

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**MODELAGEM DO AFILAMENTO DE FUSTE COM CASCA,
SEM CASCA, CERNE E MEDULA DE *Tectona grandis* L.F. (TECA)
NA OTIMIZAÇÃO DE MULTIPRODUTOS**

Linha de pesquisa: Manejo Florestal

Estudante: Luísa Gurjão de Carvalho Amaral - Matrícula: 09/0123450

Orientador: Prof. Dr. Renato Vinícius Oliveira Castro

Co-orientador: Prof. Dr. Éder Pereira Miguel

Projeto de pesquisa apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Brasília- DF, Novembro 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**MODELAGEM DO AFILAMENTO DE FUSTE COM CASCA, SEM CASCA,
CERNE E MEDULA DE *Tectona grandis* L.F. (TECA) NA OTIMIZAÇÃO DE
MULTIPRODUTOS**

Aluna: Luísa Gurjão de Carvalho Amaral

CPF: 002.106.531-40

Menção: 55

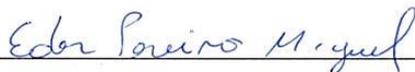
Aprovada por:



Prof. Dr. Renato Vinicius Oliveira Castro

Universidade Federal de São João Del-Rei – Departamento de Ciências Agrárias

(Orientador)



Prof. Dr. Éder Pereira Miguel

Departamento de Engenharia Florestal - UnB

(Co-orientador)



MSc. Fabrício Assis Leal

Departamento de Engenharia Florestal - UnB

(Membro da Banca)

Brasília – DF, 26 novembro de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

AMARAL, LUÍSA GURJÃO DE CARVALHO

Modelos de afilamento de fuste com casca, sem casca, cerne e medula de *Tectona grandis* L.f. (Teca) para otimização de multiprodutos [Distrito federal], 2014.

EFL/FT/UnB – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, L.G.C. (2014). **Modelagem do afilamento de fuste com casca, sem casca, cerne e medula de *Tectona grandis* l.f. (Teca) na otimização de multiprodutos.** Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 31p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: LUÍSA GURJÃO DE CARVALHO AMARAL

TÍTULO: Modelagem do afilamento de fuste com casca, sem casca, cerne e medula de *Tectona grandis* l.f. (Teca) na otimização de multiprodutos.

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa monografia pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Luísa Gurjão de Carvalho Amaral

Os índios shuar, chamados de jíbaros, cortam a cabeça do vencido. Cortam e reduzem, até que caiba, encolhida, na mão do vencedor, para que o vencido não ressuscite. Mas o vencido não está totalmente vencido até que fechem a sua boca. Por isso os índios costuram seus lábios com uma fibra que não apodrece jamais.
(Eduardo Galeano)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Gláucia e Paulo, mãe e irmão, minha pequena grande família por serem meu suporte, meu estímulo e minha alegria. Por serem os principais responsáveis por quem eu sou e por sempre estarem ao meu lado aonde quer que eu esteja. Muito obrigada por creditarem em mim a confiança e a dedicação de vocês.

Aos meus avós por todo apoio que sempre deram a todos. Ao meu avô pelas bonitas palavras e por todo carinho. Vocês são um exemplo de generosidade e disciplina com o qual quero aprender.

Ao meu orientador e à sua paciência infinita, Renato Castro, sou muito grata por todo apoio, orientação e motivação. Sem dúvida, você fez muita diferença na minha formação e na de muitas outras pessoas, muito obrigada.

Aos professores Éder Miguel e Fabrício Leal, muito obrigada pelo suporte e paciência nessa reta final. Ao professor Alexandre Florian, por ter me amparado em momentos difíceis e ter sido o mais dócil e atencioso no momento em que mais precisei.

Ao CNPq e ao departamento de Engenharia Florestal da UnB pelo suporte e oportunidades durante todos esses anos.

À minha maravilhosa cidade Brasília, obrigada por cada maravilhoso nascer e pôr do sol e com eles seus momentos de reflexão e serenidade.

Aos meus grandes amigos de graduação, o meu muito obrigada pelo constante aprendizado, pelas risadas e pela motivação nas horas mais difíceis. Em especial à Maísa, meu exemplo de determinação e dedicação, de inteligência e de carinho e cuidado com os outros. À Marina, grande amiga que sempre poderei contar a qualquer hora e a qualquer distância. À Juliana, obrigada pela risada gostosa do dia-a-dia. Ao Paulo F. e Paulo S., o meu muito obrigada pelo carinho de vocês, por cada risada e por cada conversa, pelo companheirismo, sou muitíssimo grata por conhecer pessoas como vocês. À Laís, Yule e Bruno pelo ano maravilhoso que passamos juntos. À Amanda e Ana pelas boas histórias de calouro. Ao meu grande amigo Vítor, obrigada por ser exatamente o que você é, meu carinho por você é imensurável. À todos os outros colegas e funcionários com os quais cruzei durante todo esse percurso na Universidade de Brasília, muito obrigada por todos esses anos. À todos vocês amigos e família, vocês são sensacionais, muito obrigada.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi ajustar e selecionar o modelo de afilamento que melhor represente o fuste com e sem casca, cerne e medula da Teca. Assim como, estimar o ganho em multiprodutos de acordo com a otimização gerada por meio da aplicação das equações de afilamento. As 32 árvores que serviram de base para este estudo foram provenientes de plantios de Teca localizados no município de Cáceres, Mato Grosso. As árvores abatidas tinham idades entre 4 e 10 anos, altura total variando entre 9,5 m e 18,0 m, diâmetro a altura do peito (1,30 m) entre 10,7 e 20,7cm. Ao todo, foram obtidos 196 discos retirados ao longo das árvores amostras, os quais foram medidos os diâmetros com e sem casca em cada seção do fuste, assim como o diâmetro do cerne e da medula, de 2 em 2 metros até o diâmetro mínimo de 4 cm. Os modelos de afilamento ajustados para comparação foram o de Damaerschalk (1972), Garcia (1993), Leite e Garcia (2001) e Schöepfer (1966). O modelo que apresentou melhor ajuste para estimar o afilamento do fuste com e sem casca foi o modelo de Schöepfer. O modelo que melhor se ajustou para estimar o afilamento do cerne e da medula foi o de Leite e Garcia (2001). O perfil da Teca foi gerado para todas as idades em análise. A porcentagem do volume de casca variou entre 4 a 5%, de alburno entre 44 a 78%, de cerne entre 11 a 42% e medula entre 8 a 12%. O sistema de otimização do corte para energia e serraria foi eficiente e os resultados indicam que o lucro aumenta exponencialmente com o aumento do diâmetro das árvores.

Palavras-chave: Teca, *taper*, energia, serraria, rendimento.

ABSTRACT

The objective of this work was to adjust and select the taper model that best represents stem with and without shell, heartwood and pitch taper of Teak seeking multiproduct optimization was the goal of this study. The data used are from Teak plantations located in the city of Cáceres, Mato Grosso – Brazil. In the total, 195 discs were obtained from 32 felled trees aged between 4 and 10 years, presenting total height ranging between 9,5 and 18,0 m, diameter at breast height (1,30 m) between 10,7 and 20,7 cm. Each section was made in 2 in 2 meters until a minimum diameter of 4 cm. In this study, it was compared four taper models, the model of Damaerschalk (1972), Garcia (1993), Leite and Garcia (2001) and Schoepfer (1966). The model that best fit to estimate taper shell and shelled was Schoepfer. The model that best fit to estimate pitch's taper and heartwood's taper was Leite & Garcia (2001). The Teak profile was generated for all ages analyzed for the quantification of volume for different parts of the stem. Peel values for 4 to 5% of sapwood were found ranging around 44% to 78%, and heartwood from 11 to 42%, pitch values ranged from 8 to 12%. The optimization system looking forward energy and sawmill was efficient and the results indicate that the gain increases exponentially with the increase of the diameter of trees.

Keywords: Teak, taper, energy, sawmill, yield.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3 REVISÃO DE LITERATURA	2
3.1 CONTEXTO DA TECA NO MUNDO	2
3.2 CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DA TECA	3
3.3 CONTEXTO DA TECA NO BRASIL	4
3.4 PRODUTIVIDADE DA TECA NO BRASIL	5
3.5 CARACTERÍSTICAS COMERCIAIS	5
3.6 FUNÇÕES DE AFILAMENTO	6
3.7 MEDULA	7
4 MATERIAL E MÉTODOS	8
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	8
4.2 MATERIAL	8
4.3 PROCEDIMENTO	9
4.4 MODELOS DE AFILAMENTO	9
4.4.1 MÉTODOS E SELEÇÃO DE AJUSTE	11
4.5 PERFIL	13
4.6 OTIMIZAÇÃO DOS MULTIPRODUTOS	13
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5.1 MODELOS DE AFILAMENTO	16
5.2 PERFIL DA ÁRVORE	21
5.3 PROPORÇÃO DE CERNE, ALBURNO E MEDULA NA MADEIRA DE TECA ..	23
5.4 OTIMIZAÇÃO	25
6 CONCLUSÕES	28
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Demonstração do procedimento de medição do diâmetro do cerne (linha verde) e da medula (linha amarela) de disco retirado no DAP.	9
Figura 2: Layout do software SigmaE. Inputs utilizados na função de otimização.	14
Figura 3: Parâmetros da otimização de produtos para serraria demonstrados no software SigmaE.	15
Figura 4: Gráficos de resíduo para o afilamento do fuste com casca (a), sem casca (b), cerne (c) e medula (d).	18
Figura 5: Perfil do fuste da Teca aos 4 anos (a) 5 anos (b) 6 anos (c) 7 anos (d) 8 anos (e) e 10 anos (f).	23
Figura 6: Porcentagem de medula, cerne, alburno e casca de <i>Tectona grandis</i> , com idades entre 4 e 10 anos, em relação a altura comercial do fuste.	24
Figura 7: Estimativa da altura mensurada, classes entre 10 cm a 22 cm, e da altura projetada, classes entre 24 cm a 40 cm.	25
Figura 8: Produtos gerados pelo software SigmaE com as devidas destinações de uso e retorno econômico para cada classe de DAP (cm).	26
Figura 9: Comparação entre o volume total (a) e volume destinado para serraria descontando a região da medula (b) para as classes de DAP de 10 a 40 cm.	26
Figura 10: Retorno econômico por árvore após a otimização por árvore em cada classe de DAP (cm), para energia (a) e para laminados (b). Em que as barras pretas representam o intervalo mensurado e as barras cinzas o intervalo projetado.	27
Figura 11: Retorno econômico total após a otimização por árvore em cada classe de DAP. Produtos laminados são representados pelas barras cinzas e a energia é representada pelas barras vermelhas.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características comerciais dos produtos de madeira de Teca serrada bruta. .	14
Tabela 2: Equações geradas para os 4 modelos ajustados para fuste com casca (Ycc e dcc), fuste sem casca (Ysc e dsc), cerne (Ycer e dcer) e medula (Ymed e dmed).	16
Tabela 3: Modelos com seus respectivos ajustes de precisão para cada um dos 4 casos analisados.	17

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui potencial para se consolidar mundialmente como fornecedor de produtos florestais. No entanto, as indústrias nacionais esbarram em inúmeras barreiras, tais como licenciamento ambiental burocrático, insegurança jurídica, tributação excessiva, infraestrutura deficitária. Há dificuldade em manter-se competitiva e diversificada, dessa maneira, o setor florestal brasileiro precisa de técnicas a fim de otimizar a produção de produtos madeireiros (BAUMANN, 2010).

