

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS**

DOMINGOS ALVES GONÇALVES JUNIOR

ESTUDO DA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA DE

Acacia mangium Willd.

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA

FEVEREIRO-2012

DOMINGOS ALVES GONÇALVES JUNIOR

ESTUDO DA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA DE

***Acacia mangium* Willd.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia,
como requisito parcial para a obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia Florestal.,

Orientador: Prof. Dr. José Mauro de Almeida

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA

FEVEREIRO-2012

Ficha Catalográfica

G635 Gonçalves Junior, Domingos Alves

Estudo da carbonização de madeira de Acácia mangium Wild/ Domingos Alves Gonçalves Junior. _ Cruz das Almas, BA, 2012.

35f.;il.

Orientador: José Mauro de Almeida.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do
Recôncavo da Bahia.

Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.

1. Carvão vegetal. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.

ESTUDO DA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA DE

***Acacia mangium* Willd.**

Orientador: Prof. Dr. José Mauro de Almeida

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - CCAAB

Prof. Dr. Clair Rogério da Cruz

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - CCAAB

Jacyr Alves Mesquita

Gerente de Tecnologia Florestal

COPENER FLORESTAL LTDA

BAHIA SPECIALTY CELLULOSE

Cruz das Almas, 24 de fevereiro de 2012.

DEDICATÓRIA

À Deus, pela proteção e pelo amor eterno.

A todos aqueles que contribuíram para realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha existência, intuições e proteção;

À minha mãe Osvalda Oliveira Gonçalves e ao meu pai Domingos Alves Gonçalves e meus irmãos Joaquim Alves Gonçalves, Rosivalda Alves Gonçalves e Dilza Alves Gonçalves, pelo apoio incondicional e colaboração para essa realização;

À minha namorada Uilla Saldanha pelo apoio e companheirismo;

Ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, pela minha formação;

À minha turma, em nome de Mariana, Cristiane, Bruno, Diego, Matheus, Urialisson e todos os demais não citados;

Ao meu orientador Prof. José Mauro de Almeida, pela orientação, apoio e conselho dados;

Aos professores: Josival, Rozimar, Joelito, Jaildo, Edson, Anacleto, Jesus pelos ensinamentos e orientações;

Ao professor Edson Freitas pelos esclarecimentos;

Ao Professor Clair Cruz pelo apoio;

Ao Sr. Jacyr Alves Mesquita, gerente de tecnologia florestal, e a COPENER FLORESTAL e a BAHIA SPECIALTY CELLULOSE pelo fornecimento dos exemplares de árvores da espécie *Acacia mangium* usadas para o estudo e elaboração desse trabalho de conclusão de curso de engenharia florestal;

Aos meus colegas contemporâneos Admilson, Kelly, Fernanda, Hellen, Avelar, Rafael, Esio, Janio, pelo apoio e incentivo;

Aos meus amigos que adquiri na vida profissional Antônio Sodré e Carlos Moura pelo apoio, incentivo e a certeza que durante todo o curso eu estava no caminho certo e iria conseguir;

Aos demais professores que compõem o Curso de Engenharia Florestal, no qual tive a oportunidade de adquirir um pouco de seus conhecimentos;

Aos demais aqui não citados, mas com certeza, lembrados.

EPIGRAFE

“Começar de novo e contar comigo, vai valer a pena ter amanhecido

Ter me rebelado ter me debatido, ter me machucado, ter sobrevivido

Ter virado a mesa, ter me conhecido, ter virado o barco, ter me socorrido

Começar de novo...”

Ivan Lins

ESTUDO DA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA DE

Acacia mangium Willd.

RESUMO

A *Acacia mangium* é uma espécie leguminosa, arbórea de ocorrência natural no nordeste da Austrália, na Indonésia, (Ilhas Molucas e de Java) e na província de Papua Nova Guiné. Apresenta excelente desenvolvimento, superior a várias espécies de eucaliptos, atinge alturas de até trinta metros e consegue alcançar a produção de 46 m³/ha/ano. Esse trabalho teve o objetivo de avaliar o carvão vegetal produzido da carbonização da madeira de *Acacia mangium*, analisando o rendimento gravimétrico de carvão, de licor pirolenhoso e de alcatrão, e determinar pelo método de análise química imediata o teor, de cinzas, matérias voláteis e carbono fixo do carvão produzido. Bem como verificar a variação da densidade básica da madeira da espécie *Acacia mangium* no sentido longitudinal do tronco, nas seções 0% 25% 50% 75% 100% até altura comercial. Pelos resultados obtidos observamos que a densidade básica das árvores decresce com altura. O rendimento gravimétrico de carvão foi de 32,71%, de licor pirolenhoso 30,95%, de alcatrão 5,37 %. O teor de cinzas foi de 1,11 %, de matérias voláteis foi de 17,80 % e de carbono fixo foi de 81,09 %. O carvão vegetal produzido apresentou uma boa qualidade para o setor siderúrgico.

Palavras-chave: *Acacia mangium*, densidade, energia renovável, carvão vegetal, rendimento, alcatrão, licor pirolenhoso.

CARBONIZATION STUDY OF WOOD

Acacia mangium Willd.

