado de Campo e Leite); Modelo 3 (Figueiredo, sendo a equação 14 para o diâmetro e a 15 para a altura); Modelo 4 (Adaptado de Bella, Sterba e Monserud); Modelo 5 (Mitscherlich); e Modelo 6 (Chapman – Richards).

Tabela 3. Modelos selecionados para avaliar a projeção do diâmetro e da altura total das árvores individuais das três espécies nativas analisadas.

Autor	Modelo	
Pienaar e Schiver (1981)	$Y_2 = Y_1 \exp \left[ -\beta_0 (I_2^{\beta_1} - I_1^{\beta_1}) \right] + \varepsilon$	(13)
Schumacher adaptado de Campos e Leite (2009)	$\ln Y_2 = \ln Y_1 + \beta_1 \cdot \left( \frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1} \right) + \beta_2 \cdot IID + \varepsilon$	(14)
Figueiredo (2015)	$H_2 = \exp \left[ \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP_1) + \beta_2 \cdot H_{dom} + \beta_3 \cdot IID \right] + \varepsilon$	(15)
Figueiredo (2015)	$DAP_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP_1 + \beta_2 \cdot H_1 + \beta_3 \cdot IID + \varepsilon$	(16)
Adaptado de Bella (1971), Sterba e Monserud (1997)	$Y_2 = Y_1 + \left[ \beta_0 + \beta_1 \cdot \left( \frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1} \right) + \beta_2 \cdot IID \right] + \varepsilon$	(17)
Mitscherlich	$Y_2 = Y_1 - \beta_0 \cdot (\beta_1^{I_2} - \beta_1^{I_1}) + \varepsilon$	(18)
Chapman - Richards	$Y_2 = Y_1 \cdot \left( \frac{1 - \exp^{-\beta_1 \cdot I_2}}{1 - \exp^{-\beta_1 \cdot I_1}} \right)^{\beta_0} + \varepsilon$	(19)

Em que:  $Y_2$  = diâmetro (cm) ou altura (m) em idade futura;  $Y_1$  = diâmetro (cm) ou altura (m) em idade corrente;  $I_2$  = Idade futura (meses);  $I_1$  = idade corrente (meses);  $H_1$  = altura total (m) da árvore na idade corrente;  $H_2$  = altura total (m) da árvore em idade futura;  $H_{dom}$  = altura dominante;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  = coeficientes do modelo; e  $\varepsilon$  = erro aleatório.

#### 4.4. Avaliação do ajuste e da validação dos modelos de projeção do diâmetro e altura

O ajuste e a validação dos modelos foram avaliados pelos seguintes indicadores:

- Coeficiente de correlação (equação 11);
- Raiz do quadrado médio do erro (RQME), (ZHAO et al., 2013):

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (20)$$

$$RQME(\%) = \frac{RQME}{\sum_{i=1}^n Y_i / n} \cdot 100 \quad (21)$$

em que:  $Y_i$  = valor observado da  $i$ -ésima variável dependente;  $\hat{Y}_i$  = valor estimado da  $i$ -ésima variável dependente;  $n$  = tamanho da amostra.

- Viés (V) (UZOH; OLIVER, 2008):

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad (22)$$

$$V(\%) = \frac{V}{\sum_{i=1}^n Y_i / n} \cdot 100 \quad (23)$$

- Média das diferenças absolutas (MD) (VIEIRA, 2015);

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (24)$$

$$MD(\%) = \frac{MD}{\sum_{i=1}^n Y_i / n} \cdot 100 \quad (25)$$

- Análise gráfica dos resíduos (MARTINS, 2011):

Por meio da distribuição não uniforme dos dados ao longo da reta que corresponde ao resíduo zero, pode-se constatar a tendência de superestimar ou subestimar a variável de interesse. Os valores dos resíduos foram obtidos por meio da aplicação da equação 26:

$$e = \left( \frac{Y_i - \hat{Y}}{Y_i} \right) \cdot 100 \quad (26)$$

De acordo com o valor obtido nas estatísticas RQME(%), V(%) e MD(%), foi feito um *ranking* conforme aplicado por Silva et al. (2012). Neste método de avaliação, são atribuídas notas aos valores obtidos de cada uma das estatísticas. Assim, foi atribuída nota 1 (um) para o modelo com menor valor absoluto da estatística, até a nota 6 (seis) para o de maior valor. Desta forma, foi selecionado o modelo com menor valor do somatório dessas estatísticas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Índices de competição

Observou-se, em geral, uma correlação significativa, pelo teste  $t$  à 5% de probabilidade, entre os índices de competição e as variáveis de crescimento (Tabelas 4, 5 e 6). O IID<sub>2</sub> apresentou correlação significativa apenas com o crescimento em altura ( $\Delta H$ ) para as três espécies em estudo, e o IID<sub>6</sub> não apresentou correlação significativa com as variáveis de crescimento para a aroeira do sertão.

A correlação entre os índices de competição e o crescimento em  $DAP$  variou de  $|0,0278|$  e  $|0,0866|$  para o angico preto, de  $|0,0256|$  e  $|0,1095|$  para a aroeira do sertão e de  $|0,0002|$  e  $|0,1295|$  para o breu vermelho. O índice que apresentou maior correlação para as três espécies quanto ao crescimento em  $DAP$  foi o IID<sub>1</sub>. Castro et al. (2014) encontraram valores de correlação linear variando de  $|0,17|$  a  $|0,28|$  para um fragmento de floresta no município de Viçosa, Minas Gerais. Vieira (2015) obteve valores de correlação variando de  $|0,29|$  a  $|0,66|$  para clones de eucalipto.

Analisando a correlação entre os índices de competição e o crescimento em  $H$ , observou-se variação de  $|0,0024|$  e  $|0,1608|$  para o angico preto, de  $|0,0190|$  e  $|0,0730|$  para a aroeira do sertão e de  $|0,0115|$  e  $|0,2161|$  para o breu vermelho. Quanto a essa correlação, o índice que teve destaque foi o IID<sub>5</sub>, para as espécies angico preto e aroeira do sertão e o IID<sub>2</sub> para o breu vermelho. As correlações entre os índices IID<sub>2</sub> e IID<sub>5</sub> e o crescimento em altura foram superiores às correlações destes com o crescimento em  $DAP$ . Já Martins et al. (2011) encontraram valores inferiores na correlação do IID<sub>2</sub> e o crescimento em  $DAP$  em comparação ao crescimento em altura para híbridos de eucalipto em classes de produtividade baixa.

Já para a correlação entre os índices de competição e o crescimento em área basal ( $G$ ), observou-se variação de  $|0,0321|$  e  $|0,1626|$  para o angico preto, sendo o IID<sub>6</sub> o índice que apresentou maior correlação. Para a aroeira do sertão, a correlação variou entre  $|0,0297|$  e  $|0,2218|$  para a aroeira do sertão, com maior valor para o IID<sub>5</sub>. Para o breu vermelho os valores de correlação variaram entre  $|0,0187|$  e  $|0,1929|$ , sendo que o IID<sub>3</sub> apresentou maior correlação. Vieira (2015) encontrou resultado semelhante a este para o angico preto quando avaliou a correlação dos índices com

o crescimento em *G*. Já Martins et al. (2011), encontrou maior correlação para o IID<sub>3</sub>, semelhante ao apresentado neste estudo para a espécie breu vermelho.

Para os índices IID<sub>1</sub>, IID<sub>2</sub>, IID<sub>3</sub> e IID<sub>4</sub>, quanto maior for o valor desses índices, menor é a competição entre as árvores (CHASSOT et al., 2011). Para todas as espécies foram observadas correlações positivas para esses índices, quando estas se mostraram com valores significativos estatisticamente. Portanto, quanto maior o valor desses índices, maior será o crescimento em *H*, *DAP* e *G*.

O IID<sub>6</sub> (índice de BAL) busca quantificar a competição entre as árvores, considerando aquelas com área transversal maior que a árvore principal, competidoras da mesma. Portanto, quanto maior o índice, maior a competição exercida sobre a árvore considerada. Este índice se mostrou pouco eficiente para avaliar a competição para a aroeira do sertão (Tabela 5), apresentando baixo valor de correlação, sendo significativo apenas em relação a idade. Cunha (2009) não encontrou correlação significativa entre este índice e o incremento em área basal para cedro (*Cedrela odorata*).

A idade apresentou correlação negativa e significativa com as variáveis de crescimento. Isso porque quanto maior a idade da árvore, a taxa de crescimento tende a diminuir. Resultados semelhantes foram encontrados por Martins et al. (2011) e Vieira (2015).

Para o angico preto, os índices 1, 3 e 5 podem ser utilizados para expressar a competição existente entre as árvores, no entanto o IID<sub>5</sub> de Tomé e Burkart (1989) apresentou maiores correlações com o crescimento em altura e área basal e correlação significativa com a idade, sendo este o melhor índice. Para a aroeira do sertão pode-se utilizar os índices 1, 3, 4 e 5, porém novamente o IID<sub>5</sub> apresentou maiores correlações com o crescimento em altura e área basal e correlação significativa com a idade, sendo o melhor também para esta espécie. Já para o breu vermelho o melhor índice foi o IID<sub>4</sub> de Glover e Hool (1979), no qual se observou correlação significativa com todas as variáveis.

Tabela 4. Matriz de correlação entre os índices de competição - IID<sub>i</sub> e o crescimento em diâmetro à 1,30 m da superfície do solo ( $\Delta DAP$ ), crescimento em altura total ( $\Delta H$ ) e crescimento em área basal ( $\Delta G$ ) para o angico preto.

angico preto										
	I	IID <sub>1</sub>	IID <sub>2</sub>	IID <sub>3</sub>	IID <sub>4</sub>	IID <sub>5</sub>	IID <sub>6</sub>	$\Delta DAP$	$\Delta H$	$\Delta G$
I	1	-0,0122 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>ns</sup>	-0,0148 <sup>ns</sup>	0,3246*	-0,1684*	-0,4388*	-0,4728*	-0,2074*
IID <sub>1</sub>		1	-	-	-	-	-	0,0866*	0,0729*	0,1125*
IID <sub>2</sub>			1	-	-	-	-	0,0278 <sup>ns</sup>	0,0857*	0,0321 <sup>ns</sup>
IID <sub>3</sub>				1	-	-	-	0,0819*	0,0661*	0,1143*
IID <sub>4</sub>					1	-	-	0,0753*	0,0024 <sup>ns</sup>	0,0930*
IID <sub>5</sub>						1	-	-0,0708*	-0,1608*	0,1363*
IID <sub>6</sub>							1	-0,0640*	0,0229 <sup>ns</sup>	-0,1626*
$\Delta DAP$								1	-	-
$\Delta H$									1	-
$\Delta G$										1

aroeira do sertão										
	I	IID <sub>1</sub>	IID <sub>2</sub>	IID <sub>3</sub>	IID <sub>4</sub>	IID <sub>5</sub>	IID <sub>6</sub>	$\Delta DAP$	$\Delta H$	$\Delta G$
I	1	-0,0129 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>ns</sup>	-0,0133 <sup>ns</sup>	0,3241*	-0,0450*	-0,3504*	-0,2249*	-0,1097*
IID <sub>1</sub>		1	-	-	-	-	-	0,1095*	0,0285 <sup>ns</sup>	0,1193*
IID <sub>2</sub>			1	-	-	-	-	0,0168 <sup>ns</sup>	0,0636*	0,0297
IID <sub>3</sub>				1	-	-	-	0,1082*	0,0259 <sup>ns</sup>	0,1250*
IID <sub>4</sub>					1	-	-	0,0847*	-0,0219 <sup>ns</sup>	0,0944*
IID <sub>5</sub>						1	-	0,0135 <sup>ns</sup>	-0,0730*	0,2218*
IID <sub>6</sub>							1	-0,0256 <sup>ns</sup>	0,0190 <sup>ns</sup>	-0,0299 <sup>ns</sup>
$\Delta DAP$								1	-	-
$\Delta H$									1	-
$\Delta G$										1

breu vermelho										
	I	IID <sub>1</sub>	IID <sub>2</sub>	IID <sub>3</sub>	IID <sub>4</sub>	IID <sub>5</sub>	IID <sub>6</sub>	$\Delta DAP$	$\Delta H$	$\Delta G$
I	1	-0,0075 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>ns</sup>	-0,0079 <sup>ns</sup>	0,3839*	0,1435*	-0,2905*	-0,3342*	-0,1526*
IID <sub>1</sub>		1	-	-	-	-	-	0,1295*	-0,0115 <sup>ns</sup>	0,1909*
IID <sub>2</sub>			1	-	-	-	-	-0,0002 <sup>ns</sup>	0,2161*	0,0187 <sup>ns</sup>
IID <sub>3</sub>				1	-	-	-	0,1278*	-0,0124 <sup>ns</sup>	0,1929*
IID <sub>4</sub>					1	-	-	0,1074*	0,0971*	0,1670*
IID <sub>5</sub>						1	-	0,0105 <sup>ns</sup>	-0,1811*	0,1773*
IID <sub>6</sub>							1	-0,0705*	-0,0400 <sup>ns</sup>	-0,0807*
$\Delta DAP$								1	-	-
$\Delta H$									1	-
$\Delta G$										1

Em que: \* = significativo a 5% de significância e <sup>ns</sup> = não significativo a 5% de significância.

## 5.2. Avaliação do ajuste dos modelos de projeção do diâmetro das árvores

Na Tabela 7 são apresentadas as estimativas dos parâmetros para projeção do diâmetro das três espécies analisadas. Verifica-se que quase todos os parâmetros foram significativos ( $p > 0,05$ ), com exceção apenas do parâmetro relativo ao índice de competição para o modelo 3 para a aroeira do sertão.

Tabela 7. Estimativas dos parâmetros dos modelos avaliados para a projeção do diâmetro para as três espécies analisadas.

Modelo	Coeficientes			
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$
angico preto				
1	3,543220*	-1,135610*		
2		-3,307464*	-0,006265*	
3	1,919186*	1,100917*	-0,190777*	-0,748191*
5	-1,355800*	-22,965500*	1,584300*	
6	15,685800*	0,736750*		
7	1,387780*	-0,260490*		
aroeira do sertão				
1	3,165520*	-0,251320*		
2		-1,728979*	0,021162*	
3	1,315986*	1,105659*	-0,156604*	-0,412346 <sup>ns</sup>
5	-1,725900*	-11,055200*	2,2856*	
6	13,803119*	0,881142*		
7	0,590506*	-0,040120*		
breu vermelho				
1	4,887600*	-0,197100*		
2		-2,929121*	0,031569*	
3	0,518923*	1,046196*	-0,118708*	0,495456*
5	-0,400100*	-14,091200*	0,812300*	
6	14,252810*	0,930185*		
7	0,791560*	-0,047760*		

Em que: ns, \* = não significativo e significativo a 5% de significância pelo teste  $t$ , respectivamente.

De acordo com a Tabela 8, todas as equações avaliadas para projetar o diâmetro, para cada espécie, apresentaram valores próximos quando consideradas as estatísticas  $r_{yy}$ , RQME%, V% e MD%. O modelo 1 (Pienaar e Schiver, 1981) foi o mais exato para a espécie angico preto ( $r = 0,9914$ ; RQME% = 2,21; V% = 0,09 e MD% = 3,31). Martins (2011) obteve melhores ajustes na projeção do diâmetro de dois híbridos de eucalipto com os modelos de Pienaar e Schiver (1981) e

Schumacher adaptado de Campo e Leite (2009). Fraga Filho (2016) obteve melhores ajustes na projeção dos diâmetros com o modelo de Adaptado de Bella (1971), Sterba e Monserud (1997). Para a aroeira do sertão, o modelo 2 foi o mais exato ( $r=0,9936$ ;  $RQME\%=2,10$ ;  $V\% = 0,48$  e  $MD\%=3,15$ ). Mas, apesar deste modelo ter maior exatidão, os modelos 1, 4 e 6 ficaram com resultados próximos, mostrando bom ajuste. Para a espécie breu vermelho o modelo 6 apresentou maior exatidão, porém, pode-se observar que todos os modelos apresentaram bons ajustes, não mostrando diferença considerável entre si, sendo que as estatísticas calculadas apresentaram valores semelhantes (Tabela 8).

Tabela 8. Estatísticas utilizadas para avaliar o ajuste dos modelos para projeção do diâmetro das três espécies analisadas.