A Teca, *Tectona grandis* L.f., é uma espécie que apresenta crescente importância econômica no Brasil. Natural do Sudeste Asiático, nativa de florestas tropicais índicas e asiáticas, se adaptou em climas com temperaturas médias de 24°C. A madeira de Teca apresenta alta adaptabilidade, além de resistência a fogo, pragas e doenças. A Teca é empregada em reflorestamento em várias partes do mundo pertencentes aos trópicos, e principalmente em seus países de origem (FIGUEIREDO, 2001).

A madeira da Teca é classificada como madeira nobre. Atualmente sendo uma das madeiras tropicais mais valiosas do mundo devido sua excelente qualidade e beleza, além de muito valorizada pela sua resistência e durabilidade. A principal destinação são produtos para serraria e construção naval, mas também, devido a beleza peculiar da madeira, é destinada para decoração e mobiliários de alto padrão (FIGUEIREDO, 2005).

As boas condições de crescimento em algumas regiões do país geram ciclos cada vez menores devido ao crescimento rápido e aos bons tratamentos silviculturais. A madeira jovem de Teca atinge as dimensões comerciais exigidas porém, maior quantidade de madeira juvenil também é gerada, conseqüentemente aumenta-se a possibilidade de que a madeira tenha qualidade inferior, devido a inferiores propriedades mecânicas, em relação à madeira adulta (FLOREZ, 2012).

A Teca encontra-se entre as cinco espécies que mais recebem investimentos em melhorias genéticas e silviculturais devido aos altos preços de venda, e aos altos valores de volume colhidos (FAO, 2011).

A fim de definir e aprimorar os potenciais sortimentos de uma árvore, é necessário saber seu afilamento. Tais funções são dinâmicas, pois possibilitam a estimativa do diâmetro a diferentes alturas e, a altura a qualquer diâmetro especificado, além de serem utilizados para definir os sortimentos e estudar a evolução da forma da árvore ao longo de sua vida.

Além de estimar o perfil do fuste da árvore, os modelos de afilamento podem ser ajustados com o objetivo de estimar o perfil do cerne, parte mais nobre da madeira, e também, o perfil da medula. Conhecendo-se o perfil de afilamento do fuste, do cerne e da medula, as peças podem ser determinadas de acordo com o limite do cerne, e excluindo a medula, aumenta-se a produtividade, devido a diminuição de perdas com material de má qualidade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Modelar o perfil do fuste com e sem casca, cerne e medula da árvore de Teca, objetivando otimização dos subprodutos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Otimizar o retorno financeiro com o corte das árvores de Teca para dois usos: madeira para energia e para serraria.
- Simular o retorno financeiro para árvores de maiores dimensões, que podem ser obtidas em florestas manejadas e em idades superiores.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CONTEXTO DA TECA NO MUNDO

O cultivo de *Tectona grandis* L.f. (Teca) começou a ganhar importância no século 18, quando os britânicos demandavam grande quantidade dessa madeira para construir as embarcações, devido a sua resistência a exposição ao sol, calor, frio, e à água de chuvas e do mar (FIGUEIREDO, 2001).

As florestas naturais de Teca ocorrem em apenas poucos países do mundo, entre eles encontram-se a Índia, Laos, Birmânia e Tailândia. Dentre esses quatro países somente na Birmânia em que a exploração de florestas naturais de Teca é legalizada. A proibição ocorrida na Tailândia desde 1989 pode ter contribuído para a recuperação das florestas naturais de Teca que aumentaram em 2,9 milhões de hectares (FAO, 2006).

Essa espécie florestal é amplamente plantada em países como Mianmar, Índia, Vietnã, Indonésia e Malásia. A rotação mínima adotada é de 18 anos e a máxima atinge os 80 anos. A Ásia representa mais de 90% dos recursos de Teca do mundo e a Índia administra 38% das florestas plantadas, sendo também a principal importadora dessa madeira. Os principais fornecedores de Teca, tendo já citado a Índia, são a Birmânia e a Indonésia, no entanto o mercado é limitado pela oferta (FAO, 2011).

Segundo o relatório emitido pela FAO (2013), *Mercado de Teca*, a área plantada dessa espécie tem aumentado na Ásia, em países da África, tais como Benin, Gana, Nigéria e Tanzânia, em países da América Central, tais como Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Nicarágua e Panamá e, em países da América do Sul tais como Brasil e Equador.

A demanda mundial pela madeira da Teca gira em torno do comércio de madeiras ou toras de excepcional qualidade e as madeiras de Teca de qualidade inferior apresentam nítidas dificuldades de comercialização, pois, a maioria absoluta dos importadores exige madeira sem nenhum alburno. Isso somente é possível em povoamentos mais maduros, portanto, os preços mais altos praticados a partir dos 20 anos de idade não estão somente vinculados ao diâmetro das toras comercializadas, mas também ao menor percentual de madeira juvenil e peças livre de nós (FIGUEIREDO et al., 2005).

3.2 CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DA TECA

A Teca, *Tectona grandis* L.f, da família Lamiaceae, antes incluída em Verbanaceae, é uma espécie exótica, natural do Sudeste Asiático, nativa de florestas tropicais índicas e asiáticas.

Segundo Weaver (1993) apud Floréz (2012), a distribuição natural da Teca compreende a região entre as latitudes 10°N a 23°N no sudeste da Ásia, porém plantações bem sucedidas se estendem desde os 28°N até aos 18°S, compreendendo o sudeste da Ásia, Austrália, África e América latina.

A Teca é considerada uma planta de fácil cultivo e é pouco sujeita a pragas e doenças. Demanda solos profundos, bem drenados e com razoável fertilidade, tolerando aqueles com textura variando de barro-arenosa a franco-argilosa (KIEHL, 1979 apud FIGUEIREDO, 2001). A Teca é uma espécie que não tolera sombra em nenhuma fase do seu ciclo vital. Tolerar condições de solo bem extremas sempre que existir uma drenagem

adequada. Plantios de Teca em solos de tipo argiloso ou mal drenados não obtiveram sucesso (FLOREZ, 2012).

Condições tropicais moderadamente úmidas e quentes são preferíveis para alta produtividade, com precipitações entre 1.300 e 2.500 mm.ano⁻¹, estação seca de 3 a 5 meses, assim como temperatura variando entre 13°C e 43°C (FIGUEIREDO, 2005).

Em ambientes naturais, a Teca apresenta tronco retilíneo, com dimensões e formas variadas, é revestido por casca espessa, possui albúrnio estreito e claro, bem distinto do cerne, cuja cor é marrom viva e brilhante (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Rocha et al. (2011), uma das principais limitações para a produção de mudas de Teca é a germinação lenta e irregular das sementes inseridas em fruto de endocarpo e mesocarpo duros e de alta resistência. A germinação em campo apresenta taxa relativamente baixa de 25 a 35%, além de ser desuniforme.

3.3 CONTEXTO DA TECA NO BRASIL

As florestas plantadas com espécies exóticas surgiram no Brasil há mais de um século, e em meados da década de 70, com as políticas de incentivos fiscais para o reflorestamento, principalmente povoamentos equiâneos de *Eucalyptus* e *Pinus* se tornaram uma alternativa viável para o suprimento da demanda por matéria prima e derivados florestais. No entanto, em 1971, a Serraria Cáceres S.A. iniciou o plantio de Teca em Mato Grosso no município de Cáceres (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo o anuário estatístico da ABRAF (2012), a área ocupada por plantios florestais de espécies não convencionais como Acácia, Araucária, Pópulus, Teca, Seringueira e Paricá é de 521 mil hectares, representando 7.2% da área total de plantios florestais no Brasil.

As áreas de plantio da Teca são predominantemente em Mato Grosso, Pará, Acre, Amazonas e Roraima, somando 67.329 hectares (ABRAF, 2013), representando pouco menos de 1% das plantações florestais no Brasil. No entanto, apresentou um crescimento de 11,2% desde 2008 quando os plantios eram de aproximadamente 59 mil hectares.

Segundo Figueiredo (2001), a rusticidade, a resistência a incêndios florestais e, principalmente, a qualidade da madeira, são fatores que tem estimulado seu emprego na Amazônia. Em regiões aptas, a expectativa é obter uma rotação da Teca por volta dos 25 anos.

3.4 PRODUTIVIDADE DA TECA NO BRASIL

As condições climáticas adequadas para o pleno desenvolvimento da Teca no Brasil proporcionam taxas de crescimento superiores às dos plantios da maioria dos países produtores dessa madeira, obtendo madeira de dimensões comerciais em ciclos de 20 a 25 anos, os quais estimulam a implantação de plantios comerciais da espécie no país (FLORÉZ, 2012).

Na região do Mato Grosso, que reúne condições edafoclimáticas adequadas ao reflorestamento com Teca, obtém como incremento médio anual (IMA), entre 20 e 25 anos, aproximadamente $15 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, em termos de produção líquida para povoamentos desbastados aos 5, 10 e 15 anos (FAVALESSA et al., 2012).

Assim como, Angeli (2003) demonstrou que em condições adequadas ao cultivo (qualidade da semente, solo e clima), a produtividade total de um hectare de Teca pode variar de 250 a 350 m^3 em um regime de quatro desbastes, ao final de 25 anos, sendo que 50 a 60% da produção total é colhida no corte final.

3.5 CARACTERÍSTICAS COMERCIAIS

A Teca tem sido reconhecida como uma madeira de alta qualidade, devido a suas excelentes propriedades, tornando-a uma das madeiras mais valiosas do mundo junto a espécies como o Cedro e o Mogno. Essas propriedades, particularmente para o cerne, incluem a combinação de força com leveza, durabilidade, estabilidade dimensional, facilidade de trabalhar com ferramentas e acabamento, resistência a cupim, fungos, umidade, corrosão, além possuir elevado grau de beleza e estética (FLORÉZ, 2012).

As propriedades físico-mecânicas da madeira de Teca caracterizam-se pela facilidade de secagem e estabilidade dimensional, permitindo que a madeira resista a variação de umidade no ambiente. A densidade básica da madeira de Teca varia de 0,55 a $0,68 \text{ g.cm}^{-3}$ (FIGUEIREDO, 2001). Apesar de ser moderadamente pesada, apresenta boa resistência a carga, tração e flexão, semelhante à de *Swietenia macrophylla* (Mogno), além de ultrapassar o preço da madeira de Mogno no mercado internacional (Lima et al., 2011).

As atividades de pesquisa e desenvolvimento em prol do melhoramento genético e da otimização do manejo florestal trabalham com a finalidade de aumentar o incremento médio anual (IMA) dos plantios florestais. Dentre estes, encontra-se a Teca que atingiu

um crescimento de $15,0 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em 2012 (ABRAF, 2013), apresentando um aumento de 5.3% em relação a 2010. O valor máximo de IMA para a Teca ocorre a uma idade entre os 7 e 12 anos (LADRACH, 2009).

Altas densidades no povoamento florestal de Teca podem afetar o crescimento em diâmetro, em altura e em produtividade (CALDEIRA e OLIVEIRA, 2008). Caldeira e Oliveira (2008) sugerem que o primeiro desbaste seja efetuado dos três aos seis anos de idade, dependendo da qualidade do sítio, retirando 30% da floresta. Os espaçamentos mais comumente utilizados nos plantios de Teca no Brasil são de 2m x 2,5 m, 2.000 plantas.ha⁻¹, 3m x 2m, 1.667 plantas.ha⁻¹ e de 3m x 3m, 1.111 plantas.ha⁻¹ (FIGUEIREDO, 2005 apud FLORÉZ, 2012).

Em relação a produção de madeira em tora, o mercado nacional produz em média 271,5 milhões de $\text{m}^3\text{ano}^{-1}$, considerando a atual área total de plantios florestais e o incremento médio anual (IMA) para cada região. A produção de madeira em tora de Teca representa apenas 0,4% do total da produção, os responsáveis pelo restante da produção são *Pinus* (23,1%) e *Eucalyptus* (76,5%) (ABRAF, 2013).

3.6 FUNÇÕES DE AFILAMENTO

A indústria de transformação madeireira tem experimentado grandes avanços no recebimento da matéria prima básica, no que diz respeito às corretas dimensões das toras a serem transformadas em multiprodutos adequados aos diversos usos da madeira.

Segundo Campos e Leite (2013) função de afilamento, também chamadas de funções de forma ou ainda funções “*taper*”, é o termo aplicado ao decréscimo do diâmetro ao longo do fuste, considerando a árvore um sólido de revolução. As funções ou equações de afilamento são capazes de estimar diretamente o diâmetro em qualquer altura do fuste, ou a altura em um diâmetro dado.

Dentre essas funções, existem dois tipos básicos, sendo os modelos não segmentados, ou simples, e os modelos segmentados. Nos modelos não segmentados uma única função representa a forma do fuste desde a base até o ápice. Podem ser citados os modelos de Kozak (1969), de Demaerchalk (1972), de Ormerod (1975), Garay (1979), Schöepfer (1966) e Leite e Garcia (2001). A desvantagem dos modelos não segmentados é que podem vir a apresentar erros de tendência na estimação do diâmetro em alguma porção do fuste.

Os modelos segmentados constituem uma variação de modelos polinomiais ajustados por seções do fuste, tornando-os mais difíceis e complexos, podendo ser citado o modelo de Max e Burkhart (1976). A vantagem desses modelos é que diminui a tendência nas estimações do diâmetro ao longo do fuste (CAMPOS e LEITE, 2013).

No entanto, uma mesma equação de afilamento pode resultar em estimativas precisas para diâmetro e ao ser aplicada para estimar alturas comerciais resultar em viés, isso pode ocorrer pois os coeficientes da equação de afilamento são obtidos minimizando erros que estão relacionados com o diâmetro e não com a altura (CAMPOS e LEITE, 2013).

A obtenção dos volumes associados às equações de afilamento é a forma mais atual de determinar os volumes compatíveis com as diversas formas apresentadas ao longo das árvores e seu total aproveitamento para os diversos subprodutos (FAVELESSA et al., 2012).

3.7 MEDULA

A medula é a parte central da árvore e caracteriza a região inicial do crescimento vertical da árvore (tecido primário ou meristemático), também chamada de madeira juvenil, sendo o xilema secundário formado durante a fase jovem do cambio vascular da árvore, é uma região muito susceptível ao ataque de microrganismos xilófagos (COSTA, 2001).

O estudo realizado por Amodei et al. (2010), referente a avaliação da qualidade de madeira de Teca através de tomografia de impulso, mostrou que as porções próximas ao centro apresentam baixos valores de velocidade de onda, o que se pode inferir que a região próxima à medula é constituída de lenho juvenil, caracterizado por apresentar propriedade físico-mecânicas indesejáveis, como baixa densidade e conseqüentemente baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas.

A madeira juvenil diferencia-se da madeira adulta de maneira geral por apresentar menor densidade, elementos celulares mais curtos, maior ângulo microfibrilar, maior proporção de lenho de reação, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e hemicelulose e menor resistência em relação a madeira adulta (BENDTSEN, 1978; SENFT; BENDTSEN; GALLIGAN, 1986; ZOBEL, 1984 apud FLORÉZ, 2012).

Uma das causas de empenamentos, formação de fendas circulares entre os anéis de crescimento, formato assimétrico e assim como um processamento mecânico problemático, é a presença de medula excêntrica. O deslocamento da medula também pode interferir no desdobro pela desuniformidade na liberação das tensões, forçando a serra e descalibrando a espessura das peças (LIMA et al., 2007; FERREIRA et al., 2004).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados utilizados nesse estudo são provenientes de plantios de Teca localizados no município de Cáceres, na região sudoeste do Mato Grosso, região Centro Oeste do Brasil.

A área foi originalmente coberta por Savana arborizada, a qual pertence a sub bacia do alto do Rio Paraguai, Bacia do Rio da Prata na Planície do Pantanal. A altitude é de 118 m. A média anual de temperatura é de 24,86°C, variando de 21,56°C em julho a 27,09°C em novembro (SOUZA et al., 2013).

A região apresenta duas estações bem definidas, a seca de maio a setembro, e a estação chuvosa de outubro a abril. As menores médias mensais de precipitação ocorrem entre os meses de junho e agosto, com média de 17,5 mm por mês, e as maiores ocorrem entre os meses de dezembro a fevereiro com média de 202,3 mm por mês. A precipitação total anual é de 1.202,22 mm (SOUZA et al., 2013).

O tipo climático, segundo Koppen, é Aw', devido ao clima de savana tropical com verão úmido e inverno seco. É classificado no grupo A, pois apresenta o tipo de clima tropical, pois além de apresentar a temperatura média do mês mais frio superior a 18°C, apresenta também a precipitação anual superior a evapotranspiração anual. O indicador do tipo climático é w' pois apresenta chuvas de verão-outono (FENNER et al., 2014).

4.2 MATERIAL

Os dados vieram de um povoamento de 154 hectares, subdividido em 6 talhões e 28 parcelas, espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m. Foram cubadas 32 árvores com idade entre 4 e 10 anos, altura total (Ht) variando entre 9,5 m e 18,0 m, diâmetro a 1,30 m de altura (DAP) entre 10,7 e 20,7 cm.

Foram amostrados 196 discos em 32 árvores e medidos os diâmetros com e sem casca em cada disco, assim como o diâmetro do cerne e da medula. A primeira seção medida foi a base com 30 cm de altura, e em seguida a 1,3 m, 3,3 m, 5,3 m, 7,3 m, 9,3 m, 11,3 m e o máximo de 13,3 m, sendo a máxima posição a seção que apresentava o diâmetro mínimo com casca próximo a 4,0 cm.

4.3 PROCEDIMENTO

Em cada um dos 196 discos, foi obtida a média dos diâmetros nas diferentes alturas por meio do *software Measure Schmeasure 1.0* o método utilizado para realizar as medidas é demonstrado na Figura 1.

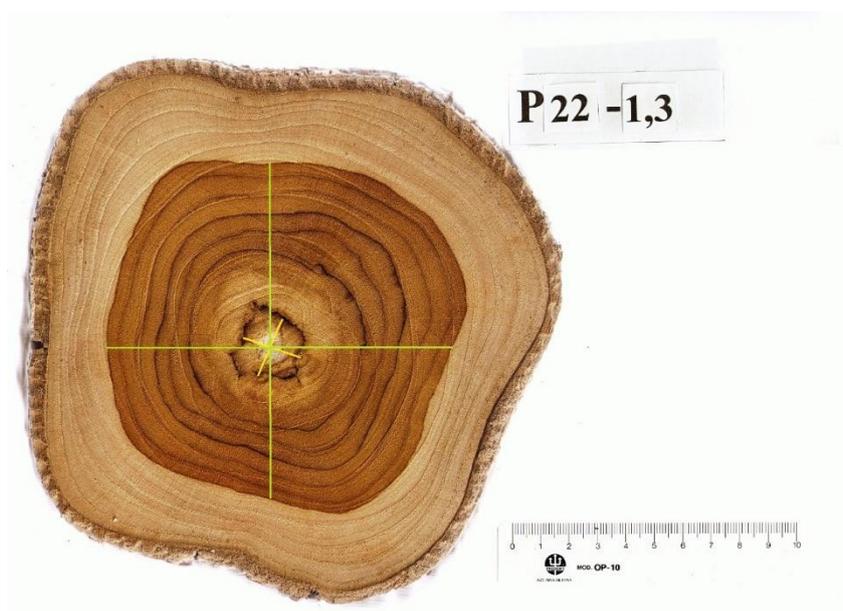


Figura 1: Demonstração do procedimento de medição do diâmetro do cerne (linha verde) e da medula (linha amarela) de disco retirado no DAP.

4.4 MODELOS DE AFILAMENTO

Os modelos de afilamento são caracterizados por ajuste de regressão entre a relação de diâmetros ao longo do fuste (d_i) e o DAP, e a relação de alturas em qualquer sessão da árvore (h_i) em função da altura total (H_t). A variável dependente é dada pela razão entre os diâmetros e o diâmetro medido a 1,30 m do solo (d_i/DAP). As variáveis independentes são expressas por razões de alturas comerciais e altura total (h_i/H_t).

Os modelos de afilamento ajustados foram os modelos de Damaerschalk (1972), Garcia (1993), Leite e Garcia (2001) e Schöepfer (1966). As funções empregadas para Y

(d_i^2/dap^2) são apresentadas abaixo, bem como a transformação da função para o cálculo de d_i :

Damaerschalk (1972) – Modelo 1

$$Y_i = 10^{2\beta_0} dap^{(2\beta_1-2)} Ht - h^{2\beta_2} Ht^{2\beta_3} + \varepsilon$$

$$d_i = \left(\sqrt{10^{2\beta_0} dap^{(2\beta_1-2)} Ht - h_i^{2\beta_2} Ht^{2\beta_3}} \right) * dap$$

Em que: $Y_i = d_i^2/dap^2$, sendo $i = a$ i -ésima relação calculada com o diâmetro com casca, sem casca, cerne ou medula; d_i = diâmetro na altura h_i (cm); DAP = diâmetro tomado na altura do peito a 1,30 m; Ht = altura total da árvore (m); h_i = altura ao longo do fuste da árvore (m) nas quais foram medidos os diâmetros d_i ; β_i = parâmetros a serem estimados, com $i = 0, 1, 2$ e 3 ; ε = erro aleatório, sendo $\varepsilon = N(0, \theta^2)$.

Garcia (1993) – Modelo 2

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{\frac{h}{Ht}} + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht}\right) + \varepsilon$$

$$d_i = \left(\sqrt{\beta_0 + \beta_1 \sqrt{\frac{h_i}{Ht}} + \beta_2 \left(\frac{h_i}{Ht}\right)} \right) * dap$$

Em que: $Y_i = d_i^2/dap^2$, sendo $i = a$ i -ésima relação calculada com o diâmetro com casca, sem casca, cerne ou medula; d_i = diâmetro na altura h_i (cm); DAP = diâmetro tomado na altura do peito, 1,30 m; Ht = altura total da árvore (m); h_i = altura ao longo do fuste da árvore (m) nas quais foram medidos os diâmetros d_i ; β_i = parâmetros a serem estimados, com $i = 0, 1$ e 2 ; ε = erro aleatório, sendo $\varepsilon = N(0, \theta^2)$.