Modelo	$r_{yy}$	RQME (%)	V (%)	MD (%)	Total
angico preto					
<b>1</b>	<b>0,9914 (1)</b>	<b>2,21 (1)</b>	<b>0,09 (3)</b>	<b>3,31 (1)</b>	<b>6</b>
2	0,9912 (2)	2,28 (2)	0,38 (5)	3,33 (2)	11
3	0,9860 (6)	3,34 (6)	$2,79 \times 10^{-05}$ (1)	4,25 (6)	19
4	0,9910 (3)	2,37 (3)	$-1,37 \times 10^{-04}$ (2)	3,49 (4)	12
5	0,9908 (4)	2,73 (5)	0,63 (6)	3,68 (5)	20
6	0,9905 (5)	2,42 (4)	0,19 (4)	3,48 (3)	16
aroeira do sertão					
1	0,9932 (2)	2,18 (2)	-0,25 (4)	3,39 (2)	10
<b>2</b>	<b>0,9936 (1)</b>	<b>2,10 (1)</b>	<b>0,48 (6)</b>	<b>3,15 (1)</b>	<b>9</b>
3	0,9901 (6)	2,86 (5)	$-4,54 \times 10^{-05}$ (1)	3,83 (5)	17
4	0,9929 (3)	2,45 (4)	$1,27 \times 10^{-04}$ (2)	3,59 (4)	13
5	0,9919 (5)	3,02 (6)	0,12 (3)	4,07 (6)	20
6	0,9928 (4)	2,24 (3)	-0,37 (5)	3,48 (3)	15
breu vermelho					
1	0,9848 (2)	1,47 (2)	-0,04 (5)	3,37 (2)	11
2	0,9845 (4)	1,51 (4)	0,05 (6)	3,41 (3)	17
3	0,9844 (5)	1,51 (3)	$-5,85 \times 10^{-05}$ (2)	3,42 (4)	14
4	0,9841 (6)	1,55 (6)	$1,13 \times 10^{-05}$ (1)	3,46 (6)	19
5	0,9845 (3)	1,54 (5)	$-4,54 \times 10^{-03}$ (3)	3,45 (5)	16
<b>6</b>	<b>0,9848 (1)</b>	<b>1,46 (1)</b>	<b>-0,02 (4)</b>	<b>3,36 (1)</b>	<b>7</b>

Analisando o V%, nota-se que em geral os valores foram pequenos ( $V\% < 1$ ), como também encontrado por Martins (2011), Castro et al. (2013) e Vieira (2015), utilizando modelos de regressão e redes neurais artificiais. O maior valor de RQME% foi observada no modelo 3 para a espécie angico preto e o modelo 6 para a espécie breu vermelho apresentou o melhor resultado quanto a esta estatística. Fraga Filho (2016) encontrou valores de RQME variando de 3,61 a 6,81.

Nas Figuras 1, 2 e 3 são apresentadas as análises gráficas dos resíduos dos modelos para projeção do diâmetro das árvores das espécies em estudo. Observa-se que a dispersão dos resíduos foi semelhante para os modelos para projeção do diâmetro, nas três espécies, ficando entre  $\pm 20\%$ . O modelo 3, para o angico preto (Figura 1) e aroeira do sertão (Figura 3), apresentou maior erro nas idades iniciais, assim como os demais modelos, porém para árvores maiores não apresentou ser tendencioso em suas estimativas como ocorreu para os demais modelos. No entanto, em idades menores estão concentradas a maior parte dos indivíduos, o que faz com que o modelo apresente maior erro. Os modelos 1, 2, 4, 5 e 6 apresentaram uma leve tendência em subestimar os diâmetros das árvores de angico preto acima de 20 cm para angico preto e 22 cm para aroeira do sertão. Os resíduos percentuais para projeção dos diâmetros para breu vermelho (Figura 3) foi muito semelhante em todos os modelos estudados, não havendo diferença considerável entre os mesmos.

Figura 1. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção do diâmetro em função dos diâmetros estimados, para o angico preto.

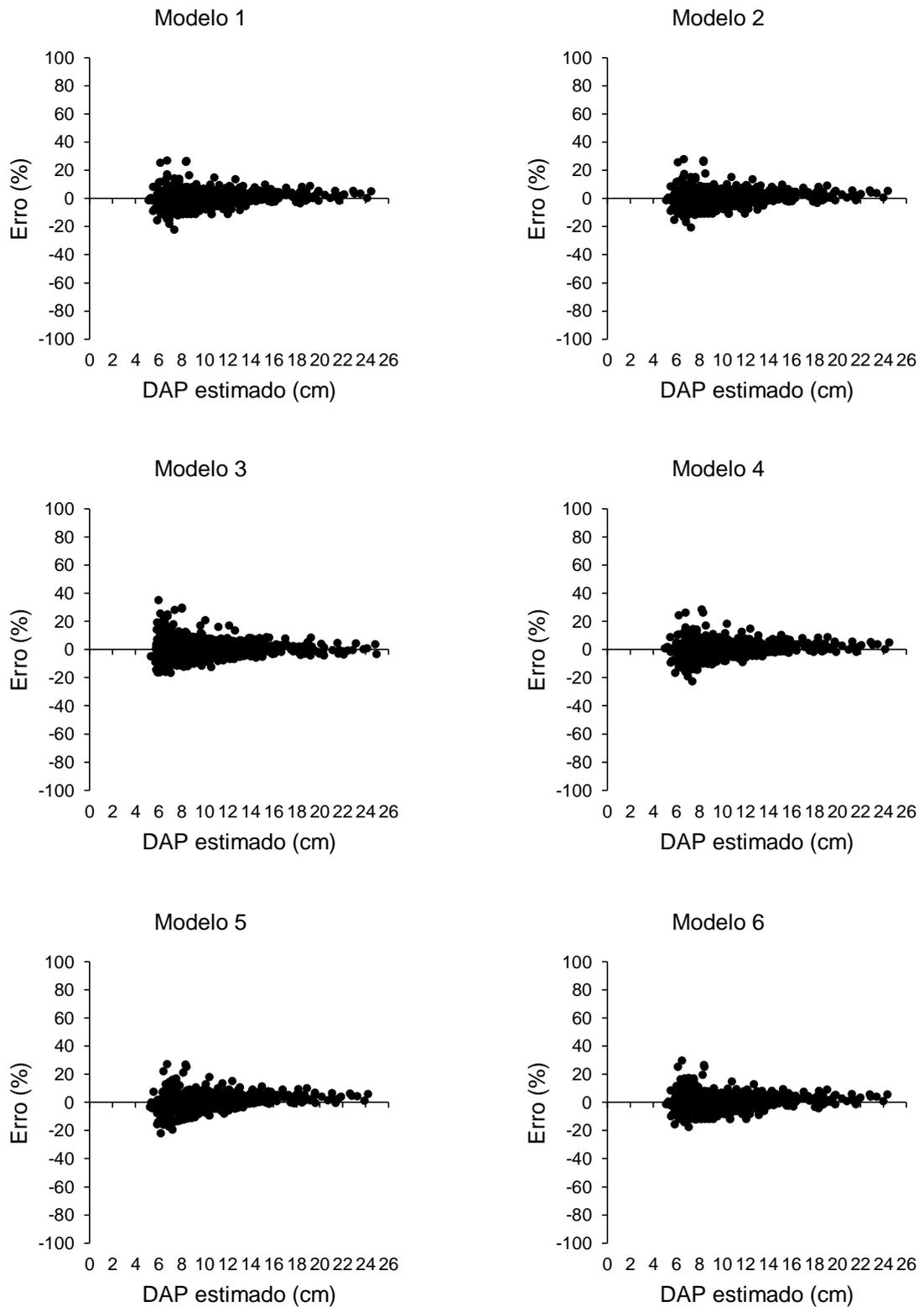


Figura 2. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção do diâmetro em função dos diâmetros estimados, para a aroeira do sertão.

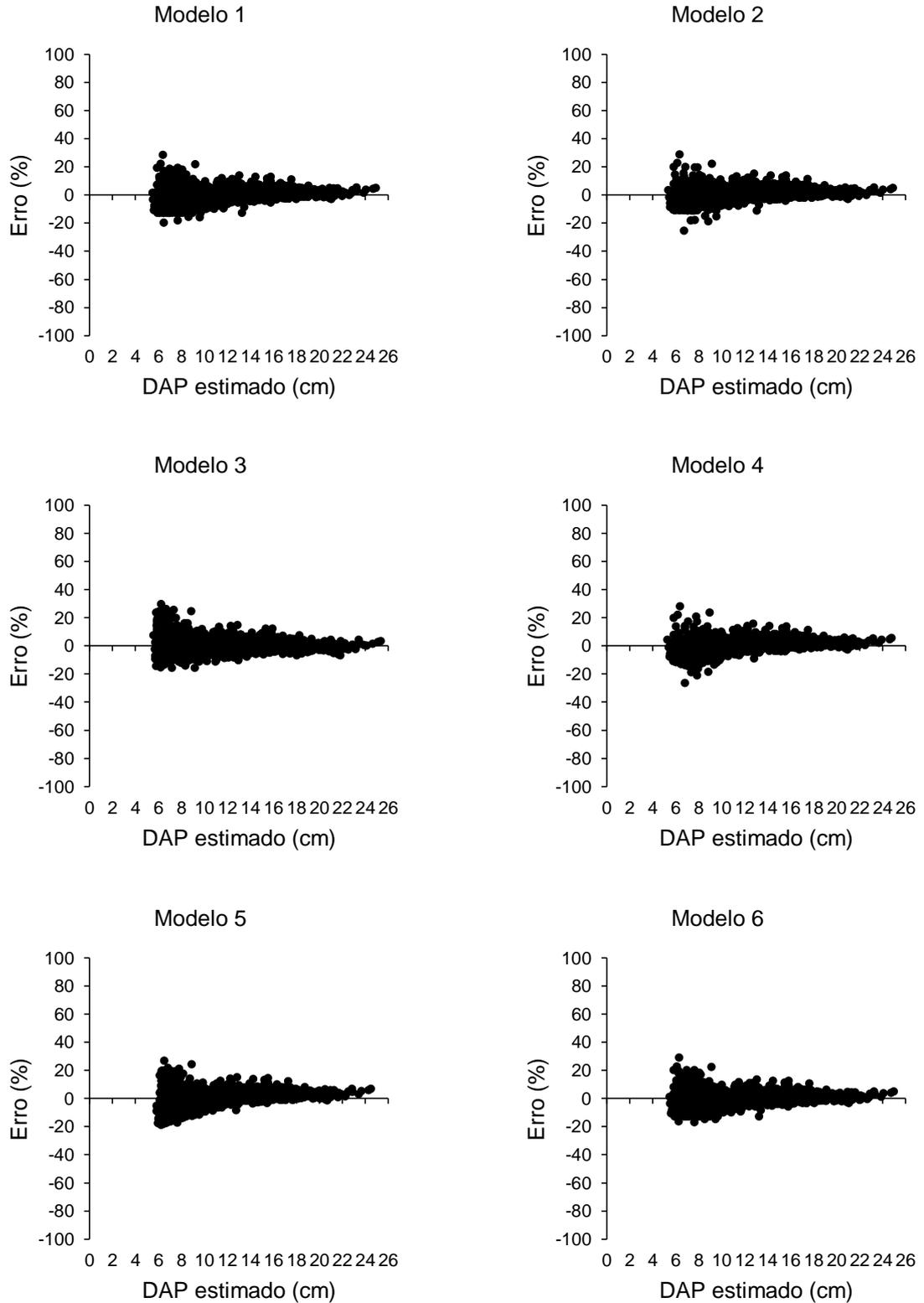
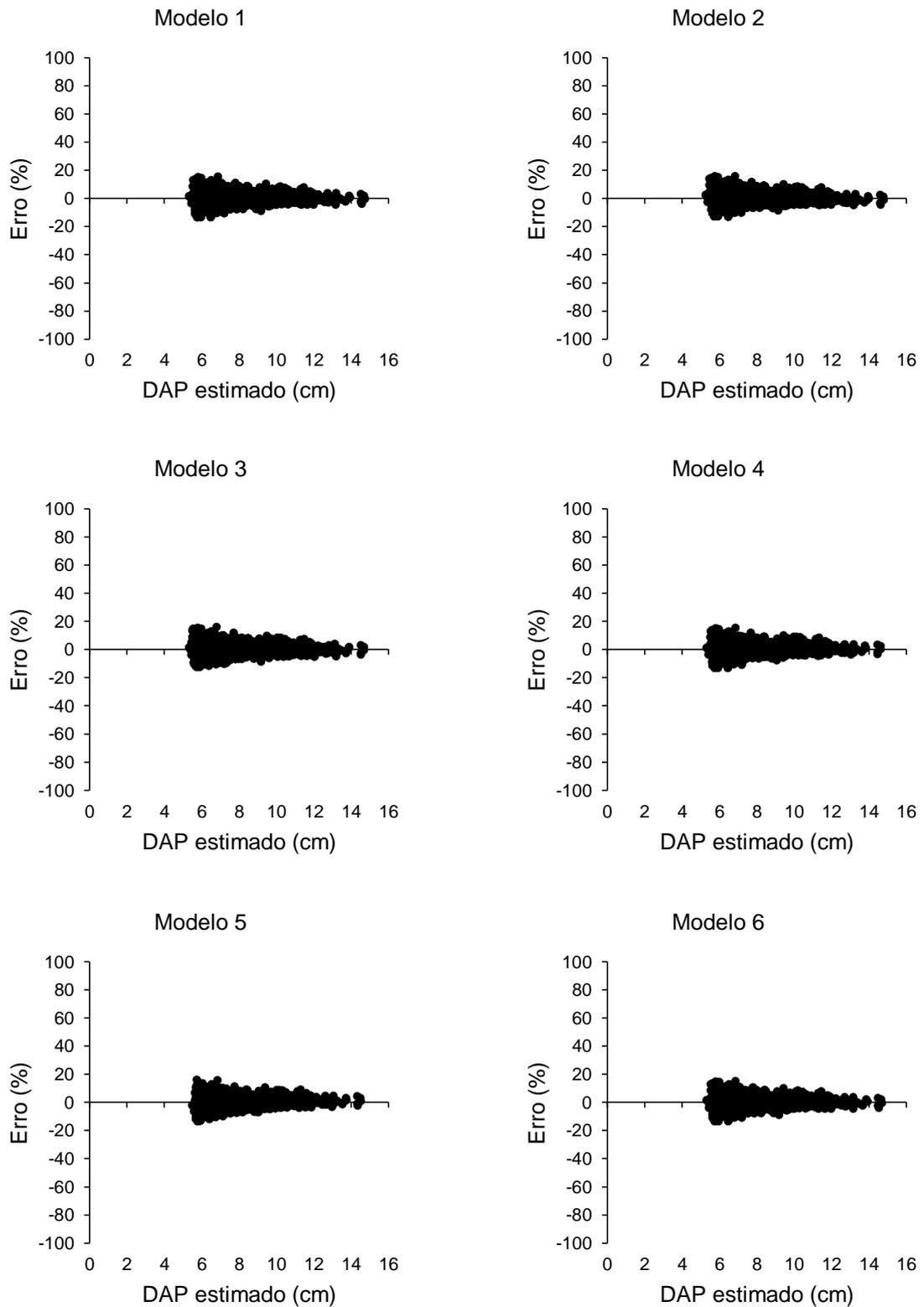


Figura 3 Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção do diâmetro em função dos diâmetros estimados, para o breu vermelho.



De acordo com as estatísticas de exatidão e a análise gráfica dos resíduos, o modelo de Pienaar e Schiver (1981) foi que melhor projetou os diâmetros do angico preto, o modelo de Schumacher adaptado de Campo e Leite (2009) foi o mais acurado na projeção dos diâmetros da aroeira do sertão. E, para o breu vermelho, todos os modelos analisados apresentaram bons ajustes, com resultados semelhantes, podendo qualquer um destes ser utilizado para projeção dos diâmetros.

### 5.3. Avaliação do ajuste dos modelos de projeção da altura de árvores

Na Tabela 9 são apresentadas as estimativas dos parâmetros dos modelos projeção da altura das três espécies em estudo.

Tabela 9. Estimativas dos parâmetros dos modelos avaliados para a projeção da altura para as três espécies analisadas.

Modelo	Coeficientes			
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$
angico preto				
1	5,317340*	-1,546690*		
2		-4,056517*	-0,015009*	
3	2,609523*	-4,651007*	0,025428*	-0,165731*
4	-0,965500*	-23,823500*	1,100400*	
5	17,220820*	0,701550*		
6	2,611970*	-0,434570*		
aroeira do sertão				
1	4,141720*	-0,158820*		
2		-1,517661*	0,035802*	
3	2,072852*	-3,668169*	0,047343*	0,004700 <sup>ns</sup>
4	-0,104000 <sup>ns</sup>	-6,598500*	0,567200*	
5	13,328430*	0,911100*		
6	0,554540*	-0,031510*		
breu vermelho				
1	3,895630*	-0,573130*		
2		-4,618000*	0,014130*	
3	1,289300*	-0,984045*	0,100724*	0,048926 <sup>ns</sup>
4	0,290030*	-15,797070*	-0,037320 <sup>ns</sup>	
5	-4,266800 <sup>ns</sup>	-0,368300 <sup>ns</sup>		
6	1,041540*	-0,096810*		

Em que: ns, \* = não significativo e significativo a 5% de significância pelo teste *t*, respectivamente.