Leite e Garcia (2001) – Modelo 3

$$Y_i = 10^{2b_0} dap^{(2b_1-2)} Ht^{2b_2} Ht - h^{2b_3} e^{(b_4 * \frac{Tx}{dap})} + \varepsilon$$

$$d_i = \left(\sqrt{10^{2b_0} dap^{(2b_1-2)} Ht^{2b_2} Ht - h_i^{2b_3} e^{(b_4 * \frac{Tx}{dap})}} \right) * dap$$

Em que: $Y_i = d_i^2/dap^2$, sendo $i = a$ i -ésima relação calculada com o diâmetro com casca, sem casca, cerne ou medula; d_i = diâmetro equivalente a altura h_i (cm); DAP = diâmetro tomado na altura do peito - 1,30 m; Ht = altura total da árvore (m); h_i = altura ao longo do fuste da árvore

(m) nas quais foram medidos os diâmetros d_i ; β_i = parâmetros a serem estimados, com $i = 0, 1, 2, 3$ e 4 ; ε = erro aleatório, sendo $\varepsilon = N(0, \theta^2)$.

A variável binária T_x foi utilizada de acordo com Leite et al. (2011), a fim de garantir maior consistência na estimação dos diâmetros, em que:

$T_x = 0$ para diâmetros do cerne;

$T_x = 1$ para diâmetro da medula.

Polinômio de Quinto Grau (Schöepfer, 1966) - Modelo 4

$$d_i = [\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{H_t}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon] * dap$$

Em que: d_i = diâmetro na altura h_i (cm); DAP = diâmetro tomado na altura do peito, 1,30 m; H_t = altura total da árvore (m); h_i = altura ao longo do fuste da árvore (m) nas quais foram medidos os diâmetros d_i ; β_i = parâmetros a serem estimados, com $i = 0, 1, 2, 3, 4$ e 5 ; ε = erro aleatório, sendo $\varepsilon = N(0, \theta^2)$.

4.4.1 MÉTODOS E SELEÇÃO DE AJUSTE

Todos as equações geradas de acordo com os respectivos modelos de afilamento foram ajustados pelo método de estimação de Levenberg-Marquardt por meio do *software* Statistica 7.0, para os modelos não lineares, e do Microsoft Excel, para os modelos lineares, pelo método dos mínimos quadrados ordinários. Em ambos os casos foi estabelecido nível de confiança de 95%.

A qualidade dos ajustes foi avaliada conforme Draper e Smith (1966):

- Análise gráfica de dispersão dos resíduos (%): Mesmo que as estimativas de ajuste de precisão estejam apresentando valores aceitáveis, a dispersão dos pontos ao longo do eixo da variável independente indica de forma clara se o ajuste subestima ou superestima a variável dependente. Consiste em estudar o comportamento do modelo usando o conjunto de dados observados. A equação para a obtenção do resíduo é a seguinte:

$$\text{Resíduo em \%} = \frac{y_{obs} - y_{est}}{y_{obs}} * 100$$

Em que: Y_{obs} são os valores reais observados e Y_{est} são os valores estimados.

- Erro padrão da estimativa (S_{y_x}) e Erro Padrão da Estimativa em Porcentagem ($S_{y_x}\%$): Indicam a precisão do ajuste do modelo matemático e somente deve ser utilizado

como comparador quando as variáveis dependentes apresentarem mesma unidade de medida. Quanto menor for o erro padrão da estimativa melhor são as estimativas obtidas na equação.

$$S_{yx} = \sqrt{QM_{res.}}$$

$$S_{yx}\% = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} * 100$$

Em que: QMres. = quadrado médio do resíduo, obtido na análise de variância; \bar{y} = média aritmética da variável dependente.

- R^2 ajustado ($R^2_{aj.}$): Utilizado devido a necessidade de comparar equações com diferentes números de coeficientes. Quantifica o quanto da variação de y pôde ser explicada pelo uso das variáveis x, ponderados pelo número de amostras (diretamente proporcional) e número de variáveis independentes (inversamente proporcional). Quanto mais próximo de 1, mais os valores de y poderão ser explicados pela variável independente x. É representado da seguinte forma:

$$R^2_{aj.} = 1 - \left[\left(\frac{S.Q.res}{S.Q.total} \right) * \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \right]$$

Em que: S.Q. res = $\sum(y_{obs} - y_{est})^2$ - soma do quadrado dos resíduos; S.Q.total = $\sum(y_{obs} - \bar{y}_{obs})^2$ - soma dos quadrados totais

Além dos indicadores citados acima, também foi levado em consideração os valores gerados para o coeficiente de correlação de Pearson:

- Coeficiente de Correlação de Pearson (r): É uma medida de associação linear entre variáveis. Os valores de r variam sempre entre -1 e +1, sendo que r = 0 corresponde à não associação linear. A correlação é positiva quando r > 0, e será negativa quando r < 0. Quanto mais próximo do módulo de 1 for o r mais forte será a associação entre duas variáveis

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - X}{S_x} \right) * \left(\frac{y_i - Y}{S_y} \right)$$

Em que: Sx é o desvio padrão da variável x; Sy representa o desvio padrão da variável y. X e Y representam a média dos diâmetros (di), observados e estimados pelos modelos, respectivamente.

Por meio desses índices, o melhor modelo é aquele que apresentar menor erro padrão da estimativa relativo ($S_{yx}\%$), maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}), não apresentar tendência dos resíduos verificados na análise gráfica e apresentar maiores valores para o coeficiente de correlação (r).

4.5 PERFIL

Para cada idade, foram calculados os DAP's e alturas médias e, estimados os valores de diâmetro ao longo do fuste com e sem casca, de cerne e de medula de acordo com as funções selecionadas para cada parte. Deste modo, foi possível relacionar o diâmetro estimado e a altura por idade, e gerar um gráfico representativo do perfil médio para cada uma.

4.6 OTIMIZAÇÃO DOS MULTIPRODUTOS

Para realizar a otimização do lucro com o corte da madeira de Teca, foi utilizado o *software* SigmaE 2.0. O *software* utiliza como camada de entrada as alturas médias das árvores e as classes de DAP (Figura 2), além da equação de afilamento ajustada.

As árvores mensuradas possuem DAP entre 10,7 cm e 21,4 cm, altura total entre 9,5 m e 18,1 m, e as idades entre 4 e 10 anos. As árvores utilizadas em serraria, as quais desenvolveram cerne suficiente para gerar produtos como o laminado, devem ter dimensões maiores, atingidas com no mínimo 20 a 30 anos em florestas plantadas no Brasil. Dessa maneira, foi estimada a altura e o volume das árvores para as classes de DAP reais do banco de dados, entre 10 cm e 22 cm, e feita uma projeção para as classes de 24 cm a 40 cm, as quais possuem os parâmetros indicados para serraria.

Para estimar as alturas das classes projetadas (24 a 40 cm) foi ajustado o modelo hipsométrico de Curtis:

$$Ht = \exp(\beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{DAP} + \varepsilon)$$

Em que: Ht representa a altura total da árvore em metros; DAP é o diâmetro a altura do peito a 1,30m do solo; β_i são os parâmetros do modelo e, ε é o erro associado ao modelo.

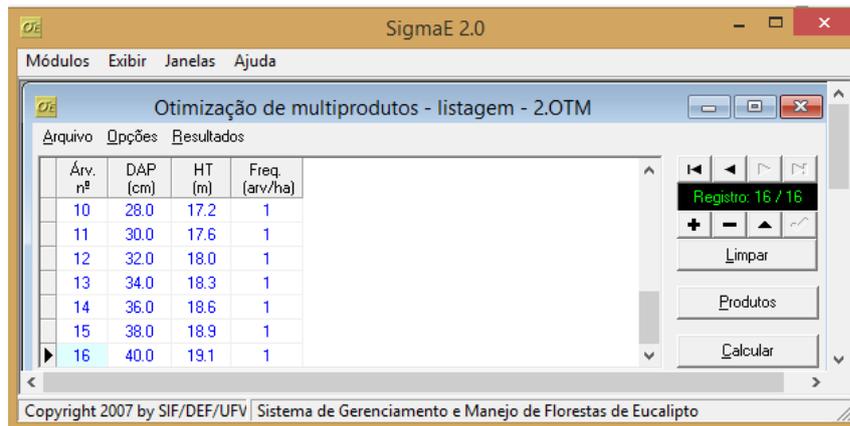


Figura 2: Layout do software SigmaE. Inputs utilizados na função de otimização.

SORTIMENTOS

Os subprodutos de madeira de Teca serrada bruta e as correspondentes dimensões e preços foram adquiridos de uma madeireira do Mato Grosso no ano de 2013. As dimensões utilizadas são apresentadas na Tabela 1 e o modo como esses dados são inseridos no *software* é demonstrado na Figura 3.

Tabela 1: Características comerciais dos produtos de madeira de Teca serrada bruta.

Dimensões (mm x mmx mm)	Preço/m ³ (R\$)
10 x 50 x 2400	1,44
25 x 50 x 2400	3,60
25 x 100 x 2400	7,20
25 x 200 x 2400	16,20
40 x 150 x 2400	17,28
50 x 60 x 2400	12,96
60 x 120 x 2400	31,10
60 x 160 x 2400	41,46



Figura 3: Parâmetros da otimização de produtos para serraria demonstrados no software SigmaE.

O material que não possui as dimensões desejadas para produzir os produtos da serraria é direcionado para produzir energia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODELOS DE AFILAMENTO

Os modelos ajustados com os respectivos parâmetros gerados são apresentados na Tabela 3, para os perfis do fuste com casca, sem casca, cerne e medula.

Tabela 2: Equações geradas para os 4 modelos ajustados para fuste com casca (Ycc e dcc), fuste sem casca (Ysc e dsc), cerne (Ycer e dcer) e medula (Ymed e dmed).

Modelo	Modelos ajustados
FUSTE COM CASCA	
Modelo 1	$Y_{cc}=10^{2*0,17717} * dap^{2*0,78348-2} *(Ht-h)^{2*1,08486} *Ht^{2*(-0,93580)}$
Modelo 2	$Y_{cc}= 1,91332 - 2,92592 * \sqrt{h/Ht} + 1,03005*(h/Ht)$
Modelo 3	$Y_{cc} = 10^{2*0,17717}*dap^{2*0,78347-2}*Ht^{2*-0,93580}*(Ht-h)^{2*1,08486}*Euler^{0,1*(0/dap)}$
Modelo 4	$dcc/dap = 1,3394-5,0635*(h/Ht)+22,1333*(h/Ht)^2-51,7706*(h/Ht)^3+54,9651*(h/Ht)^4-21,893*(h/Ht)^5$
FUSTE SEM CASCA	
Modelo 1	$Y_{sc}=10^{2*0,09114}*dap^{(2*0,78848-2)}*(Ht-h)^{2*1,07768}*Ht^{2*-0,88050}$
Modelo 2	$Y_{sc}= 1,68632-2,52769*\sqrt{h/Ht} + 0,84350*(h/Ht)$
Modelo 3	$Y_{sc} = 10^{(2*0,213)}*dap^{(2*0,71135)-2}*Ht^{2*(-0,87797)}*(Ht-h)^{(2*b3)}*Euler^{(-2,31136*(1/dap))}$
Modelo 4	$dsc/dap = 1,25828 - 4,67198*(h/Ht)+20,35278*(h/Ht)^2-47,5277*(h/Ht)^3+50,1581*(h/Ht)^4-19,81096*(h/Ht)^5$
CERNE	
Modelo 1	$Y_{cer}=10^{2*(-1,39412)}*dap^{2*1,51541-2}*(Ht-h)^{2*1,86492}*Ht^{2*(-1,34301)}$
Modelo 2	$Y_{cer}= 0,60133-1,20768*\sqrt{h/Ht} + 0,58765*(h/Ht)$
Modelo 3	$Y_{cer}=10^{2*2,04}*dap^{2*(-0,593)-2} *Ht^{2*(-1,305)}*(Ht-h)^{2*1,86363}*Euler^{-67,952*(1/dap)}$
Modelo 4	$dcerne/dap = 0,72072 - 3,8967*(h/Ht)+21,98166*(h/Ht)^2 -66,16573*(h/Ht)^3+84,95173*(h/Ht)^4 -38,40719*(h/Ht)^5$
MEDULA	
Modelo 1	$Y_{med}=10^{2*0,11039}*dap^{(2*0,19600)-2} *(Ht-h)^{2*0,03001} *Ht^{2*(-0,14371)}$
Modelo 2	$Y_{med}= 0,00033+0,05290*\sqrt{h/Ht}- 0,05208 *(h/Ht)$
Modelo 3	$Y_{med} = 10^{2*2,357}*dap^{(2*(-1,192)-2)}*Ht^{2*(-0,1640)}*(Ht-h)^{(2*0,03233)}*Euler^{-40,3798*(1/dap)}$
Modelo 4	$dmed/dap = 0,05868+0,86469*(h/Ht)+(-4,39340)*(h/Ht)^2+9,76088*(h/Ht)^3 -10,25862*(h/Ht)^4+4,11022*(h/Ht)^5$

Os testes estatísticos de ajuste e precisão são apresentados na Tabela 4

Tabela 3: Modelos com seus respectivos ajustes de precisão para cada um dos 4 casos analisados.

	Modelo	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Fuste com casca	R² ajustado	0,959	0,944	0,959	0,960
	Syx absoluto	1,303	1,090	1,307	0,978
	Syx relativo	10,157	8,497	10,184	7,621
	r	0,959	0,971	0,959	0,980
Fuste sem casca	R² ajustado	0,960	0,947	0,960	0,961
	Syx absoluto	1,191	1,025	1,392	0,926
	Syx relativo	9,841	8,470	11,506	7,651
	r	0,961	0,972	0,96	0,98
Cerne	R² ajustado	0,918	0,692	0,921	0,756
	Syx absoluto	1,789	2,173	1,779	2,134
	Syx relativo	22,825	27,720	22,691	27,227
	r	0,918	0,833	0,921	0,872
Medula	R² ajustado	0,571	0,143	0,577	0,182
	Syx absoluto	0,415	0,475	0,413	0,454
	Syx relativo	26,296	30,048	26,155	28,725
	r	0,570	0,389	0,576	0,450

A Figura 4 apresenta a análise gráfica dos resíduos de cada uma das equações para cada caso.

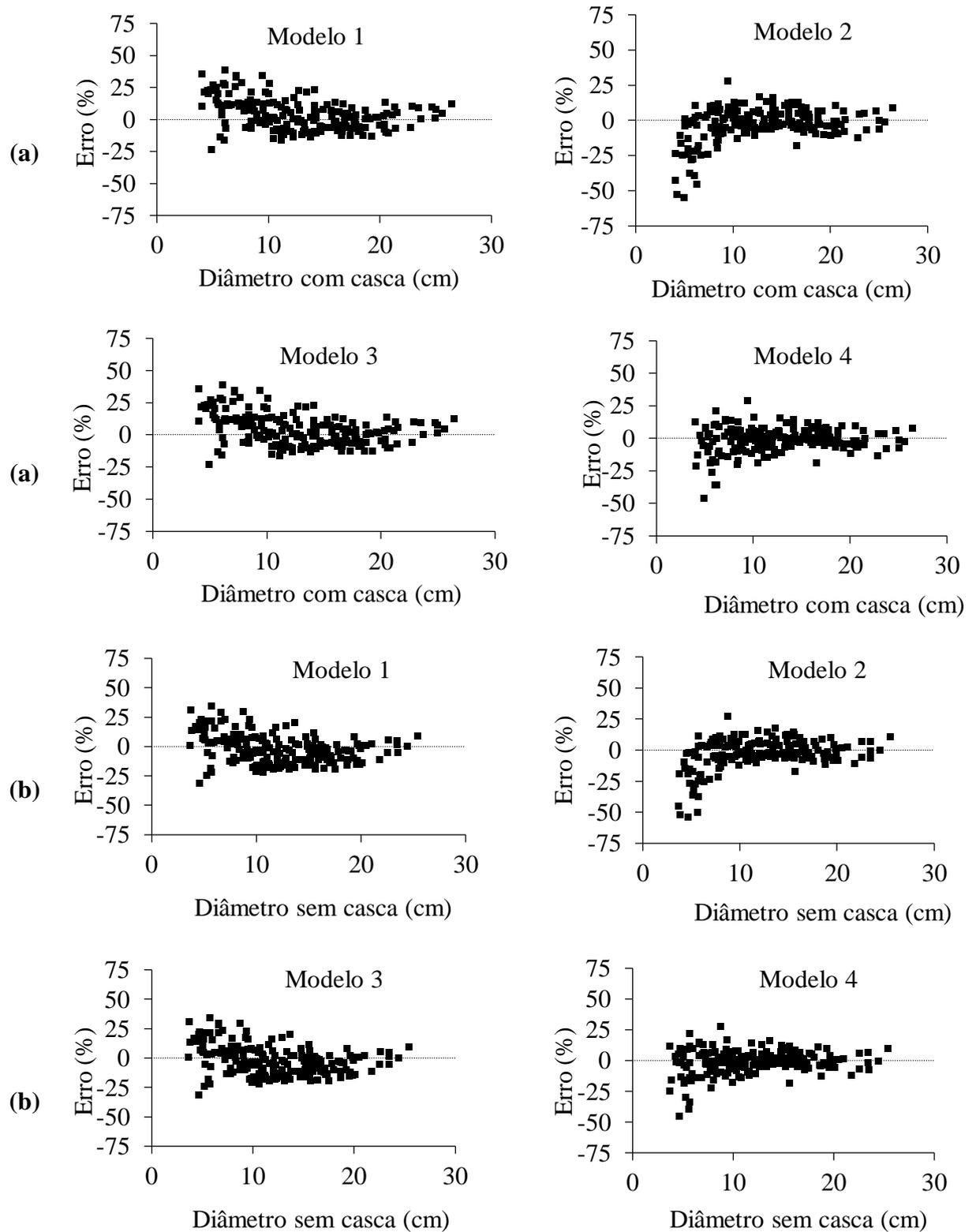


Figura 4: Gráficos de resíduo para o afilamento do fuste com casca (a), sem casca (b), cerne (c) e medula (d).

Continua...

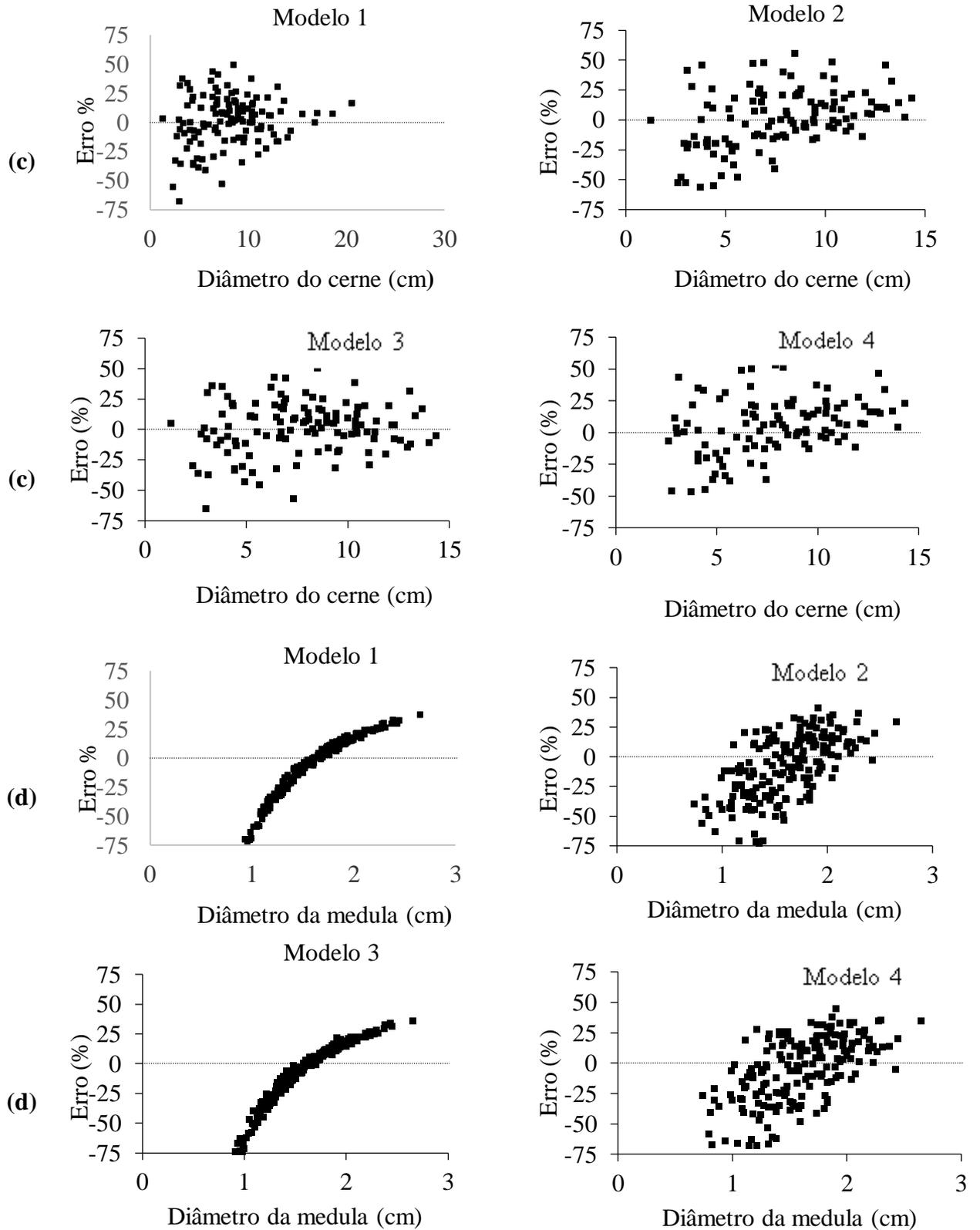


Figura 4. Gráficos de resíduo para o afilamento do fuste com casca (a), sem casca (b), cerne (c) e medula (d).

AFILAMENTO DO FUSTE COM CASCA E SEM CASCA:

Os modelos apresentaram distribuição relativamente homogênea sem tendência ao longo do eixo correspondente ao resíduo zero para o afilamento do fuste sem casca e com casca. No entanto, os modelos 1 e 3 superestimaram valores baixos para os diâmetros, enquanto o modelo 2 subestimou tais valores. O modelo que apresentou melhor e mais homogênea distribuição ao longo do eixo que representa resíduo zero foi o modelo 4.

Verifica-se para o caso do fuste com casca que a variação para R^2_{ajus} ficou entre 94,4% e 96,0% e para $S_{yx}\%$ os valores variaram entre 7,6% e 10,18%. A melhor estimativa foi gerada pelo modelo 4 o qual apresentou o maior valor para R^2_{ajus} , e também para r , além do menor valor para $S_{yx}\%$.