Para o angico preto, todos os coeficientes foram significativos ( $p < 0,05$ ). Avaliando os modelos para projeção de altura de árvores de aroeira do sertão, verifica-se que o índice de competição não influenciou na estimativa do modelo 3. Isso também é verificado nos modelos 3 e 4 para projeção da altura de árvores de breu vermelho. Esses modelos apresentaram coeficientes relacionados aos índices de competição não significativos ( $p > 0,05$ ). O modelo 5 não se ajustou aos dados da espécie breu vermelho, apresentando coeficientes não significativos ( $p > 0,05$ ).

Observa-se pela Tabela 10, que contém as estatísticas utilizadas para avaliar o ajuste dos modelos para projeção da altura, que os modelos apresentaram, em geral, valores próximos em relação às estatísticas avaliadas ( $r_{yy}$ , RQME%, V% e MD%). O modelo 3, que para o angico preto e a aroeira do sertão, apresentou valores de RQME% e MD% superior aos demais, indicando maiores erros e portanto menos acurado, embora com viés semelhante. Para o breu vermelho, os modelos 3 e 5 foram menos exatos que os demais, apresentando maiores valores de RQME%, V% e MD%. Para o modelo 5, isso pode ser explicado pelo fato de este modelo não ter se ajustado aos dados e como já apresentado anteriormente, os coeficientes da equação não foram significativos. Martins (2011) encontrou valores aproximados nas estatísticas para os modelos analisados, tendo como melhores modelos na projeção das alturas das árvores o modelo de Schumacher adaptado de Campo e Leite (2009) e o modelo de Lundqvist-Korf; Amaro et al.(1998).

O modelo adaptado de Bella (1971), Sterba e Monserud (1997) teve maior exatidão na projeção das alturas das árvores das espécies analisadas. Fraga Filho (2016) encontrou melhores ajustes para este modelo na projeção das alturas de clones de eucalipto, obtendo coeficiente de correlação de 0,9538, RQME% de 5,23 e V% de  $1,30 \times 10^{-6}$ . Nota-se ainda que, para as espécies analisadas, os modelos obtiveram valores de viés muito baixos ( $V < 1\%$ ), com exceção do modelo 5 para o breu vermelho. Binoti (2010) obteve bons resultados na projeção de altura total das árvores utilizando redes neurais artificiais, obtendo  $r_{yy}$  de 0,9957 e RQME% de 1,71.

Tabela 10. Estatísticas utilizadas para avaliar o ajuste dos modelos para projeção da altura das três espécies analisadas.

Modelo	$r_{yy}$	RQME (%)	V (%)	MD (%)	Total
angico preto					
1	0,9656 (3)	3,08 (3)	0,46 (4)	4,21 (1)	11
2	0,9637 (5)	3,23 (4)	0,12 (3)	4,37 (5)	17
3	0,8623 (6)	11,62 (6)	0,03 (2)	9,09 (6)	20
<b>4</b>	<b>0,9685 (1)</b>	<b>2,81 (1)</b>	<b>-1,45 x10<sup>-04</sup> (1)</b>	<b>4,11 (3)</b>	<b>6</b>
5	0,9669 (2)	3,04 (2)	0,65 (5)	4,27 (2)	11
6	0,9644 (4)	3,24 (5)	0,91 (6)	4,32 (4)	19
aroeira do sertão					
1	0,95942 (4)	5,15 (4)	0,28 (6)	4,86 (2)	16
2	0,95994 (2)	5,14 (3)	0,02 (2)	4,87 (3)	10
3	0,85466 (6)	17,28 (6)	0,06 (4)	10,30 (6)	22
<b>4</b>	<b>0,96126 (1)</b>	<b>4,88 (1)</b>	<b>2,66 x10<sup>-04</sup> (1)</b>	<b>4,65 (1)</b>	<b>4</b>
5	0,95989 (3)	5,04 (2)	0,04 (3)	4,90 (5)	13
6	0,95941 (5)	5,16 (5)	0,22 (5)	4,89 (4)	19
breu vermelho					
1	0,96767 (3)	1,62 (3)	0,14 (5)	3,48 (4)	15
2	0,96766 (4)	1,61 (2)	0,03 (3)	3,48 (3)	12
3	0,9272 (6)	3,51 (5)	3,76 x10 <sup>-03</sup> (2)	5,49 (5)	18
<b>4</b>	<b>0,9698 (2)</b>	<b>1,50 (1)</b>	<b>-2,87 x10<sup>-05</sup> (1)</b>	<b>3,35 (1)</b>	<b>5</b>
5	0,9703 (1)	4,30 (6)	5,83 (6)	5,84 (6)	19
6	0,9675 (5)	1,63 (4)	0,13 (4)	3,47 (2)	15

Nas Figuras 4, 5 e 6 são apresentadas as análises gráficas dos resíduos dos modelos para projeção da altura de árvores das espécies em estudo. Como observado para a projeção do diâmetro, considerando o angico preto, houve tendência de subestimação das alturas das maiores árvores nos modelos 1, 2, 5 e 6 (Figura 4), com variação dos resíduos entre  $\pm 20\%$ . Como apresentado na Tabela 1, esta espécie atingiu 16 metros nas maiores idades, sendo que os modelos citados acima projetaram valores próximos e para o modelo 3 as alturas projetadas não atingiram 14 metros. Como comprovado estatisticamente, com valor de MD% de 9,09 e RQME% de 11,62, o modelo 3 apresentou a maior amplitude do erro, o que também pode ser observado no gráfico de dispersão dos resíduos na Figura 4.

Ainda analisando os gráficos dos resíduos para esta espécie, o modelo 4 apresentou a melhor distribuição residual. Martins (2011) e Soares e Tomé (2002) encontraram tendências em superestimar as árvores de menor e maior altura e

Martins afirmou que apenas o modelo de Lundqvist-Korf; Amaro et al.(1998) conseguiu estimar as alturas não ultrapassando um resíduo percentual de  $\pm 20\%$ .

Observou-se nos resíduos percentuais para a aroeira do sertão (Figura 5), similaridade na dispersão residual das estimativas dos modelos, com exceção do modelo 3, o qual se mostrou menos acurado na projeção das alturas. Em árvores maiores, pode-se notar uma leve superestimação dos modelos nas projeções das alturas.

Os modelos 1, 2, 4 e 6 foram semelhantes quanto à dispersão dos resíduos, para a espécie breu vermelho, podendo qualquer um desses ser usado para projetar a altura total das árvores (Figura 6). Pode-se notar na análise gráfica que o modelo 5 tende a subestimar as alturas das árvores. Este modelo não se ajustou aos dados. Assim como o modelo 5, o modelo 3 de Figueiredo (2015) apresentou desvantagem na sua distribuição dos resíduos. Binoti (2010) obteve boa dispersão dos resíduos na rede neural artificial selecionada como a melhor para projeção das alturas totais das árvores. Vieira (2015) observou maior dispersão dos dados para as árvores com alturas menores que 20 m. Castro et al. (2013) obteve estimativas de *DAP* e *H*, utilizando redes neurais artificiais, com boa distribuição dos resíduos.

Com base nas estatísticas analisadas e na análise gráfica dos resíduos, pode-se afirmar que o modelo 4, Adaptado de Bella (1971), Sterba e Monserud (1997), apresentou como a melhor opção para explicar o comportamento da variável altura, para as três espécies em estudo.

Figura 4. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção da altura em função dos diâmetros estimados, para o angico preto.

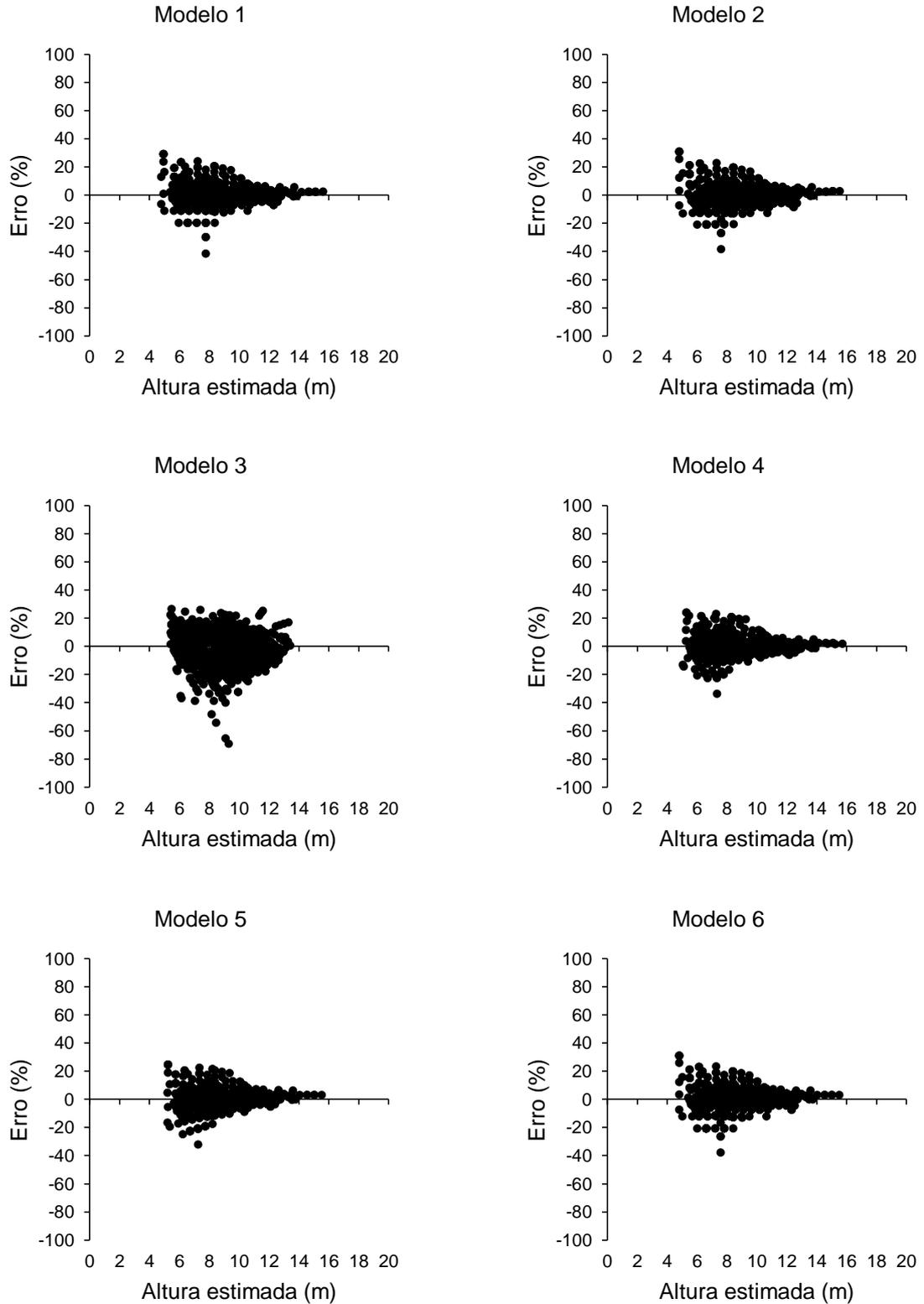


Figura 5. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção da altura em função dos diâmetros estimados, para a aroeira do sertão.

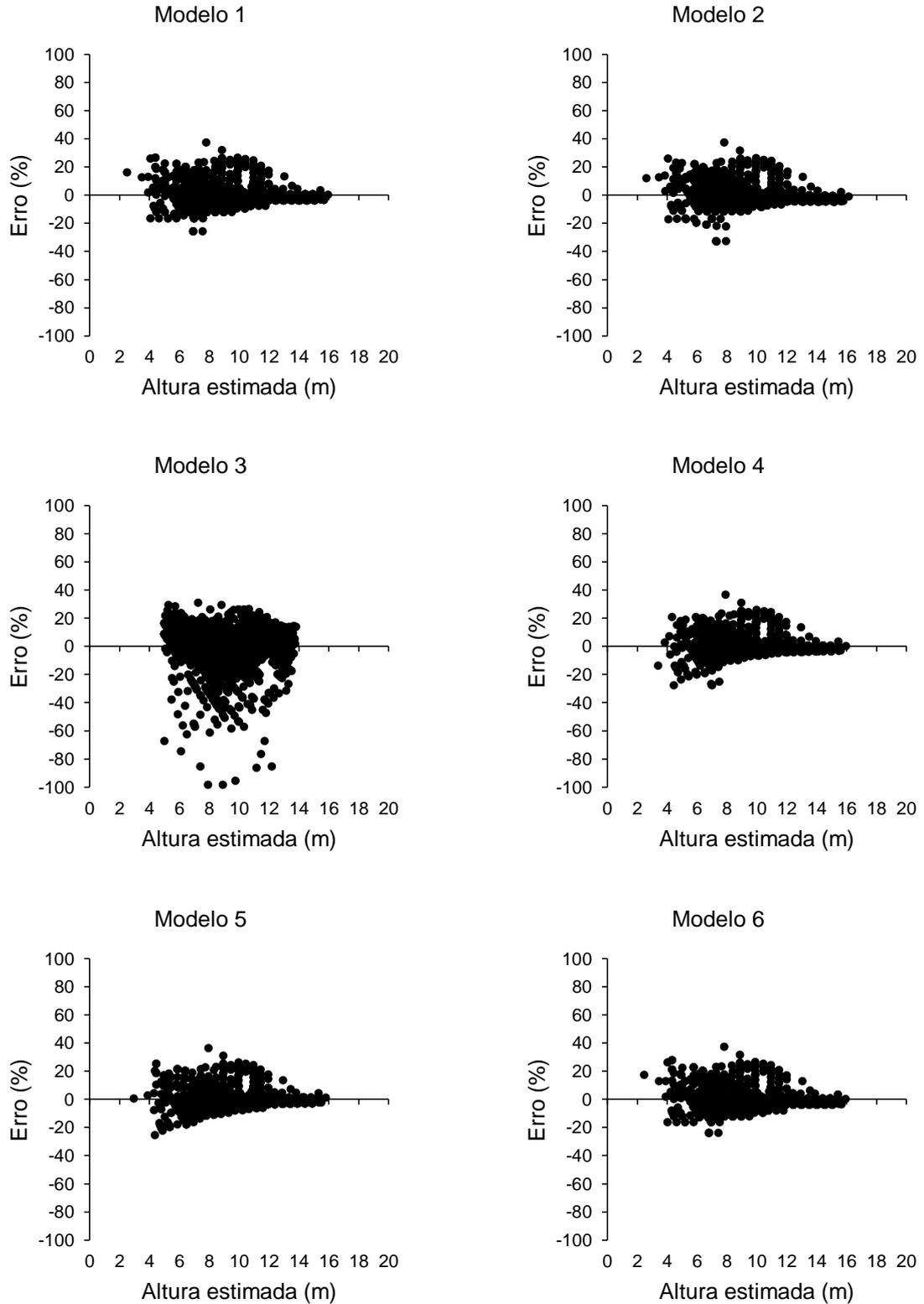
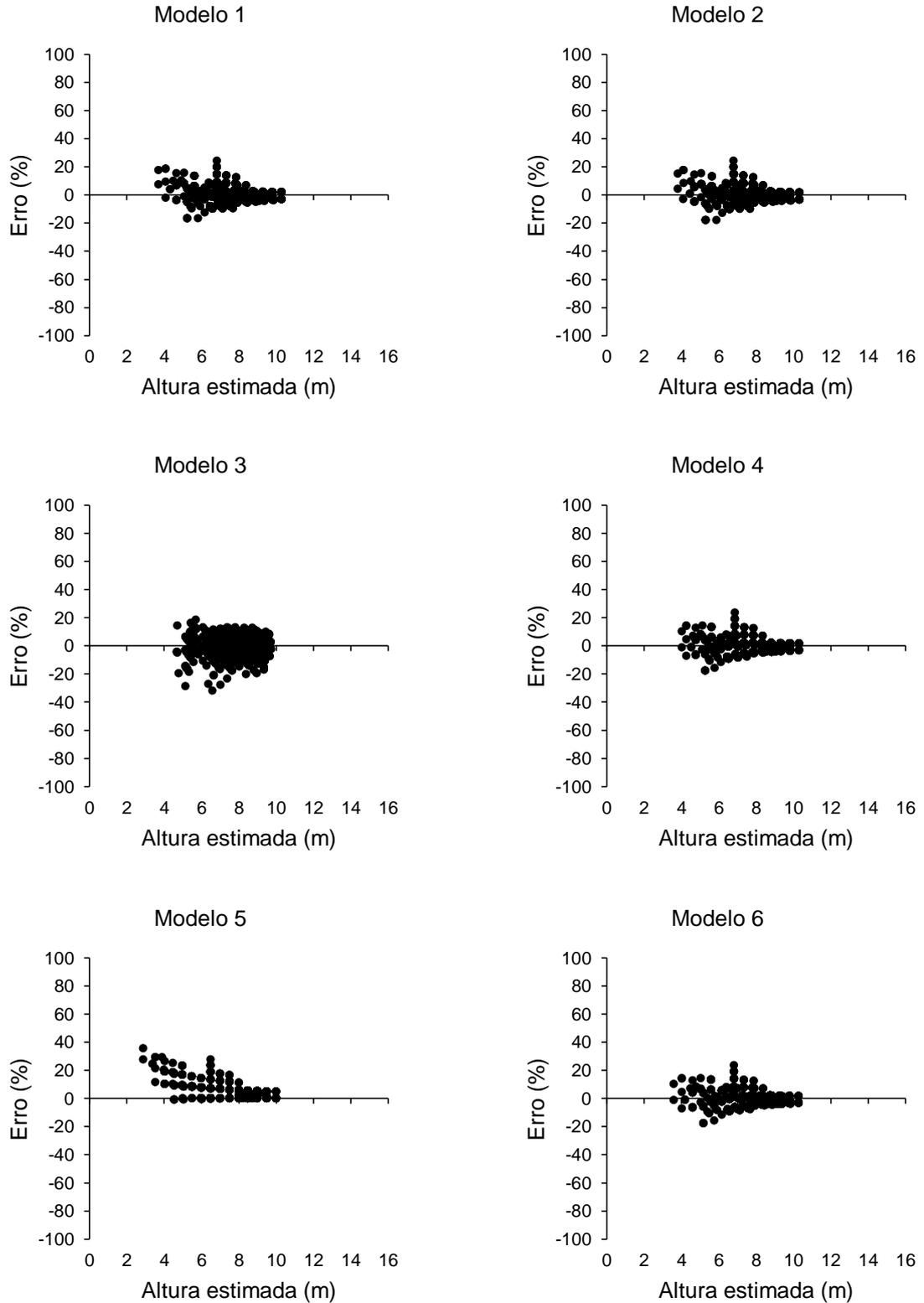


Figura 6. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção da altura em função dos diâmetros estimados, para o breu vermelho.



#### 5.4. Validação dos modelos para projeção do diâmetro e da altura total

Na Tabela 11, onde constam as estatísticas utilizadas para avaliar a validação dos modelos para projeção do diâmetro das árvores, percebe-se que, assim como no ajuste (Tabela 8), os modelos 1, 2 e 6 foram os mais exatos para projeção dos diâmetros das árvores das espécies angico preto, aroeira do sertão e breu vermelho, respectivamente.

Nota-se que, para as espécies avaliadas, os modelos para projeção do diâmetro foram exatos apresentando correlação alta ( $r > 0,98$ ), pouco viesados ( $V < 1\%$ ) e baixos valores de erro (RQME  $< 5\%$  e MD  $< 4,5\%$ ).

Tabela 11. Estatísticas utilizadas para avaliar a validação dos modelos para projeção do diâmetro das três espécies analisadas.

Modelo	$r_{yy}$	RQME (%)	V (%)	MD (%)	Total
angico preto					
<b>1</b>	<b>0,9870 (1)</b>	<b>2,79 (1)</b>	<b>0,04 (2)</b>	<b>3,35 (1)</b>	<b>5</b>
2	0,9868 (2)	2,86 (2)	0,32 (5)	3,39 (2)	11
3	0,9801 (6)	4,12 (6)	-0,21 (4)	4,34 (6)	22
4	0,9864 (3)	2,97 (3)	-0,02 (1)	3,48 (3)	10
5	0,9855 (5)	3,41 (5)	0,64 (6)	3,79 (5)	21
6	0,9860 (4)	3,01 (4)	0,12 (3)	3,57 (4)	15
aroeira do sertão					
1	0,9935 (2)	1,99 (2)	-0,23 (4)	3,28 (2)	10
<b>2</b>	<b>0,9939 (1)</b>	<b>1,90 (1)</b>	<b>0,52 (6)</b>	<b>3,09 (1)</b>	<b>9</b>
3	0,9898 (6)	2,85 (6)	0,07 (2)	3,86 (5)	19
4	0,9929 (4)	2,34 (4)	-0,04 (1)	3,61 (4)	13
5	0,9920 (5)	2,84 (5)	0,08 (3)	4,02 (6)	19
6	0,9931 (3)	2,07 (3)	-0,37 (5)	3,37 (3)	14
breu vermelho					
1	0,9847 (3)	1,50 (2)	0,14 (3)	3,36 (2)	10
2	0,9843 (5)	1,56 (5)	0,22 (6)	3,43 (5)	21
3	0,9846 (4)	1,52 (3)	0,16 (5)	3,39 (3)	15
4	0,9839 (6)	1,58 (6)	0,13 (1)	3,48 (6)	19
5	0,9848 (1)	1,53 (4)	0,14 (2)	3,41 (4)	11
<b>6</b>	<b>0,9848 (2)</b>	<b>1,50 (1)</b>	<b>0,16 (4)</b>	<b>3,35 (1)</b>	<b>8</b>

Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentadas as análises gráficas dos resíduos para a validação dos modelos para projeção do diâmetro das árvores das espécies em estudo. Assim como no ajuste, a dispersão dos resíduos foi semelhante para os seis modelos, nas três espécies, ficando entre  $\pm 20\%$ . Analisando os gráficos de resíduos das estimativas dos modelos para projeção do diâmetro das árvores de aroeira do sertão (Figura 8), verificou-se que não houve diferença discrepante entre os mesmos. Os resíduos percentuais para projeção dos diâmetros para breu vermelho (Figura 9) foi muito semelhante em todos os modelos estudados, não havendo diferença considerável entre os mesmos, assim como no ajuste.

Figura 7. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção do diâmetro em função dos diâmetros estimados, para o angico preto.

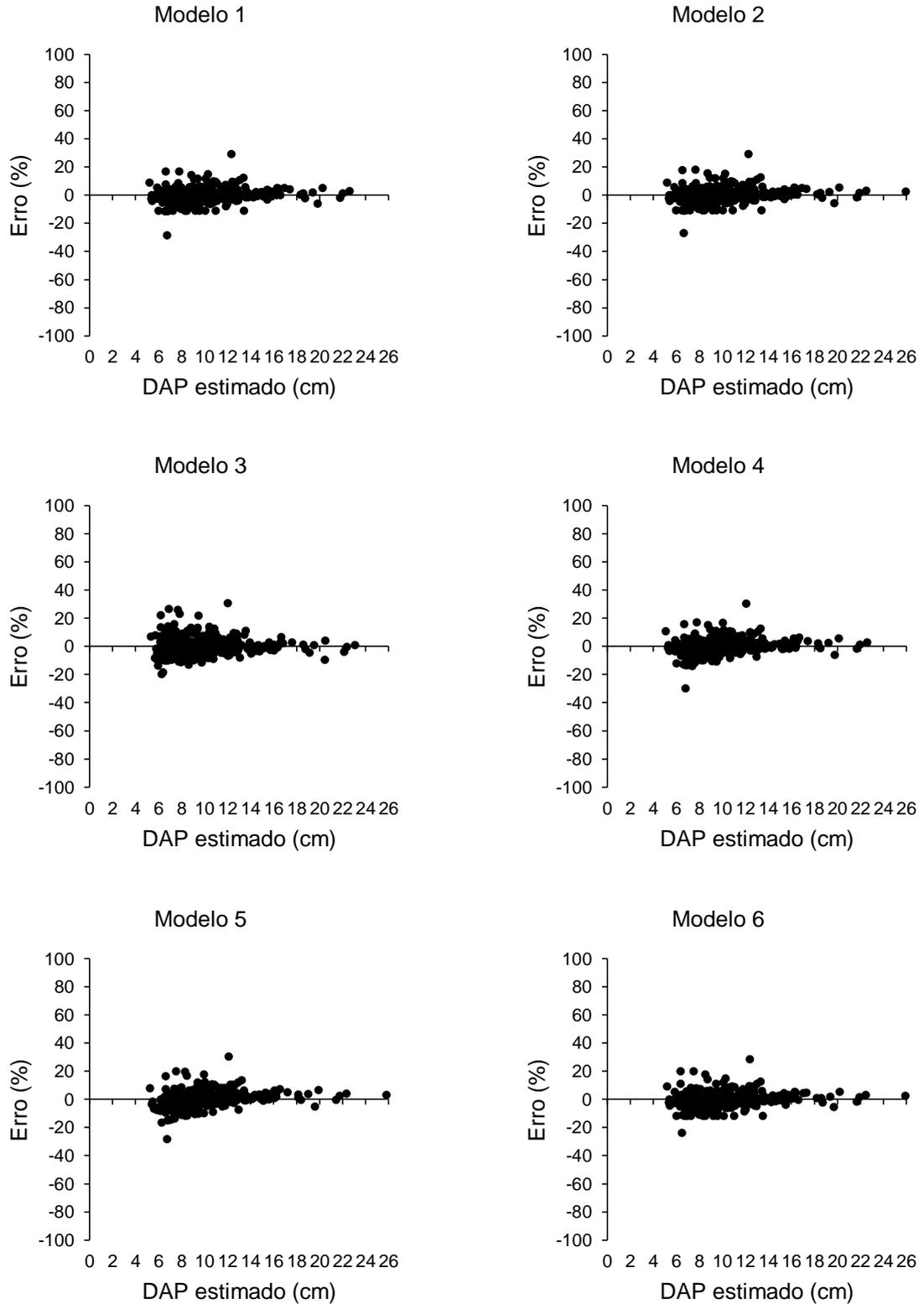


Figura 8. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção do diâmetro em função dos diâmetros estimados, para a aroeira do sertão.

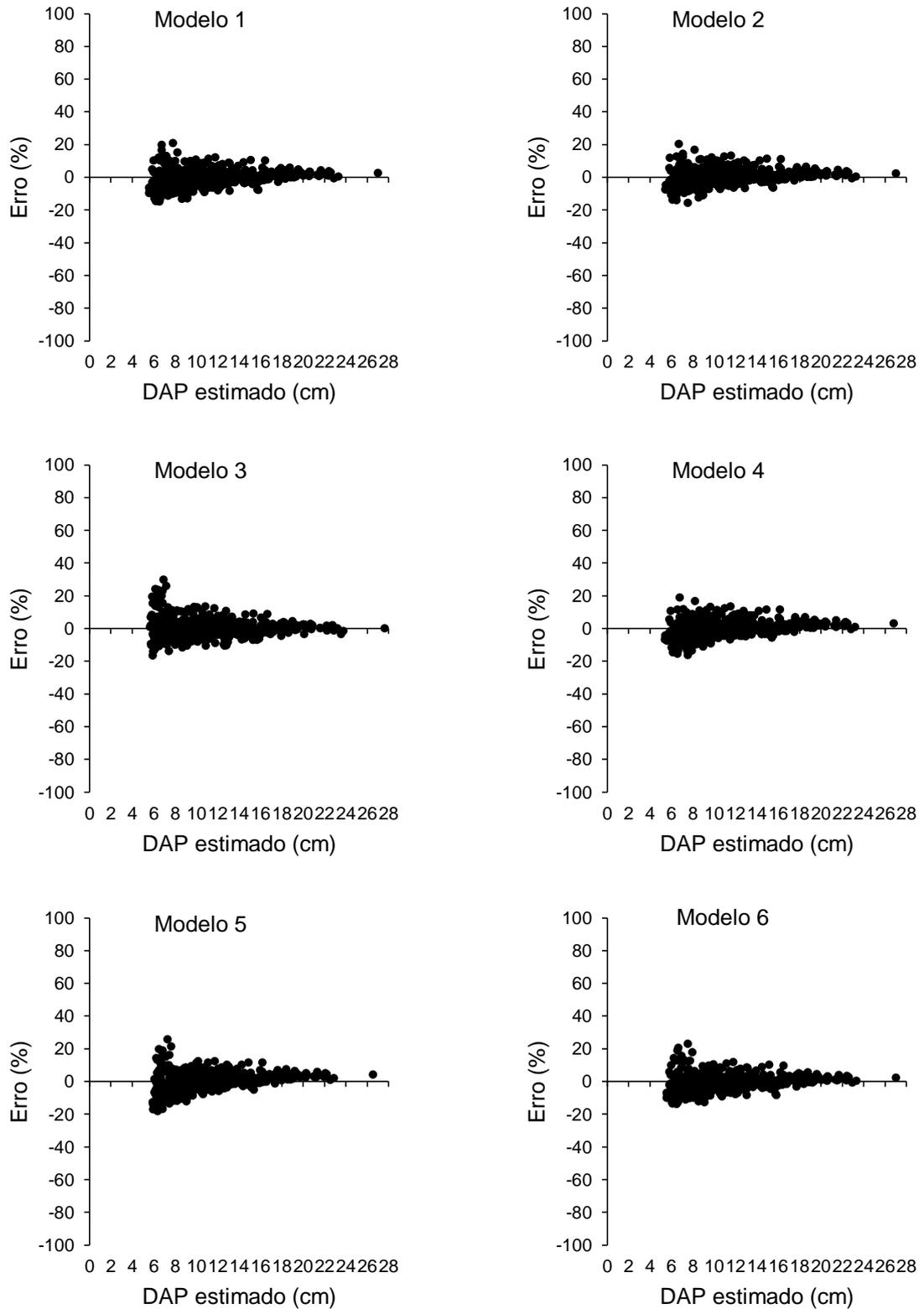
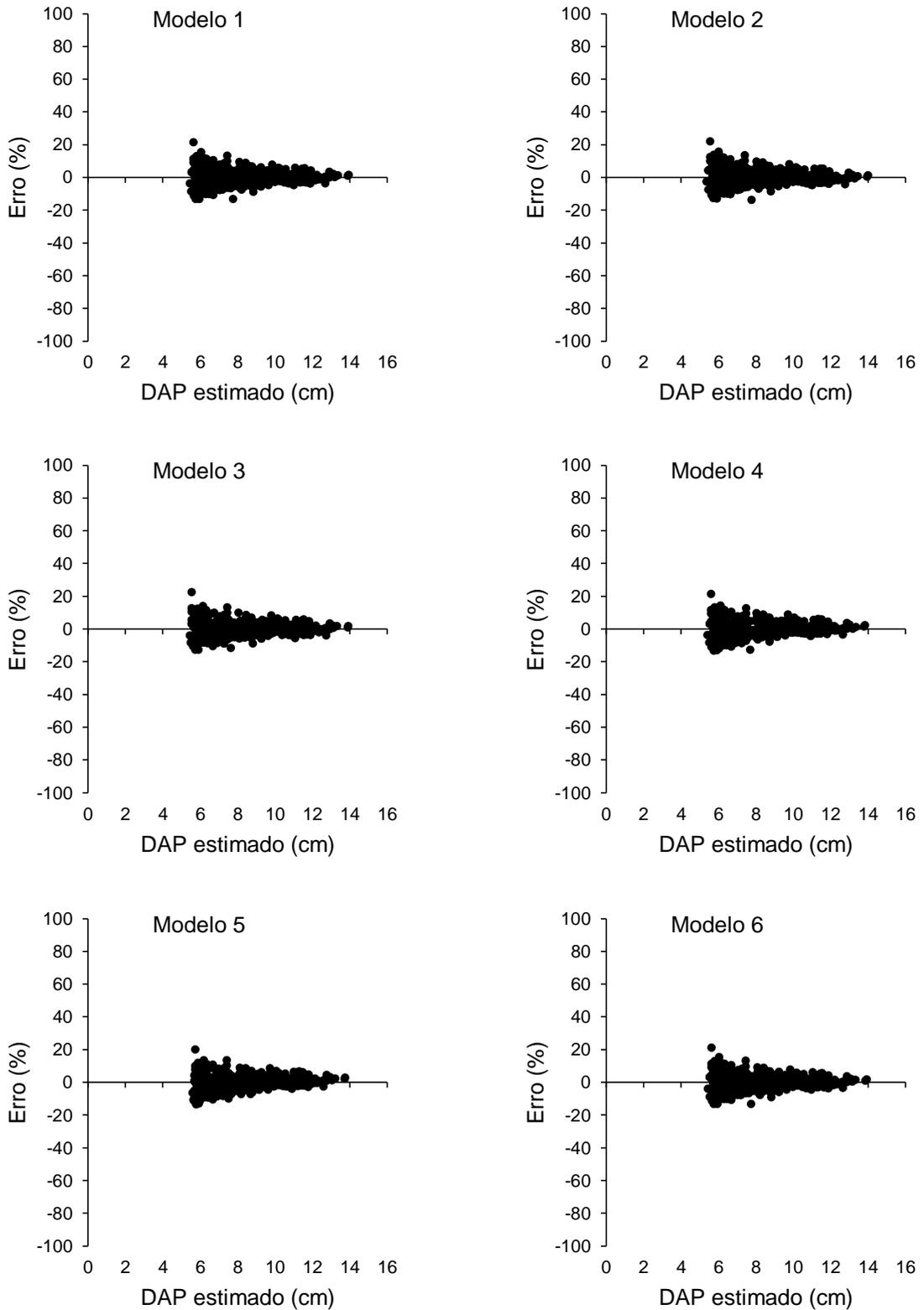


Figura 9 Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção do diâmetro em função dos diâmetros estimados, para o breu vermelho.