Para o fuste sem casca uma variação do R^2_{ajus} entre 94,7% e 96,1%, foi verificada, e tem-se para $S_{yx}\%$ valores entre 7,6% e 11,5%. Sendo também o modelo 4 que apresentou as melhores estimativas.

AFILAMENTO DO CERNE E DA MEDULA:

Os modelos apresentaram boa distribuição aleatória ao longo da reta correspondente ao resíduo zero. O modelo 1 apresentou valores discrepantes que se distanciam da normalidade. Os modelos 2 e 4 apresentaram melhores distribuições, porém subestimam valores de diâmetro de cerne menores. O modelo 3 apresentou uma nuvem de pontos mais homogênea do que os outros modelos. Os testes estatísticos gerados para o cerne apresentam para R^2_{ajus} valores entre 69,2% e 92,1%. Em relação $S_{yx}\%$, os valores variaram entre 27,7%, e 22,7%. Sendo o modelo 3 o que apresentou os melhores resultados.

Todos os modelos apresentaram inadequações nos resíduos de acordo com a análise gráfica, porém, todos subestimaram os valores para o afilamento da medula. No entanto, os modelos 2 e 4 possuem maior homogeneidade e se apresentam melhores distribuídos em torno da reta que corresponde ao resíduo zero. Em relação às análises estatísticas, os valores do coeficiente de determinação também obtiveram grande variação, entre 14,3% e 57,7%. Os valores do erro padrão em porcentagem variaram entre 30% e 26,1%. O modelo 3 também foi o que apresentou os melhores resultados.

Sendo assim, de acordo com a análise gráfica e com os testes estatísticos, o polinômio do 5º grau ou modelo de Schöepfer, modelo 4, obteve o melhor ajuste para estimar o afilamento do fuste com casca e sem casca.

Em relação ao cerne e a medula, o modelo que obteve os melhores resultados foi o de Leite e Garcia (2001), modelo 3, com a inclusão da variável binária Tx proposta por Leite et al. (2011).

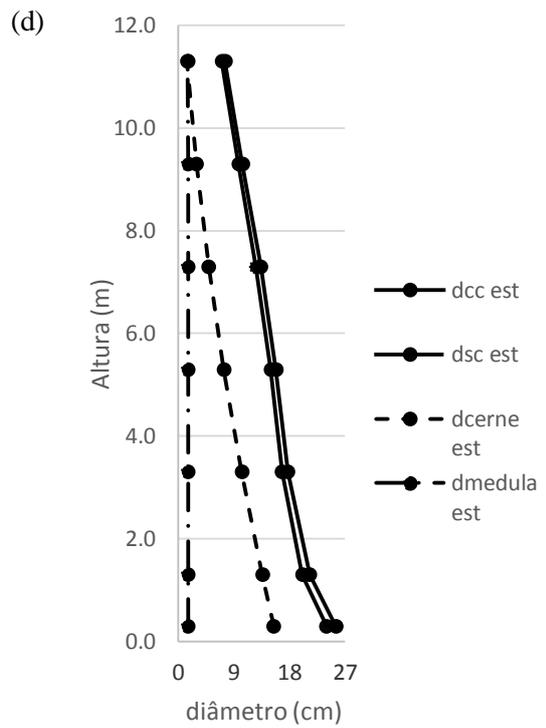
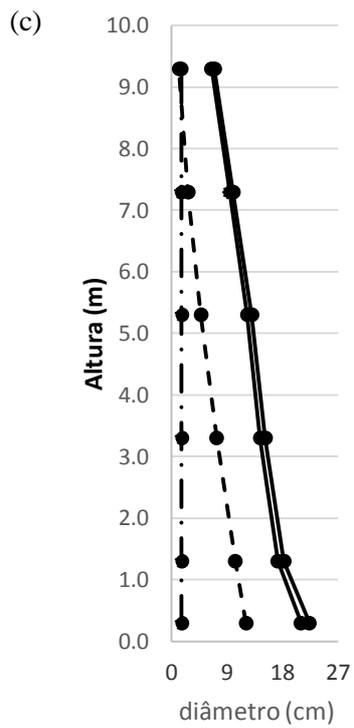
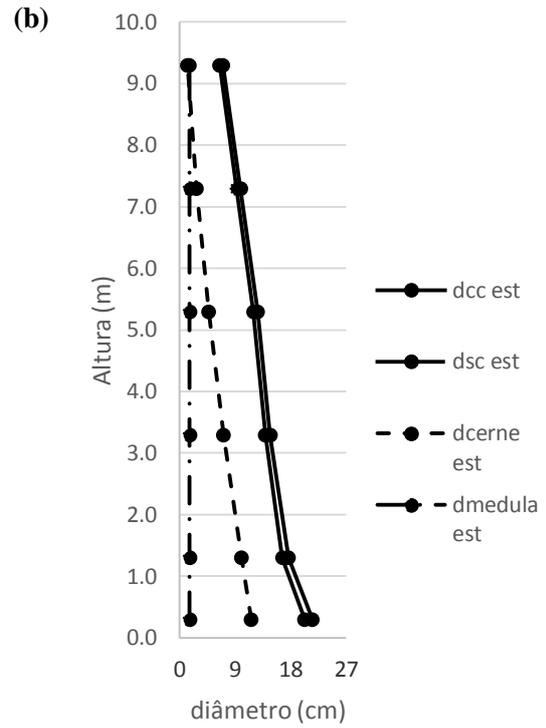
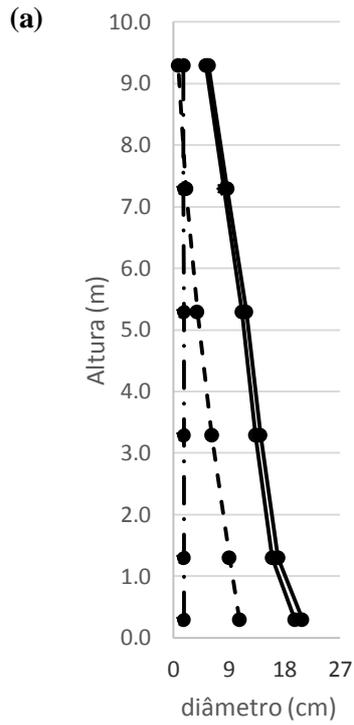
O polinômio do 5º grau apresenta um grande número de casos em que mostra sua eficiência em estimar o diâmetro ao longo do fuste, como é o caso dos trabalhos de Yoshitani Junior et al. (2012), Kohler (2013) e Oliveira (2012) ao estudarem modelos de afilamento constataram que o polinômio do 5º grau mostrou-se adequado para expressar o perfil do fuste.

No entanto, Oliveira (2012) obteve como resultado para o afilamento do cerne da madeira de Teca, com idades variando entre 14 e 16 anos, o polinômio do 5º grau como o melhor ajuste, apresentando como R^2_{ajus} o valor de 96,8%, sendo tal resultado diferente do achado no presente trabalho, em que o modelo de Leite e Garcia demonstrou ser o melhor.

Leite et al. (2011) constataram com base em estatísticas de exatidão, que o modelo de Garay foi o melhor para estimar o afilamento do fuste com e sem casca e também para o afilamento do cerne. No caso, foram incluídas duas variáveis binárias para garantir maior consistência. Desse modo, foi encontrado para o diâmetro do cerne, um R^2_{ajus} de 91,2%. Para os diâmetros com casca e sem casca, os valores encontrados foram de 97,6% e 97,4% respectivamente.

5.2 PERFIL DA ÁRVORE

Os modelos que melhor se ajustaram foram escolhidos para gerar o perfil estimado da Teca. Sendo assim, para determinar cerne e medula foi utilizado o modelo 3, e para determinar fuste com casca e sem casca foi utilizado o modelo 4 (Figura 5).



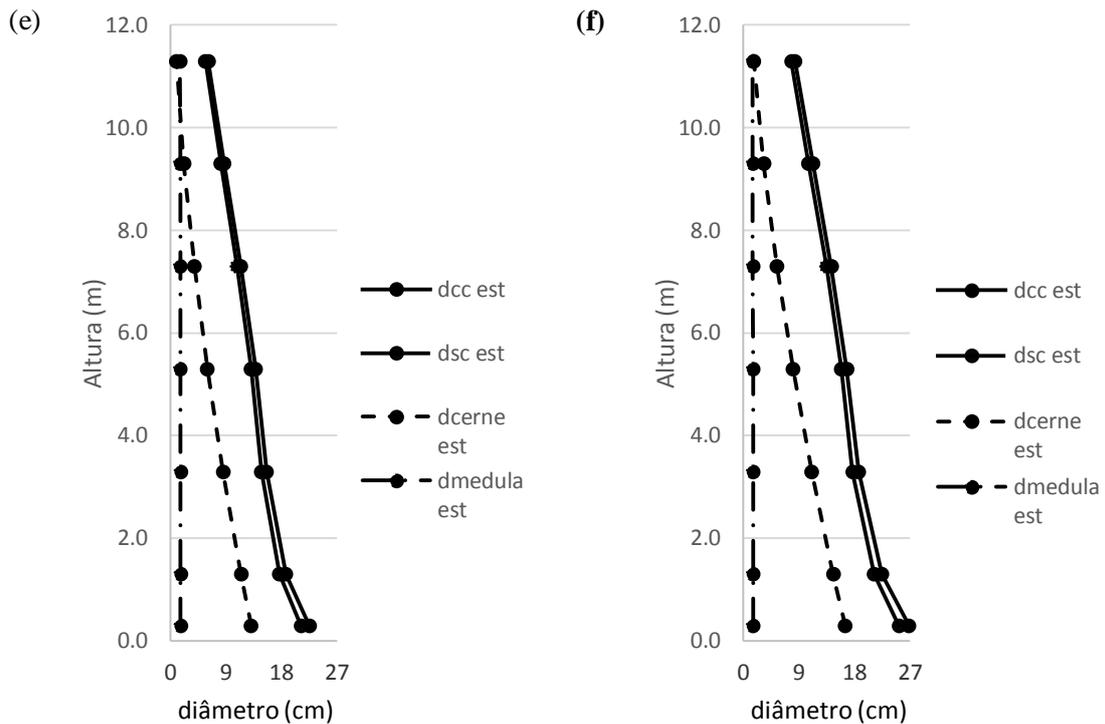


Figura 5: Perfil do fuste da Teca aos 4 anos (a) 5 anos (b) 6 anos (c) 7 anos (d) 8 anos (e) e 10 anos (f).

Para as idades mais avançadas, geralmente apresentando os maiores diâmetros, observa-se quantidades de cerne maiores, e conseqüentemente uma redução na representatividade do alburno. A medula não apresenta o formato cônico linear, padrão tão acentuado como o restante dos elementos do fuste.

5.3 PROPORÇÃO DE CERNE, ALBURNO E MEDULA NA MADEIRA DE TECA

A proporção de cerne, medula, alburno e casca para a madeira de Teca em função da idade são apresentadas para as idades de 4 a 10 anos na Figura 6.

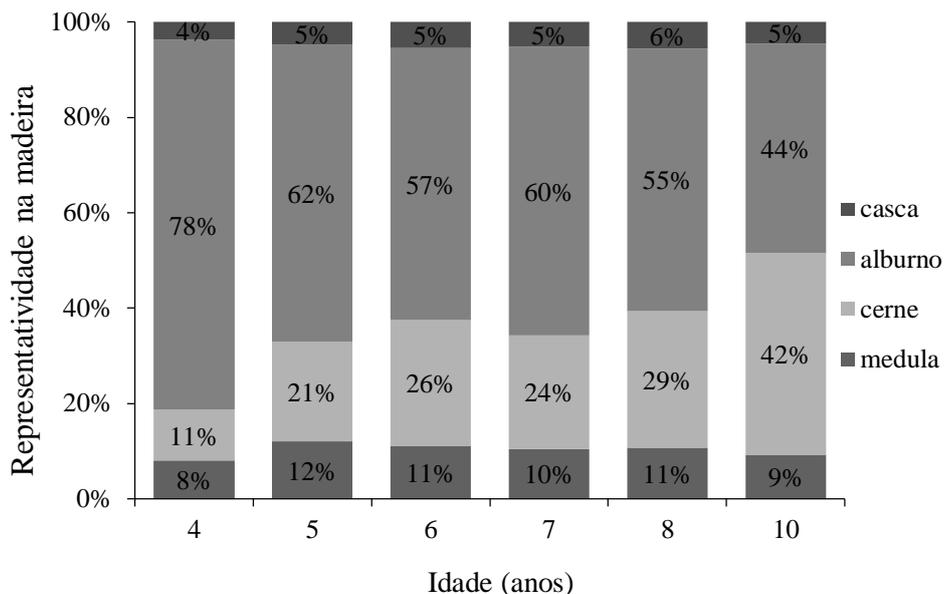


Figura 6: Porcentagem de medula, cerne, alburno e casca de *Tectona grandis*, com idades entre 4 e 10 anos, em relação a altura comercial do fuste.

A quantificação dos volumes de cerne e alburno são importantes para a valoração da madeira no mercado comercial. Maiores valores de alburno indicam maior tratabilidade e menor resistência natural, ao passo que maiores teores de cerne, em árvores adultas, resultam em melhor tonalidade da madeira, maior resistência natural e melhores propriedades mecânicas dos produtos (LEITE et al., 2011).

A porcentagem de cada parte da madeira foi calculada de acordo com a média ponderada das idades das árvores amostras, sendo de 4, 5, 6, 7, 8 e 10 anos. A quantidade de medula e de casca se mantêm praticamente a mesma independente da progressão da idade. O cerne representa 42% do fuste da árvore aos 10 anos de idade. A quantidade de alburno decresce de acordo com o aumento do diâmetro da árvore.

Em florestas plantadas de Teca são encontrados valores máximos de 55% aos 30 anos de idade. A depender da procedência do material, as porcentagens de cerne podem chegar a 70%, sendo esse caso encontrado aonde a Teca é nativa e a madeira é adulta (FLOREZ, 2012).

Floréz (2012) encontrou valores de cerne de 51,44% para a madeira de Teca aos 13 anos de idade, na região noroeste de Minas Gerais, no entanto, este valor é superior à média reportada na literatura. Porém, não fora descontado o valor da medula no cálculo do volume do cerne, podendo ser uma explicação para a elevada porcentagem de cerne.

Oliveira (2014) estudou a porcentagem de cerne em relação ao volume total. Avaliou-se que a quantidade de cerne varia entre 50%, com índice de sítio de 22,42 metros e 34,7%, para índice de sítio de 17,92 metros, sendo que em locais com característica superior de produtividade tem maior produção de volume de cerne em relação ao volume total com casca.

5.4 OTIMIZAÇÃO

Os resultados obtidos para a relações hipsométricas são apresentados na Figura 7 e os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 5.

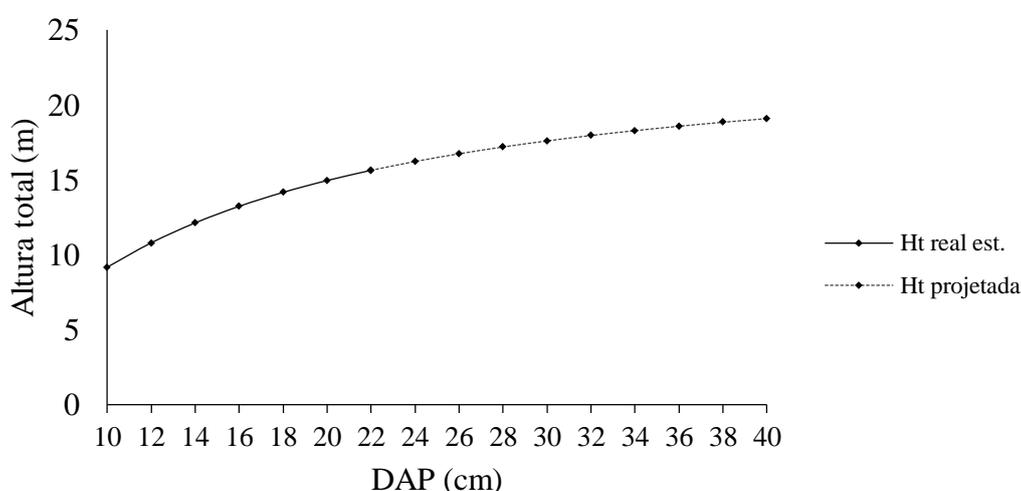


Figura 7: Estimativa da altura mensurada, classes entre 10 cm a 22 cm, e da altura projetada, classes entre 24 cm a 40 cm.

A equação de afilamento utilizada no *software* SigmaE foi a de Leite e Garcia para o afilamento do cerne.

Do volume gerado para serraria somente obtiveram retorno financeiro para esse tipo de uso aquelas árvores com DAP acima de 18 cm, sendo toda a madeira de árvores menores que esta, foram destinadas a energia, como demonstrado na Figura 8, em que o valor 1 na coluna do USO representa a destinação para energia e 2 representa destinação para serraria.

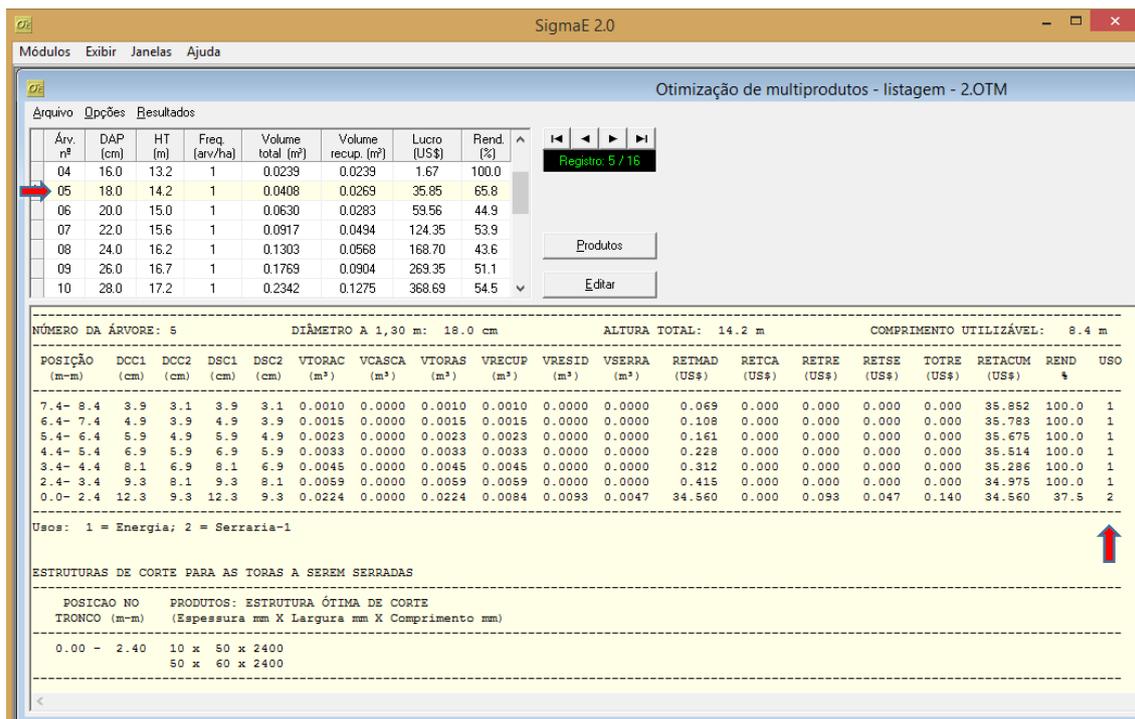


Figura 8: Produtos gerados pelo software SigmaE com as devidas destinações de uso e retorno econômico para cada classe de DAP (cm).

Na Figura 9 é apresentada uma comparação entre o volume total (a), e o volume destinado somente para serraria, descontando a região da medula (b).

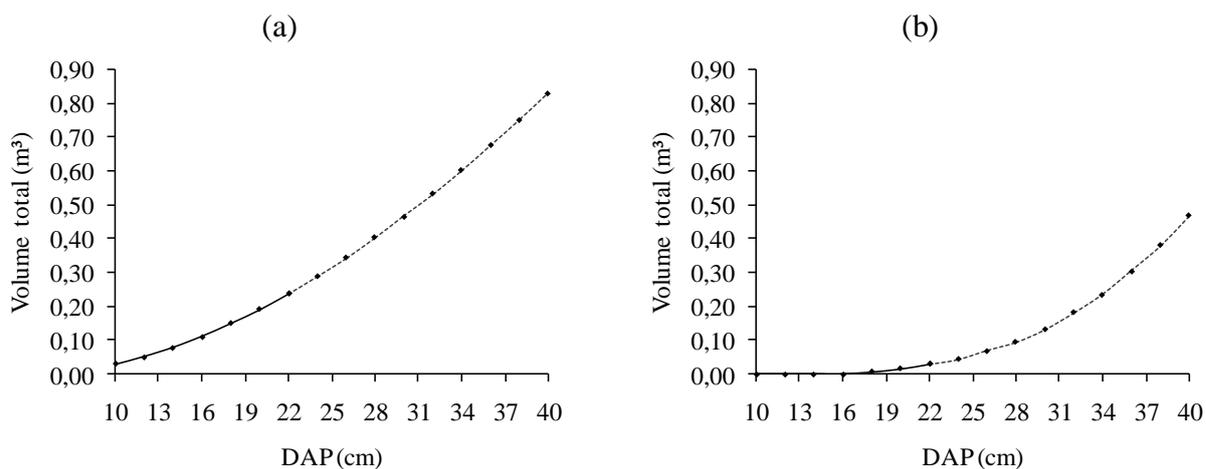


Figura 9: Comparação entre o volume total (a) e volume destinado para serraria descontando a região da medula (b) para as classes de DAP de 10 a 40 cm.

Os valores de volume gerados para a medula foram descontados do volume do cerne ao final, a fim de descontar a parte da madeira que não é utilizada na serraria e

assim, gerar o lucro obtido com a otimização. O retorno financeiro para energia e laminados é mostrado na Figura 10 e o retorno econômico total, apresentado na Figura 11.