Na Tabela 12, onde constam as estatísticas utilizadas para avaliar a validação dos modelos para projeção da altura das árvores, percebe-se que, assim como no ajuste (Tabela 10), o modelo 4 foi o mais exato para projeção da altura das árvores das espécies analisadas.

Foram observados valores semelhantes aos dados do ajuste quanto às estatísticas analisadas ( $r_{yy}$ , RQME%, V% e MD%). O modelo 3 se diferenciou dos demais, em termos de exatidão ( $r < 0,86$ ; RQME  $> 12\%$  e MD  $> 9\%$ ), para a projeção da altura do angico preto e da aroeira do sertão. Para o breu vermelho, a diferença de exatidão apresentada pelo modelo 3 foi menos evidente, sendo semelhante ao modelo 5.

Tabela 12. Estatísticas utilizadas para avaliar a validação dos modelos para projeção da altura das três espécies analisadas.

Modelo	$r_{yy}$	RQME (%)	V (%)	MD (%)	Total
angico preto					
1	0,9605 (3)	3,57 (3)	1,09 (4)	4,53 (3)	13
2	0,9570 (5)	3,79 (4)	0,74 (2)	4,73 (4)	15
3	0,8460 (6)	12,50 (6)	-0,89 (3)	9,21 (6)	21
<b>4</b>	<b>0,9647 (1)</b>	<b>3,08 (1)</b>	<b>0,52 (1)</b>	<b>4,23 (1)</b>	<b>4</b>
5	0,9624 (2)	3,35 (2)	1,19 (5)	4,45 (2)	11
6	0,9579 (4)	3,86 (5)	1,52 (6)	4,73 (5)	20
aroeira do sertão					
1	0,9635 (4)	4,53 (4)	-0,31 (2)	4,85 (3)	13
2	0,9644 (2)	4,50 (3)	-0,56 (6)	4,83 (2)	13
3	0,8505 (6)	17,25 (6)	0,09 (1)	10,26 (6)	19
<b>4</b>	<b>0,9655 (1)</b>	<b>4,26 (1)</b>	<b>-0,53 (5)</b>	<b>4,54 (1)</b>	<b>8</b>
5	0,9638 (3)	4,46 (2)	-0,51 (4)	4,88 (4)	13
6	0,9634 (5)	4,55 (5)	-0,37 (3)	4,88 (5)	18
breu vermelho					
1	0,9716 (4)	1,51 (3)	0,083 (4)	3,42 (3)	14
2	0,9710 (5)	1,54 (4)	-0,045 (1)	3,46 (4)	14
3	0,9259 (6)	3,82 (5)	-0,167 (5)	5,59 (5)	21
<b>4</b>	<b>0,9730 (2)</b>	<b>1,43 (1)</b>	<b>-0,076 (2)</b>	<b>3,33 (1)</b>	<b>6</b>
5	0,9745 (1)	4,11 (6)	5,801 (6)	5,81 (6)	19
6	0,9718 (3)	1,50 (2)	0,079 (3)	3,37 (2)	10

Nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentadas as análises gráficas dos resíduos para a validação dos modelos para projeção da altura de árvores das espécies em estudo. Assim como no ajuste dos dados, com exceção do modelo 3, a distribuição dos resíduos para validação foi semelhante para todos os modelos, mostrando bons ajustes. Novamente o modelo 3 apresentou a maior amplitude do erro, o que também pode ser observado no gráfico de dispersão dos resíduos (Figura 10).

Observou-se nos resíduos percentuais para a aroeira do sertão (Figura 11), similaridade na dispersão residual das estimativas de validação dos modelos, com exceção do modelo 3, o qual também se mostrou menos acurado na projeção das alturas da validação. Em árvores maiores, pode-se notar uma leve superestimação dos modelos nas projeções das alturas, resultado também observado no ajuste.

Os modelos 1, 2, 3, 4 e 6 foram semelhantes quanto à dispersão dos resíduos, para a espécie breu vermelho, podendo qualquer um desses ser usado para projetar o diâmetro das árvores, pois apresentaram boa distribuição (Figura 12). Pode-se notar na análise gráfica que o modelo 5 tende a subestimar as alturas das árvores como observado no ajuste, mostrando distribuição viesada. Os resultados encontrados na validação dos dados foram semelhantes ao ajuste.

Figura 10. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção da altura em função das alturas estimadas, para o angico preto.

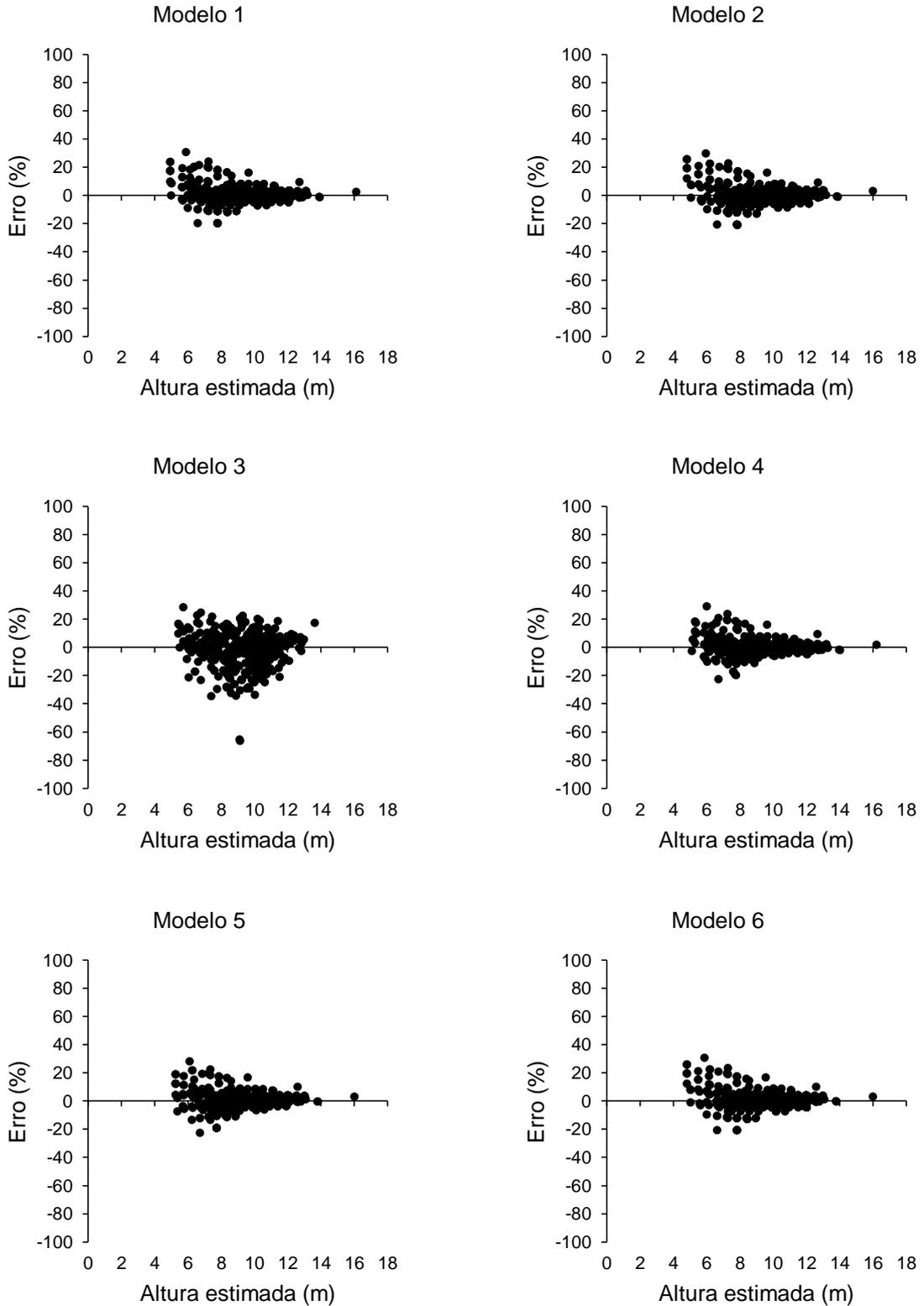


Figura 11. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção da altura em função das alturas estimadas, para a aroeira do sertão.

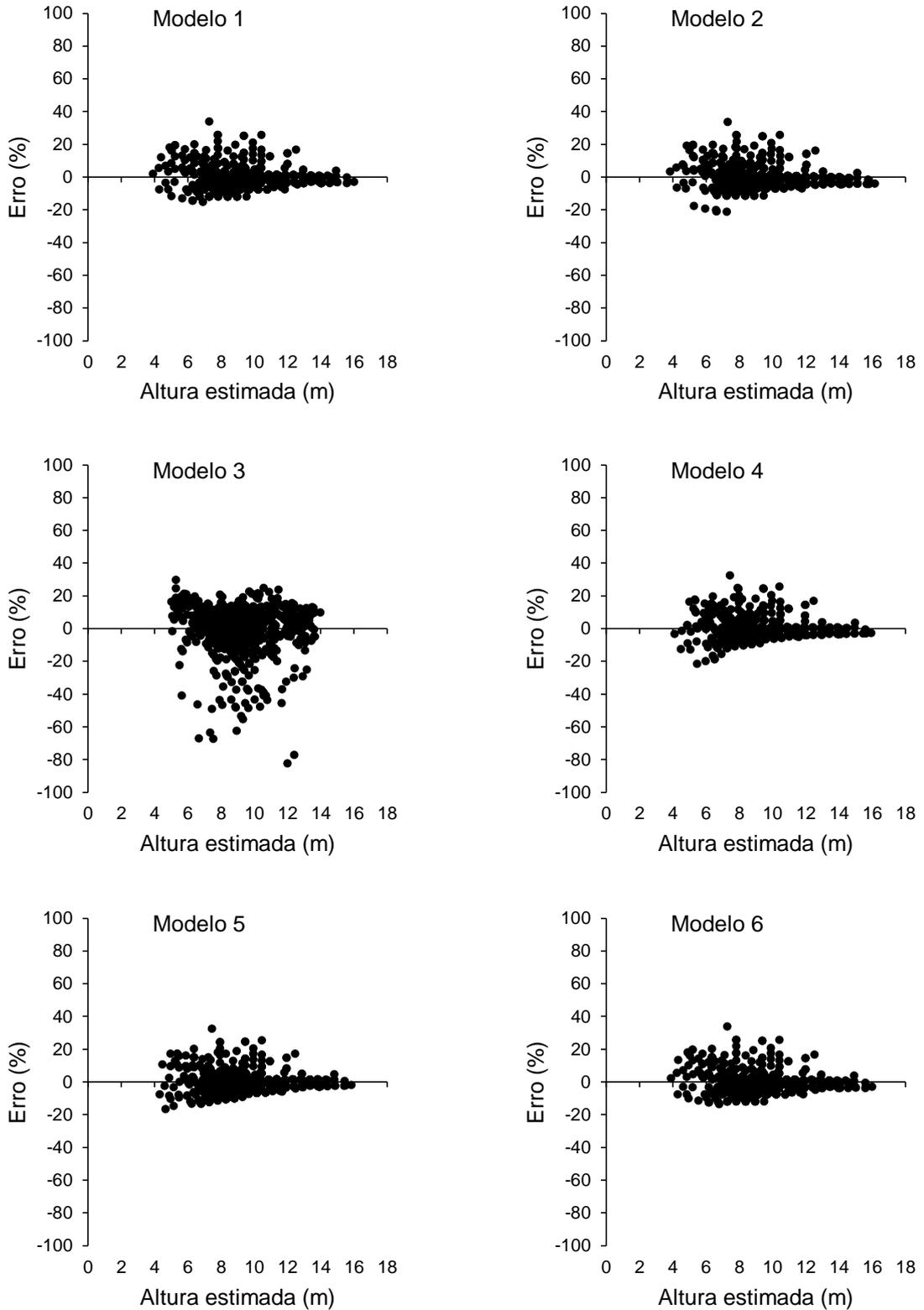
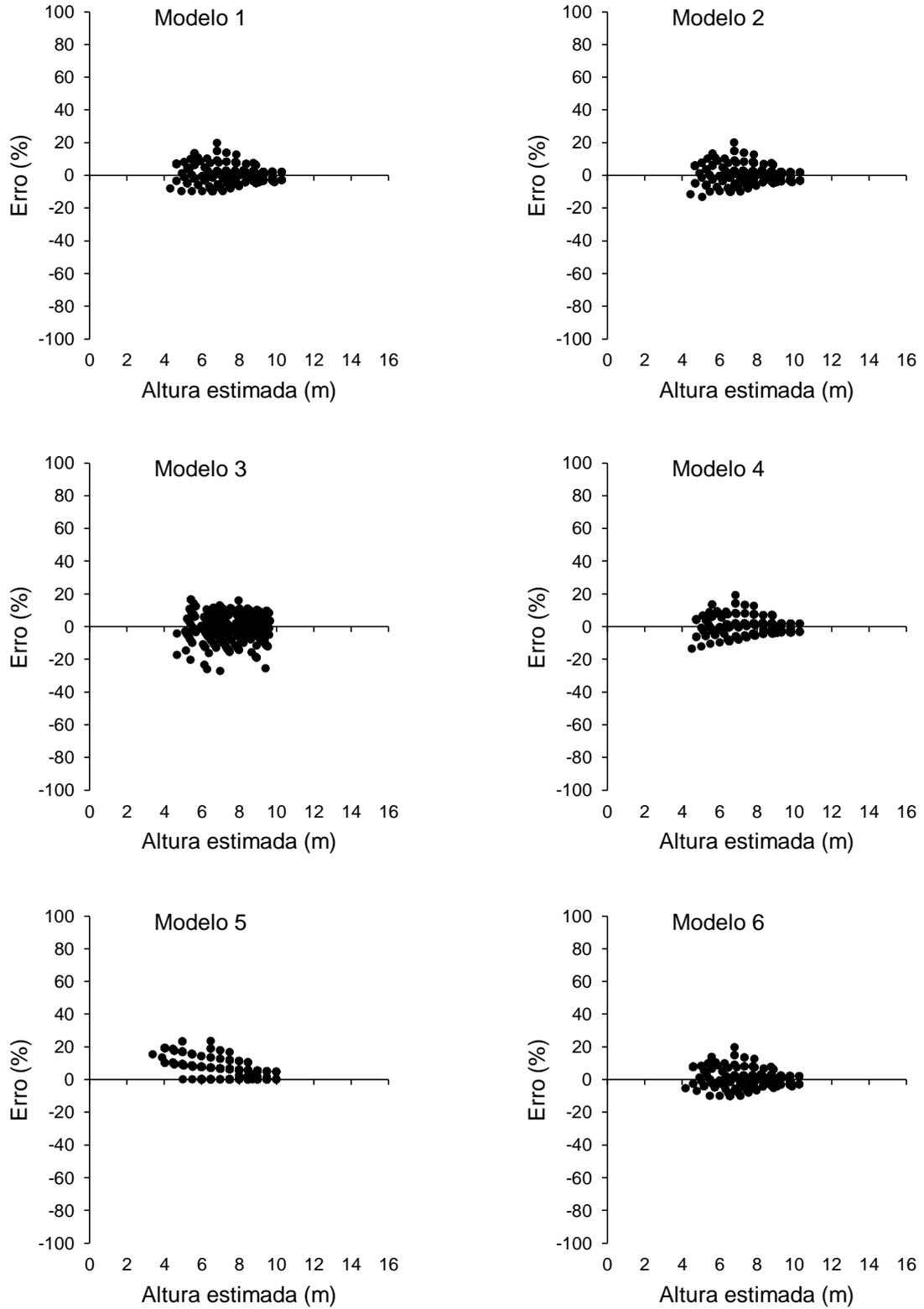


Figura 12. Distribuição dos resíduos percentuais dos modelos de projeção da altura em função das alturas estimadas, para o breu vermelho.



## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que os índices de competição 1 de Glover e Hool (1979), 3 de STAGE (1973) e 5 de Tomé e Burkart (1989), obtiveram melhores resultados nas correlações com as variáveis de crescimento para as espécies angico preto e aroeira do sertão, sendo este último o que apresentou maiores correlações. Já para o breu vermelho o índice que apresentou melhores correlações foi o IID<sub>4</sub> de Glover e Hool (1979).

Os modelos de Pienaar e Schiver (modelo 1) e Schumacher adaptado por Campo e Leite (modelo 2) foram os modelos mais exatos para projeção dos diâmetros das árvores das espécies angico preto e aroeira do sertão. Já para o breu vermelho, não houve diferença nas projeções dos modelos em termos de exatidão, evidenciando que todos podem ser utilizados para projeção do diâmetro dessa espécie.

O modelo adaptado de Bella, Sterba e Monserud (modelo 4) foi o mais exato nas projeções das alturas das espécies em estudo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELLA, I. E. A new competition model for individual tree. **Forest Science**, Washington, v. 17, n. 3, p. 364-372, 1971.

BINOTI, M. L. M. da S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 54 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CAMPOS, J. C. C; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed., Viçosa: UFV, 2013. 548 p.

CASTRO, R. V. O.; CARLOS PEDRO BOECHAT SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.3, p. 287-295. 2013.

CASTRO, R.; SOARES, C.; LEITE, H.; SOUZA, A.; MARTINS, F.; NOGUEIRA, G.; OLIVEIRA, M.; SILVA, F. Competição em nível de árvore individual em uma floresta estacional semidecidual. **Silva Lusitana**. Oeiras, Portugal, p. 43 - 66. 2014.

CASTRO, R.V.O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. 2011. 80p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CHASSOT, T. **Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na floresta ombrófila mista**. Santa Maria, 2009. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; LONGHI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *araucaria angustifolia* (bertol.) kuntze em floresta ombrófila mista. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 303-313, 2011.

CITÓ, A. M. G. L.; COSTA, F. B.; LOPES, J. A. D.; OLIVEIRA, V. M. M.; CHAVES, M. H. Identificação de constituintes voláteis de frutos e folhas de *Protium heptaphyllum* Aubl (March). **Revista Brasileira**. Botucatu, v. 8, n. 4, p. 4 - 7, 2006.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333 p.

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de *Eucalyptus* no Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, n. 37, p. 33 – 4, 1987.

CUNHA, T. A. da. **Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na floresta amazônica**. 2009. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. An comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal of Forest Research**, Vancouver, v. 16, p. 1230 - 1237, 1986.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**. 3. ed., New York: McGraw-Hill Book, 1987. 790 p.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N.; BETTINGER, P.; HOWARD, T. E. **Forest management: to sustain ecological, economic, and social values**. 4. ed., Illinois: Waveland Press, 2005. 804 p.

FRAGA FILHO, C. V. **Modelagem para prognose do crescimento e produção de eucalipto em diferentes níveis de abordagem**. 2016. 279 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, Washington, v. 25, n. 2, p. 275 - 282, 1979.

GONZÁLEZ, M. S.; RÍO, M. del; CAÑELLAS, I.; MONTERO, G. Distance independent tree diameter growth model for cork oak stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 225, p. 262-270, 2006.

GUJARATI, D. **Econometria básica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006. 811 p.

HASENAUER, H. Princípios para a modelagem de ecossistemas florestais. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 53-69, 2000.

HASENAUER, H. **Sustainable forest management**: growth models for Europe. Berlin: Springer, 2006. 398p.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J. (Ed.). **Growth models for tree and stand simulation**. Royal College of Forestry. Stockholm, p.74-90. 1974.

IBÁ- Indústria Brasileira de Árvores. 2015. Disponível em: <[http://www.iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf) >. Acesso em: junho de 2015.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 5 ed., Nova Odessa: SP, 2008. 384 p.

MARTINS, F. B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos**. 2011. 159 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MARTINS, F.B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. de.; CASTRO, R.V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.46, n.9, p.1089-1098, 2011.

OHEIMB, G.V.; LANG, A.C.; BRUELHEIDE, H.; FORRESTER, D.I.; WASCHE, I.; YU, M.; HARDTLE, W., 2011. Individual-tree radial growth in a subtropical broad-leaved forest: The role of local neighbourhood competition. **Forest Ecology and Management**, p. 499-507.

PEREIRA, P.S.; BARROS, L.M.; BRITO, A.M.; DUARTE, A.E.; MAIA, A.J. Uso da *Myracrodruon urundeuva* Allemão (aroeira do sertão) pelos agricultores no tratamento de doenças. **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, Cidade de la Habana, v. 19, n. 1, p.51-60, 2014.

PIENNAR, L. V.; SHIVER, B. D. Survival function for site prepared slash pine plantations in flat Woods of Georgia Northern Florida. **Southern Journal Forestry**, Bethesda, v. 5, n. 2, p. 59-62, 1981.

- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2016.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.
- SILVA, G. F.; CURTO, R. A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. C. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 2, 2012.
- SOARES, P.; TOMÉ, M. Height – diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 166, n. 1, p. 99-109, 2002.
- STAGE, A. R. Prognosis model for stand development. **Serv. Res. Pap.** Washington, 32 p. 1973.
- STERBA, H.; MONSERUD, R. A. Applicability of the forest stand growth simulator PROGNAUS for the Austrian part of the Bohemian Massif. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 98, n. 1, p. 23-34, 1997.
- TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2005. 135 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual tree. **Forest Science**, Washington, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.
- UZOH, F. C. C.; OLIVER, W. W. Individual tree height increment model for managed even - aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using linear mixed effects models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 22, n. 1-3, p. 147-154, 2006.
- VIEIRA, G. C. **Prognose do diâmetro e da altura de árvores individuais utilizando inteligência artificial**. 2015. 51 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

WEBER, P.; BUGMANN, H. FONTI, P.; RIGLING, A. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 254, n. 1, p. 96-106, 2008.

ZHAO, L.; LI, C.; TANG, S. Individual-tree diameter growth model for fir plantations based on multi-level linear mixed effects models across southeast China. **Journal of Forest Research**, China, v. 18, n. 4, p. 305-315, 2013.

## 8. ANEXOS

Figura 13. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) dos modelos de projeção do diâmetro, para o angico preto.

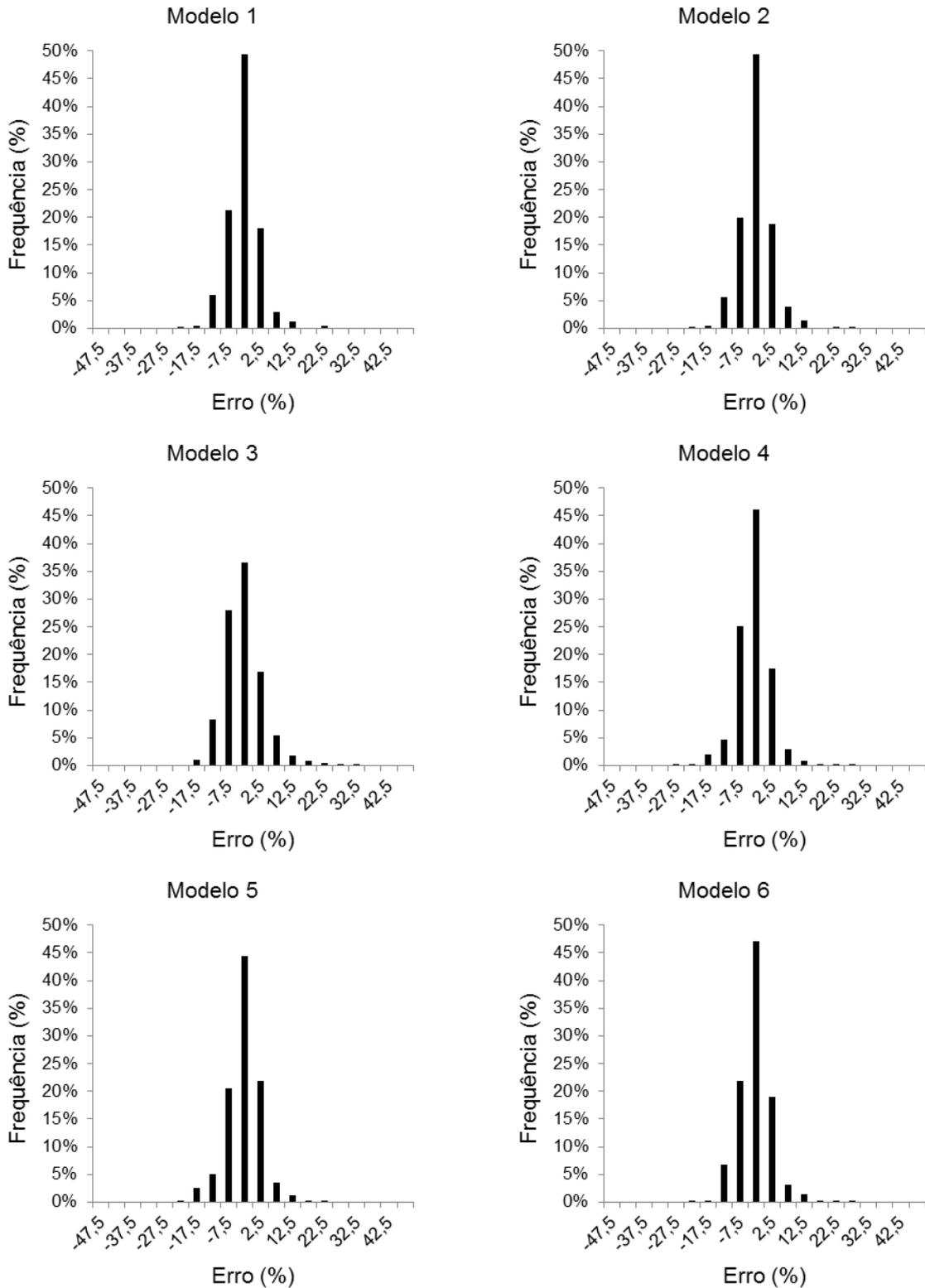


Figura 14. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) dos modelos de projeção do diâmetro, para a aroeira do sertão.

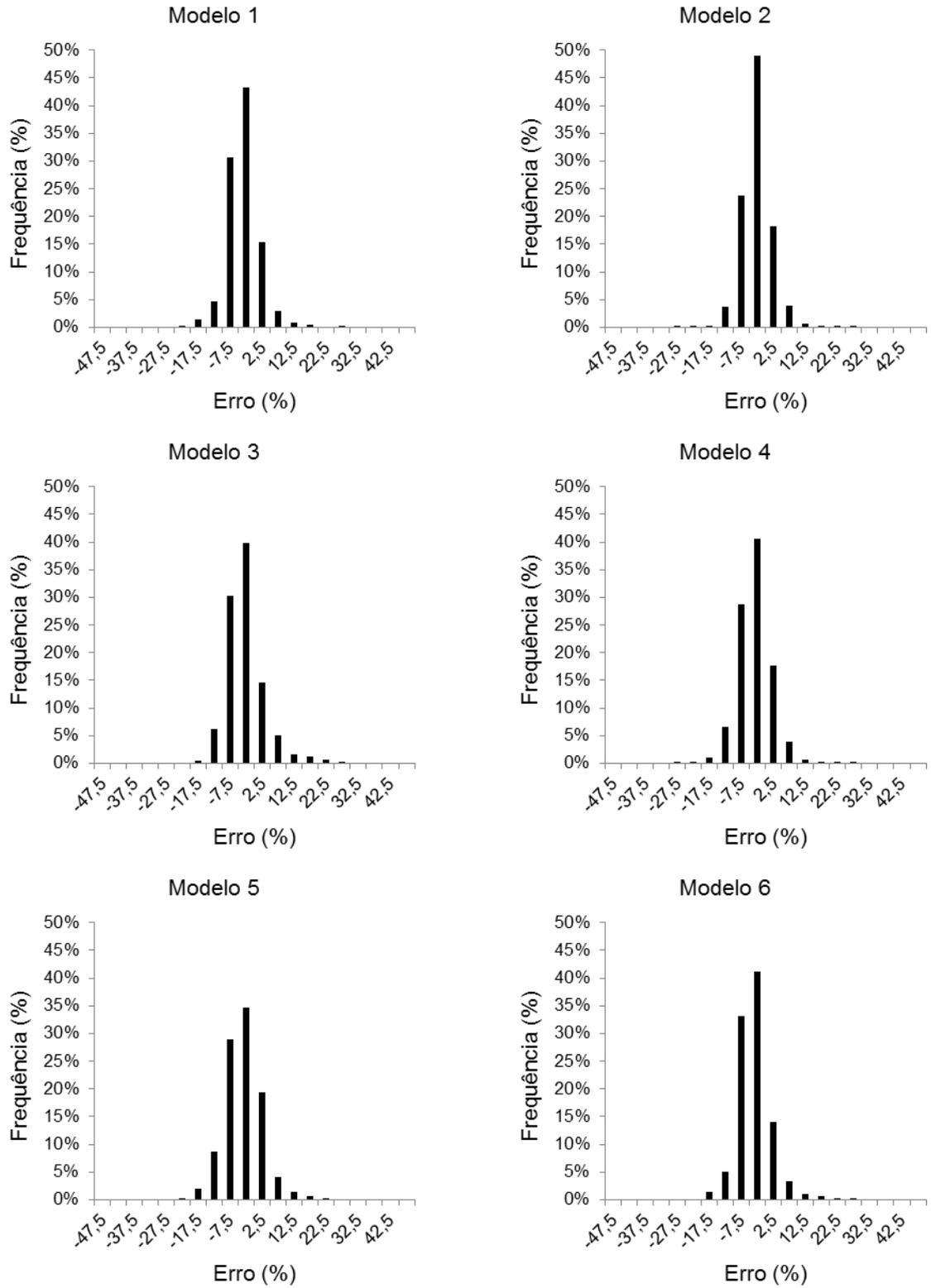


Figura 15. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) dos modelos de projeção do diâmetro, para o breu vermelho.

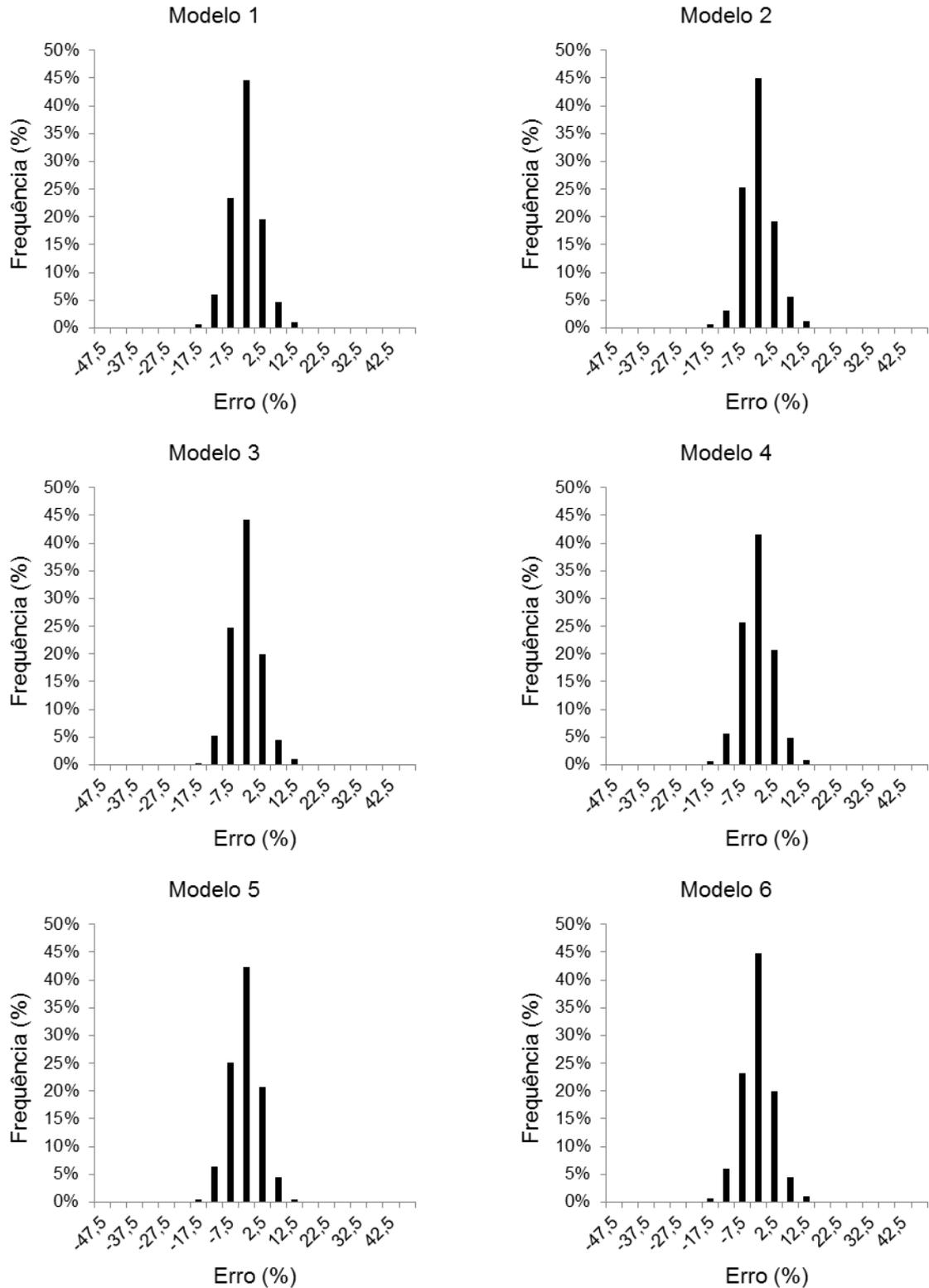


Figura 16. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) dos modelos de projeção da altura, para o angico preto.