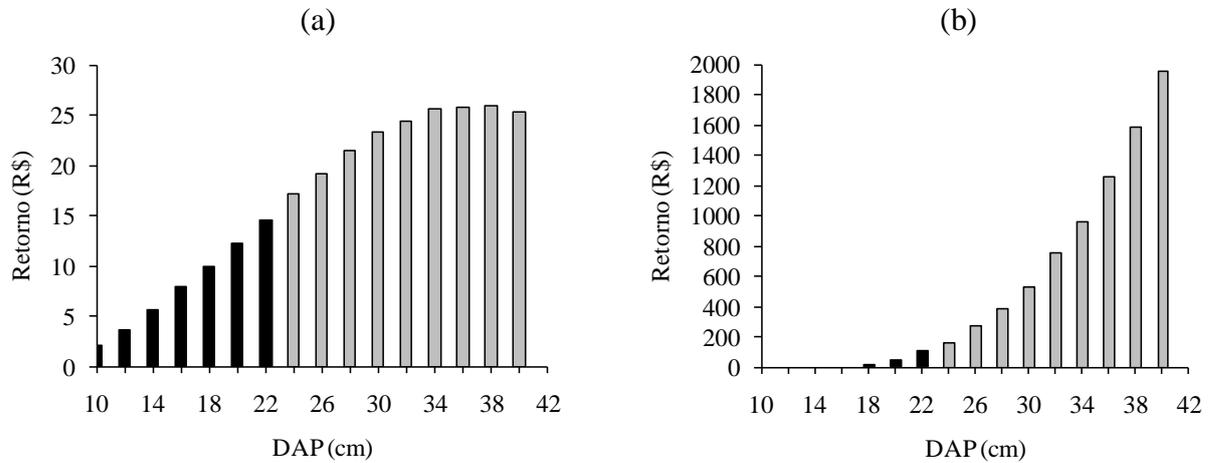


Figura 10: Retorno econômico por árvore após a otimização por árvore em cada classe de DAP (cm), para energia (a) e para laminados (b). Em que as barras pretas representam o intervalo mensurado e as barras cinzas o intervalo projetado.

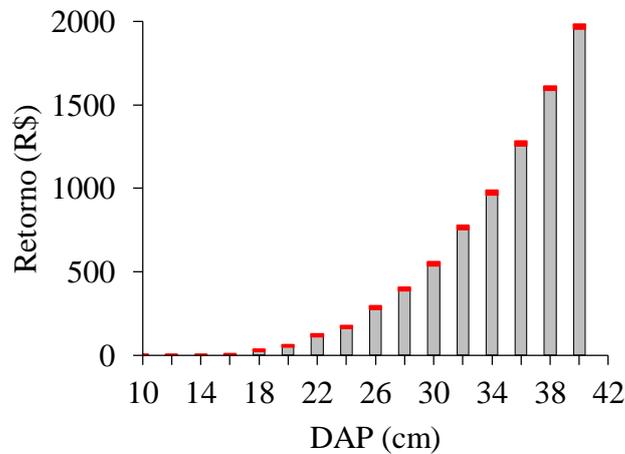


Figura 11: Retorno econômico total após a otimização por árvore em cada classe de DAP. Produtos laminados são representados pelas barras cinzas e a energia é representada pelas barras vermelhas.

O sistema de otimização do corte foi eficiente e os resultados indicam que o lucro aumenta exponencialmente com o aumento do diâmetro das árvores.

Cabe-se destacar que na projeção realizada, para classes de DAP > 24 cm, considerou-se que a tendência de afilamento do fuste e medula das árvores permanecem coincidentes às observadas nos anos iniciais, de acordo com os dados modelados.

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos é possível concluir que mediante o ajuste do modelo de Leite e Garcia foi possível determinar o afilamento de cerne e de medula, assim como o polinômio do 5º representou bem o afilamento do fuste com casca e sem casca de *Tectona grandis* L.f.

Ambos modelos podem ser utilizados para se determinar linhas de cortes específicas às alturas e aos diâmetros de cada peça. Sendo tais modelos ferramentas importantes para determinar com precisão o perfil da árvore.

A proporção de cerne aumenta linearmente e a proporção de alburno decresce com o aumento do diâmetro das árvores.

O sistema de otimização do corte foi eficiente e os resultados indicam que o lucro aumenta exponencialmente com o aumento do diâmetro das árvores.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. Anuário estatístico ABRAF 2013. Ano base 2012. ABRAF. 148 p. 2014.

AMODEI, J. B.; OLIVEIRA B.; GURGEL M. M.; CARVALHO A. M.; MEDEIROS R. A.; LATORRACA J. V. F. **Avaliação Preliminar da Qualidade da Madeira de *Tectona grandis* L.f. através da Tomografia de Impulso.** Floresta e Ambiente, vol.17(2),p.124-128. 2010.

ANGELI, A. *Tectona grandis* (Teca). Departamento de Ciências Florestais – ESALQ/USP, São Paulo. 2003. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/tectona.grandis.asp>> Acesso em: 06 de maio 2014.

ANGELO, H. Trabalho sobre avaliação econômica dos plantios de *Tectona grandis* L.F. de propriedade da empresa REFLORA – Reflorestadora – Ltda. **Avaliação econômica dos reflorestamentos de teca da REFLORA**, 2000.

ANGELO, H.; SILVA, V. S. de M., SOUZA, A. N.; **Aspectos financeiros da produção de teca no estado do Mato Grosso.** Floresta, Curitiba, v. 39, n.1, p. 23-32, jan/mar. 2009.

ARCE, J. E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte.** 2000. 129p.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2000.

BAUMANN, R; ORG. **O Brasil e os demais BRICs** – Comércio e Política. Brasília, DF, CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 180p. 2010.

CALDEIRA, S. F.; OLIVEIRA, D. L. C. **Desbaste seletivo em povoamentos de *Tectona grandis* com diferentes idades**. Acta Amazônica, vol. 38(2), 2008. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/aa/v38n2/v38n2a05.pdf>> Acesso em: 19 maio 2014.

CALDEIRA, B.R.P.R. **Caracterização das propriedades físico-mecânicas e determinação da porcentagem de cerne da madeira de *Tectona grandis***. Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto de Superior de Agronomia, 2004, 71p. Relatório.2004.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. Manejo Florestal. 4.ed. 605p. Viçosa: UFV., Minas Gerais, 2013.

CASTRO, V. R. **Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. e *Tectona grandis* L. f.** 2011. 104p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’.2011

CUSTODE, J. **Mercados de madeira**.2003. Disponível em: <<http://www.bosquetropicales.com/html/Espanol/mercados.html>> Acesso em: 28 maio 2014.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. 1966. **Applied regression analysis**. New York: John Willey e Sons. 407p. 1966. Disponível em: <http://garfield.library.upenn.edu/classics1981/A1981KU61500001.pdf>> Acesso em: 11 de setembro de 2014.

EMBRAPA. Banco de Dados Climáticos do Brasil. Disponível em: <http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/> Acesso em: 27 de novembro de 2014.

FAO, 2006. **Global planted forests thematic study: results and analysis**, by A. DeLungo, J. Ball and J. Carle. Planted Forests and Trees Working Paper 38. Rome.

FAO. 2011. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLA W) - Managing systems at risk**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.

FAO, 2013. **Statistical Yearbook: World food and agriculture**, FAO, Rome. Disponível em: < <http://www.fao.org/home/en/>> Acesso em: 2 de Novembro de 2014.

FAVELESSA, C. M. C.; UBIALI J. A.; CALDEIRA S. F.; DRESCHER R. **Funções de afilamento não segmentadas e segmentadas de *Tectona grandis* na região centro-sul mato-grossense**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 72, p. 373-387, out./dez. 2012.

FENNER, W.; MOREIRA, P.S.P.; FERREIRA, F.S.; DALLACORT, T.M.de O.; BENTO, T.S. **Análise do balanço hídrico mensal para regiões de transição de Cerrado – Floresta e Pantanal, Estado de Mato Grosso**. Universidade do Estado de Mato Grosso, UNEMAT. Acta Iguazu, Cascavel. v.3, n.1, p.72-85, 2014.

FERREIRA, S.; LIMA, J. T. ROSADO, S. C. da S.; TRUGILHO, P. F. **Influência de métodos de desdobro tangenciais no rendimento e na qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* spp.** Cerne, Lavras, v. 10, n. 1, p. 10-21, 2004.

FIGUEIREDO, E. O. **Reflorestamento com Teca (*Tectona grandis* L.F.) no Estado do Acre/ Rio Branco**. EMBRAPA Acre, 2001. 28 p. EMBRAPA Acre. Documentos, 65.

FIGUEIREDO, E.O.; OLIVEIRA, A.D; SCOLFORO, J.R.S. **Análise econômica de povoamentos não desbastados de *Tectona grandis* L.f., na microrregião do baixo Rio Acre**. Revista Cerne, Lavras, v.11, n.4, p.342-353, 2005.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, L. C.; BARBOSA, L. K. F. **Teca: Principais perguntas do futuro empreendedor florestal**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2005. Disponível em:<<http://pt.scribd.com/doc/60875273/TECA-EMBRAPA-Principais-Perguntas>> Acesso em: 11 de maio de 2014.

FLÓREZ, J.B. **Caracterização tecnológica da madeira jovem de Teca (*Tectona grandis* L. f)**. 2009. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)Universidade Federal de Lavras, 2012.

GALDINO, P. **Mercado de produtos forestales: posibilidades de exportación de melina y Teca de Costa Rica**. Genova: FAO, 50 p. 2001.

GUIMARÃES, M.A.P. **Cultivo de *Tectona grandis* L.f. no Estado do Espírito Santo**. 2012. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES. 2012.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p. 1979.

LADRACH, W. **Manejo de plantaciones de la Teca para productos sólidos. Maryland: Sociedad Internacional de Forestales Tropicales**, 27 p.2009.

LIMA, I. L.; GARCIA, J. N.; STAPE, J. L. **Influência do desbaste e da fertilização no deslocamento da medula e rachaduras de extremidade de tora de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden**. Cerne, v. 13, n. 2, p. 170-177, 2007.

LIMA, I. L.; GARCIA, R.; LONGUI, E. L.; BORGES, S. M. **Dimensões anatômicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. em função do espaçamento e da posição radial do tronco Florsheim**. Sci. For., Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 061-068, 2011.

LIMA, J. T. **Deformações residuais longitudinais decorrentes de tensões de crescimento em eucaliptos e suas associações com outras propriedades**. Revista Árvore, Viçosa - MG, v. 28, n. 1, p. 107-116, 2004.

MATRICARDI, W. A. **Efeito dos fatores do solo sobre o desenvolvimento da teca *Tectona grandis* L.F. cultivada na Grande Cáceres – Mato Grosso.** 135 p. Dissertações (Mestrado) – Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

MIGUEL, E.P.; CANZI, L.F.; RUFINO, R.F.; SANTOS, G.A.dos; **Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde – GO.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Goiânia, vol.6, n.11, p.1-13, 2010.

ROCHA, B. R. **Caracterização de fatores que afetam a germinação de Teca (*Tectona grandis*): temperatura e escarificação.** Ver. *Árvore* vol. 35 no.2 Viçosa Mar./Apr.2011. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622011000200005escript=sci_arttext> Acesso em: 11 de maio de 2014.

SOUZA, A. P.; MOTA L. L.; ZAMADEI T.; MARTIM C. C.; ALMEIDA F. T.; PAULINO J. **Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de Mato Grosso. Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais.** v.1, n.1, 2013.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MULLER, M. D. **Análise econômica de um plantio de Teca submetido a desbastes.** *Revista Árvore*, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 487-494, 2003.

VEIT, L. F. **Dinheiro não cresce em árvores.** *Revista Silvicultura*, n. 83, p. 38-39, 2000.