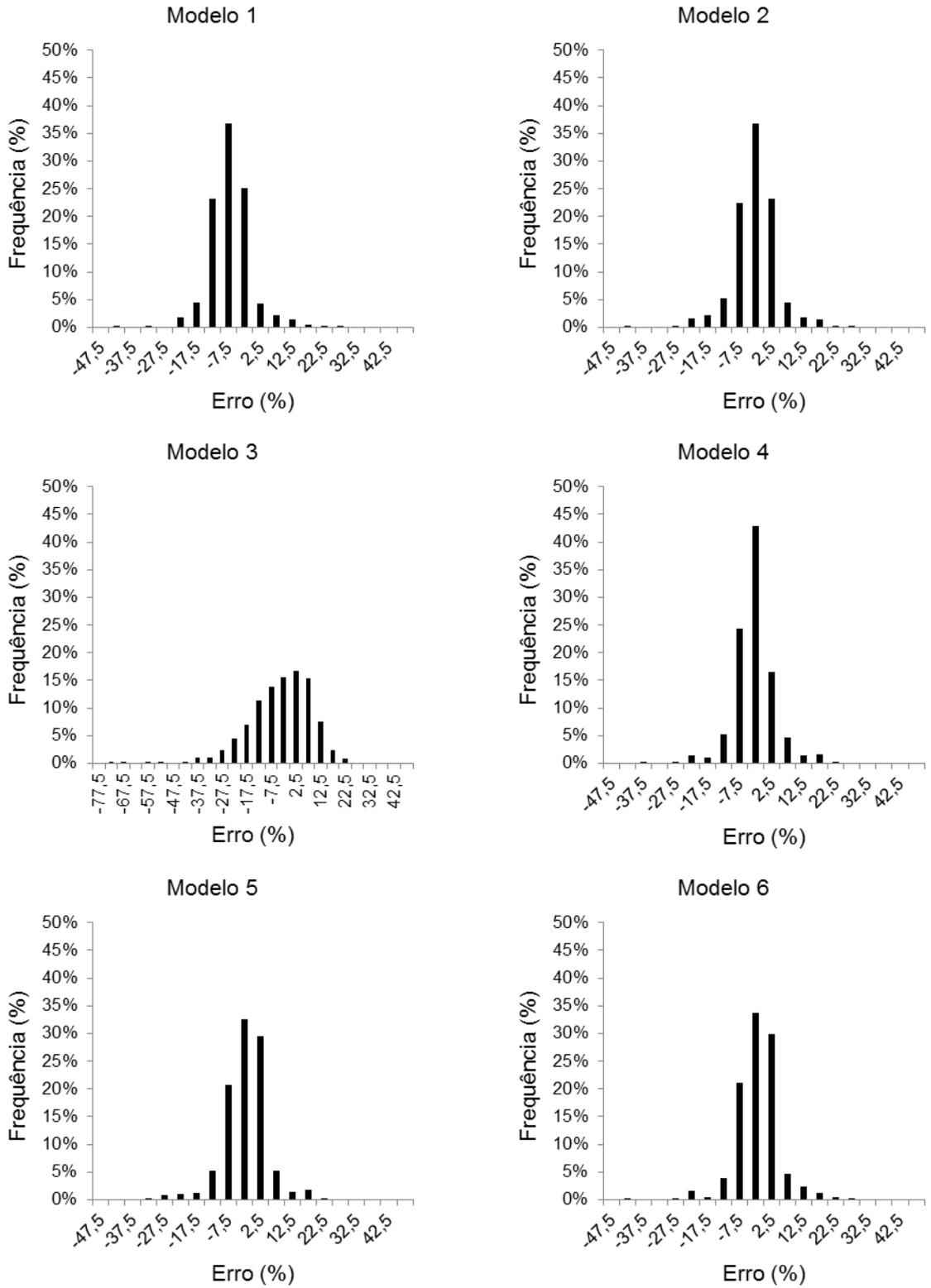


Figura 17. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) dos modelos de projeção da altura, para a aroeira do sertão.

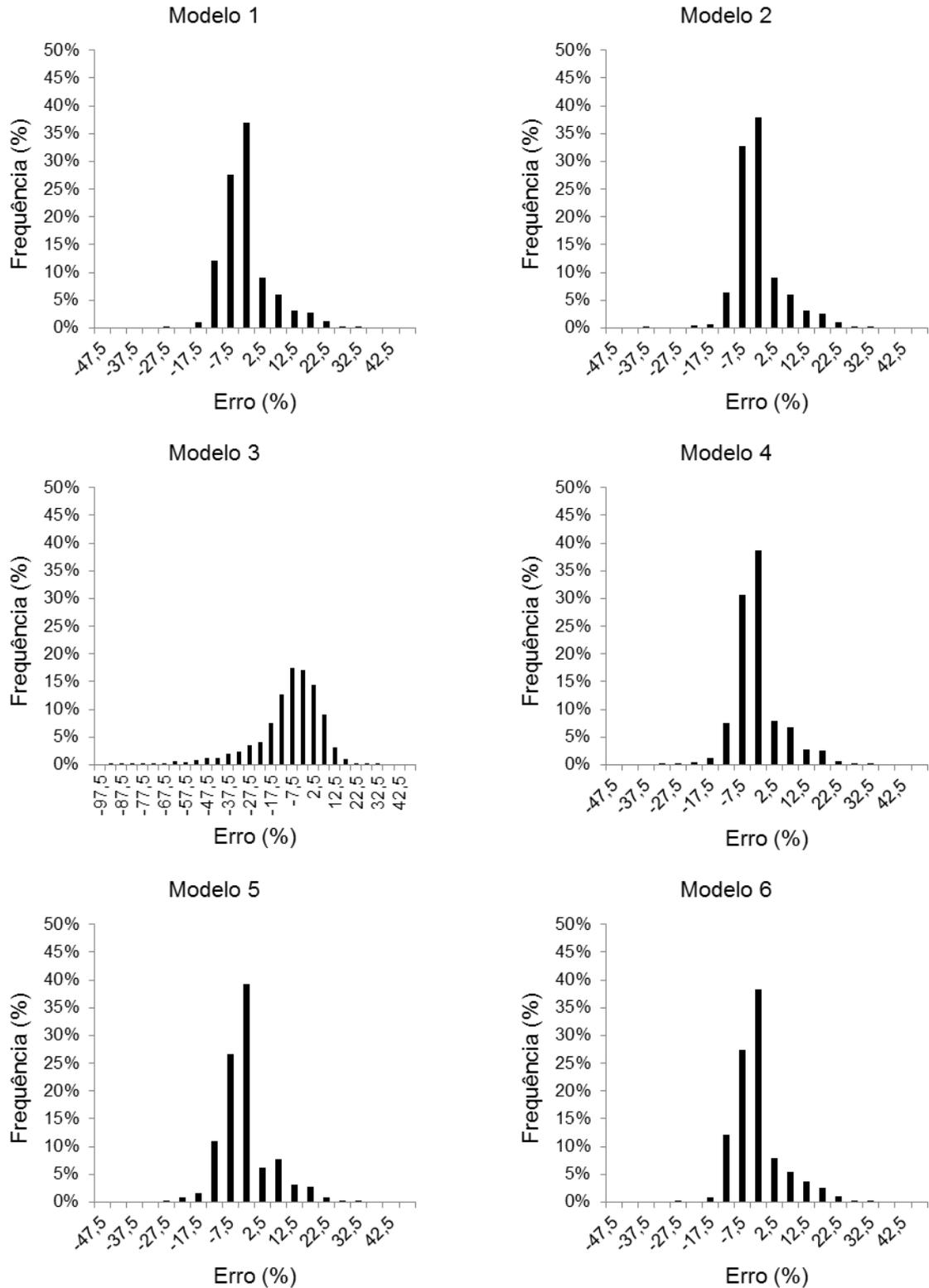


Figura 18. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) dos modelos de projeção da altura, para o breu vermelho.

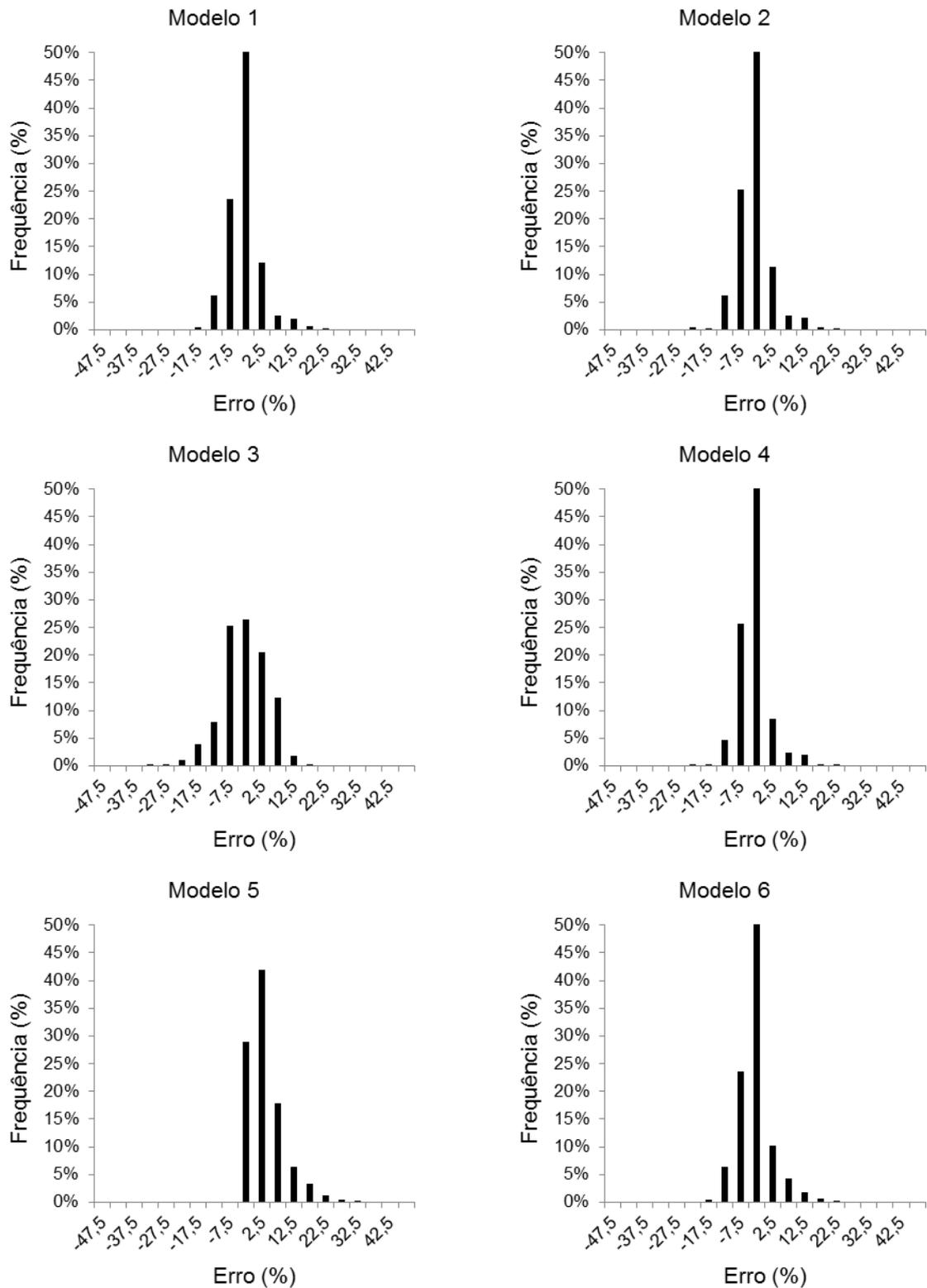


Figura 19. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) da validação dos modelos de projeção do diâmetro, para o angico preto.

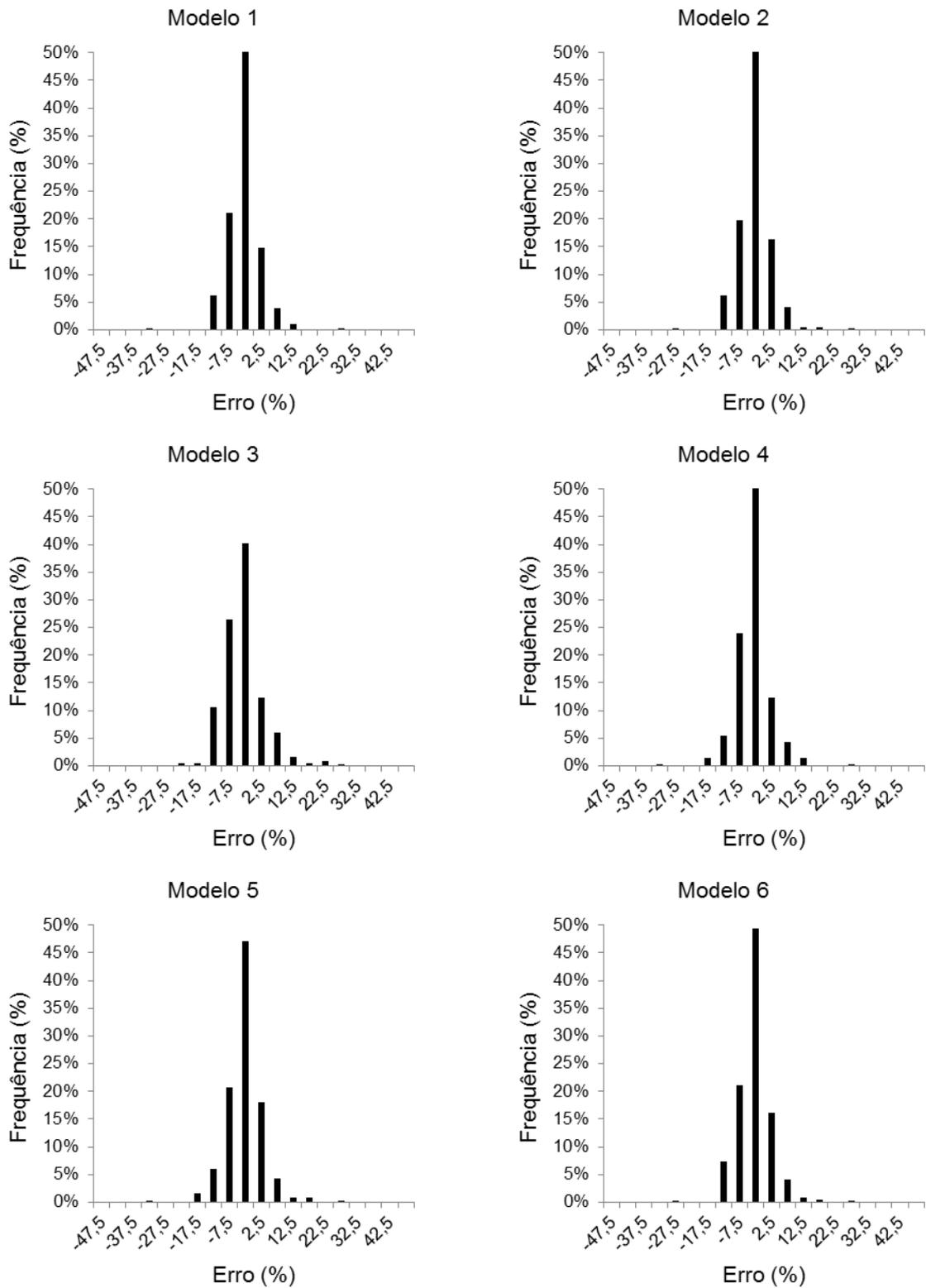


Figura 20. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) da validação dos modelos de projeção do diâmetro, para a aroeira do sertão.

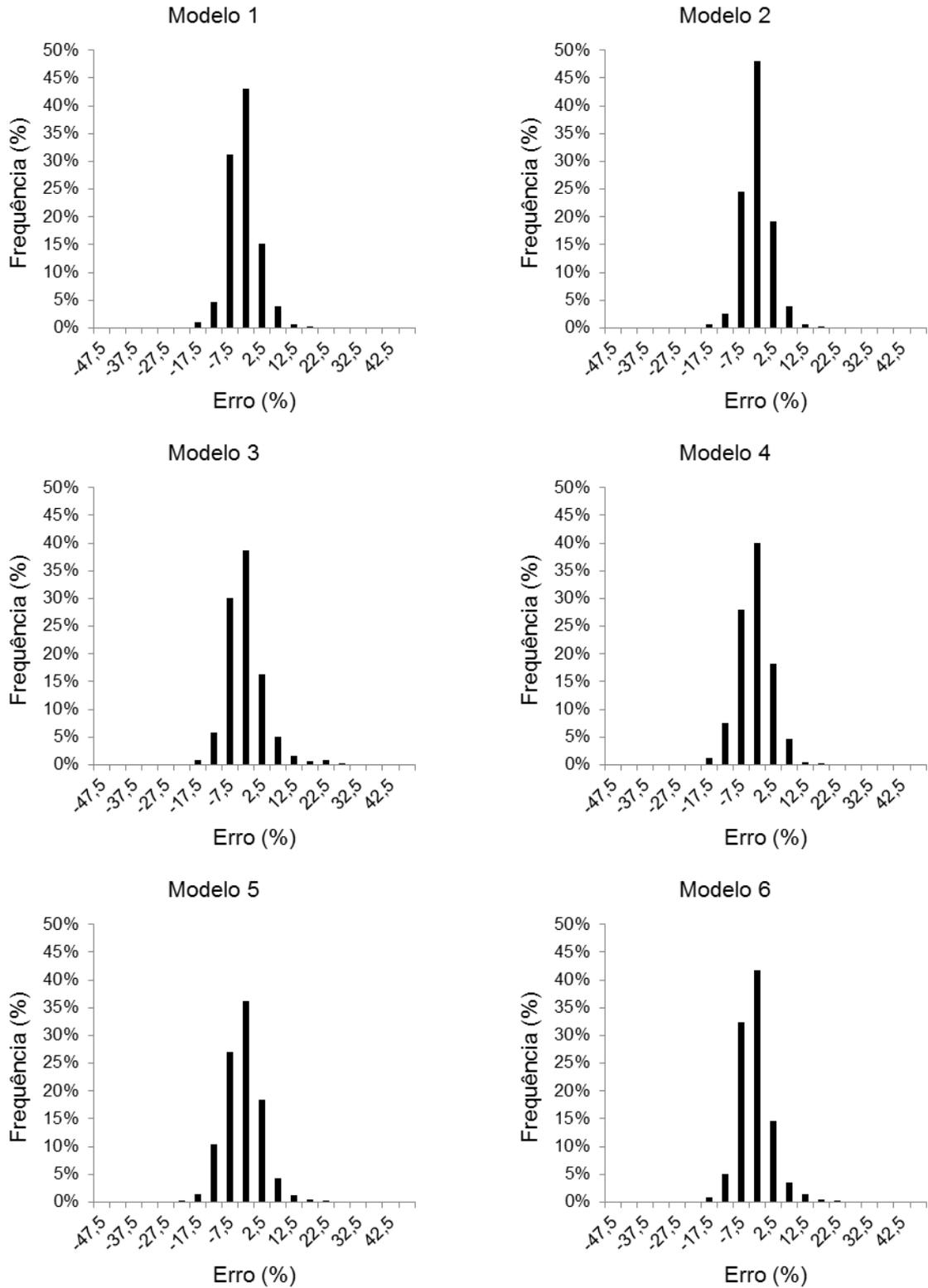


Figura 21. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) da validação dos modelos de projeção do diâmetro, para o breu vermelho.

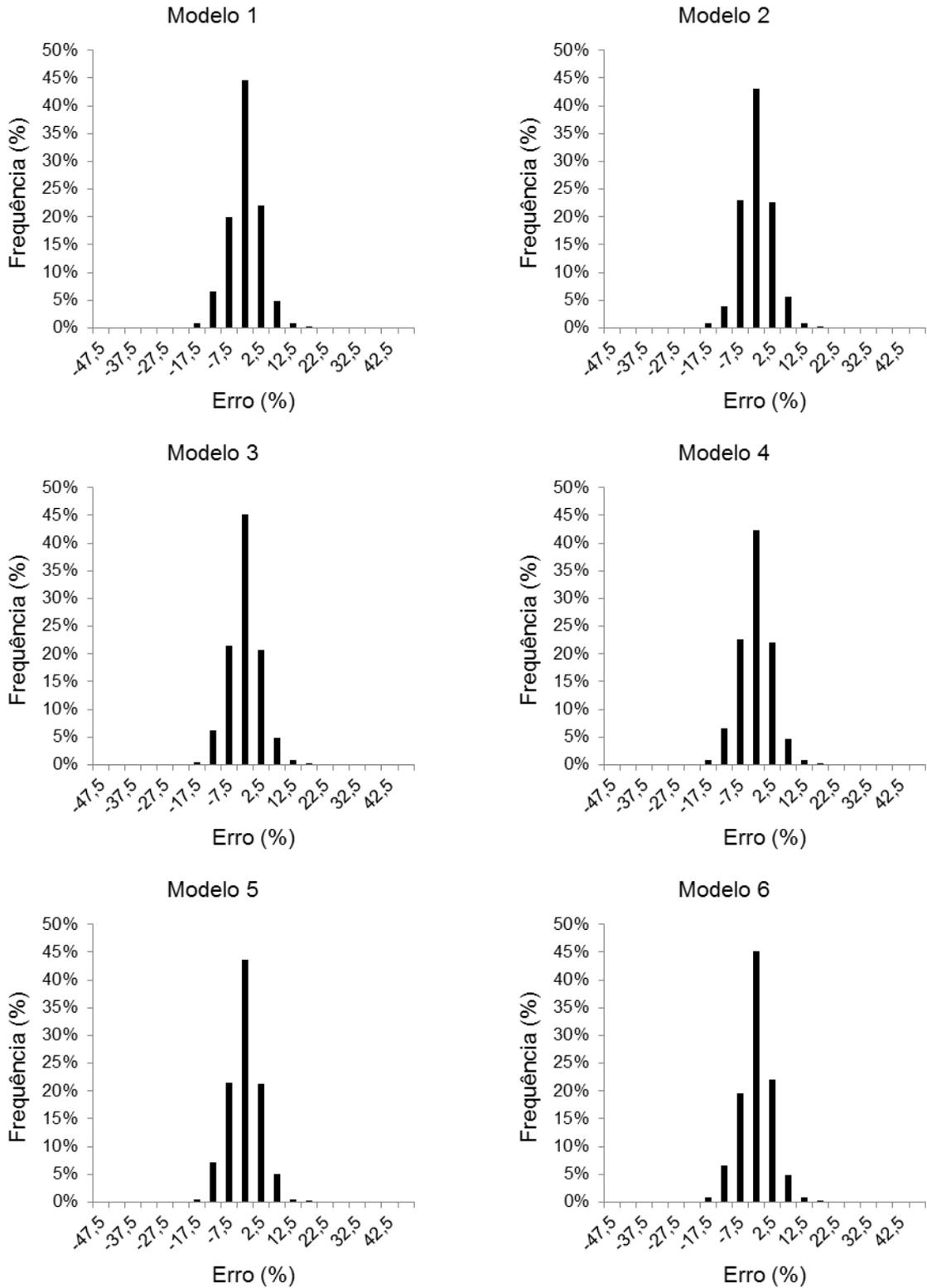


Figura 22. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) da validação dos modelos de projeção da altura, para o angico preto.

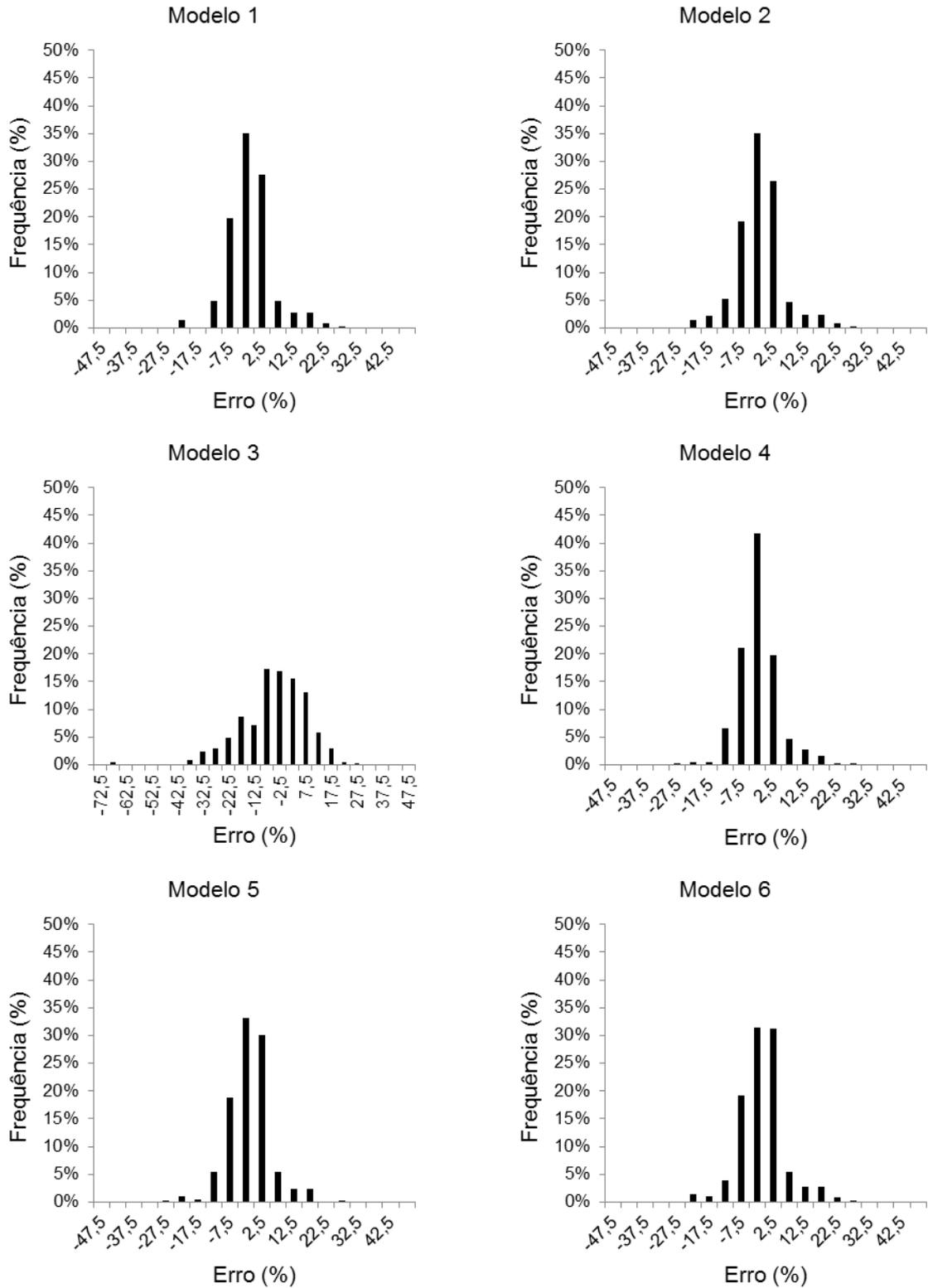


Figura 23. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) da validação dos modelos de projeção da altura, para a aroeira do sertão.

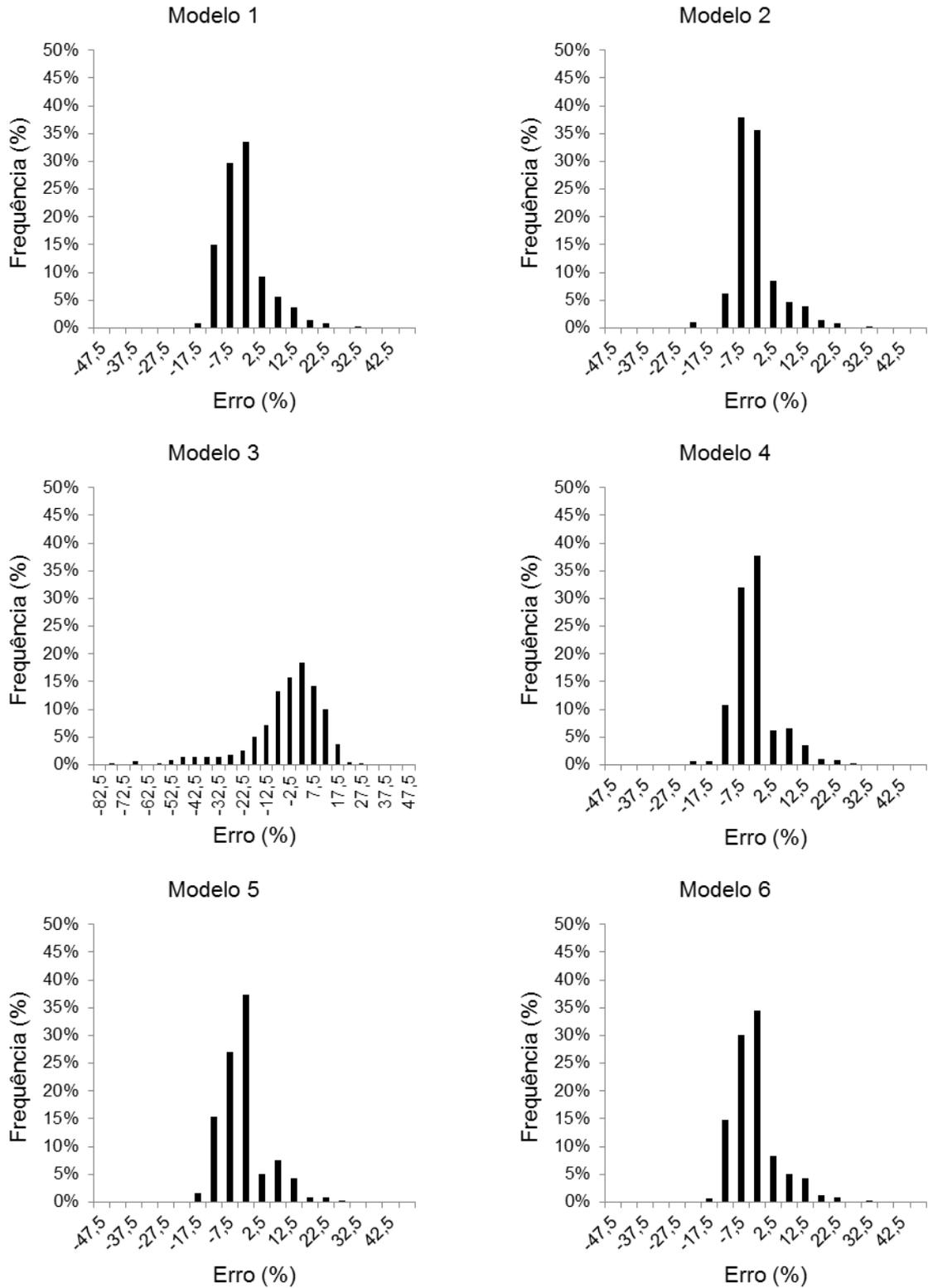


Figura 24. Distribuição de frequência (%) dos erros (%) da validação dos modelos de projeção da altura, para o breu vermelho.