ABSTRACT

Acacia mangium is a legume species, naturally occurring trees in northeastern Australia, Indonesia (Moluccas and Java) and the province of Papua New Guinea. It features excellent performance, superior to several species of eucalyptus, reaches heights of up to thirty meters and can reach production of 46 m³ / ha / year. This work aimed to evaluate the charcoal produced from carbonization of the wood of *Acacia mangium*, analyzing the gravimetric yield of carbon, pyroligneous liquor and tar, and determine the method of chemical analysis the content of ash, volatile matter and fixed carbon of coal produced. And to verify the variation of wood basic density of the species *Acacia mangium* in the longitudinal direction of the trunk, in the sections 0% 25% 50% 75% 100% up to commercial height. From the results we observed that the basic density of trees decreases with height. The coal gravimetric yield was 32.71%, 30.95% of pyrolignous, tar 5.37%. The ash content was 1.11% of volatile material was 17.80% and fixed carbon was 81.09%. The charcoal produced had a good quality for the steel industry.

Key words: *Acacia mangium*, density, renewable energy, charcoal, yield, tar, pyroligneous liquor.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Altura total, altura comercial, diâmetro a altura do peito e circunferência a altura do peito das árvores de *Acacia mangium* amostradas. 9
- Tabela 2:** Densidades básicas e coeficiente de variação nas seções do tronco de *Acacia mangium*. 17
- Tabela 3:** Rendimentos da carbonização, e propriedades químicas do carvão de madeira de cinco árvores da espécie *Acacia mangium* com sete anos de idade. 18

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** **A** – Derrubada e retirada de toras e discos das árvores amostradas para o experimento. **B** – Identificação das toras e discos. 10
- Figura 2:** - Discos de uma árvore com marcação das cunhas opostas para serem retiradas para determinação da densidade básica. 10
- Figura 3:** **A** – Madeiras em toras das cinco árvores separadas. **B** – Toras fragmentadas e separadas por árvores. **C** – Madeira fragmentadas e separadas acondicionadas em sacos plásticos. 11
- Figura 4:** **A** – Adaptação do forno elétrico mufla modelo 1612 N1100, para carbonização e condensação de gases condensáveis. **B** – Queima de gases não condensáveis durante o processo de carbonização. **C** – Kitasatos para captura dos gases condensados. 12
- Figura 5:** Procedimento de pesagem do licor pirolenhoso e do alcatrão. 13
- Figura 6:** **A** - Moinho utilizado para moer as amostras de carvão. **B** – Peneiras de 20 e de 100 mesh. 13
- Figura 7:** **A** – Amostras das três carbonizações de cada árvore e os cadinhos utilizados. **B** – Balança analítica modelo FA 2104N utilizada nas análises. 14
- Figura 8:** **A** - Compartimento do forno elétrico mufla modelo 0212 J 200, com os cadinhos contendo as amostras de carvão pesadas. **B** - Dessecadores com sílica gel em seu interior. 15
- Figura 9:** **A** – Cadinho tampado com amostra na porta do forno elétrico mufla modelo 0212 J200, durante 3 minutos na temperatura de 950°C. **B** – Cadinho tampado com amostra submetido à 950°C durante 7 minutos. 16

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURA	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	2
2.1 Geral	2
2.2 Específico	2
3 REVISÃO DE LITERATURA	3
3.1 A espécie <i>Acacia mangium</i> Willd	3
3.2 Característica da utilização da madeira	3
3.2.1 Densidade básica	4
3.3 Carbonização da madeira e rendimentos	5
3.3.1 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal	5
3.3.2 Rendimento de licor pirolenhoso e de alcatrão	6
3.3.3 Análise química imediata	6
3.3.3.1 Teor de cinzas	7
3.3.3.2 Teor de materiais voláteis	7
3.3.3.3 Teor de carbono fixo	8
4 MATERIAL E MÉTODOS	8
4.1 Material experimental	8
4.2 Coleta do material	9
4.3 Determinação da densidade básica da madeira	10
4.4 Carbonização da madeira e laboratório	10
4.4.1 Preparo da amostras para carbonização	10

4.4.2 Carbonização e recuperação de gases condensáveis	11
4.5 Rendimento gravimétrico do carvão, do licor pirolenhoso e do alcatrão	12
4.6 Análise química imediata	13
4.6.1 Teor de umidade	13
4.6.2 Teor de cinzas	14
4.6.3 Teor de materiais Voláteis	15
4.6.3 Teor de carbono Fixo	16
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5.1 Densidade básica da madeira	17
5.2 Análise da carbonização e dos rendimentos	17
5.2.1 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal	18
5.2.2 Rendimento de licor pirolenhoso e de alcatrão	18
5.2.3 Teor de cinzas	18
5.2.4 Teor de materiais voláteis	19
5.2.4 Teor de carbono fixo	19
6 CONCLUSÕES	20
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

1 INTRODUÇÃO

O uso da madeira e de seus derivados é cada vez maior no mundo, e essa madeira provém de florestas plantadas e nativas. A floresta nativa vem sendo tratada de maneira insustentável, no que diz respeito a utilização da madeira, sem um procedimento de manejo sustentável para produção de carvão, móveis entre outros. Para que tenha um maior aproveitamento na sua utilização, a madeira exige que sejam observados algumas propriedades tais como densidade, resistência, umidade, rigidez, retratibilidade, rendimentos e qualidade na produção do carvão.

Os combustíveis renováveis vêm ganhando importância no cenário energético mundial., Estas fontes de energia alternativas possuem potencial para suprir grande demanda com competitividade e pouco impacto ambiental, seguramente, é forte candidato para ocupar o lugar dos combustíveis fósseis (NETTO et al., 2006).

As pressões mundiais para utilização de energias renováveis e menos poluentes estão cada vez mais evidenciadas e o carvão vegetal é uma das alternativas para o atendimento dessas novas exigências (GOMES, 2006).

A lenha e o carvão vegetal são os combustíveis sólidos renováveis mais utilizados, principalmente nos setores industrial e residencial. A região Sudeste caracteriza-se como a maior produtora e consumidora destes combustíveis. A retirada contínua de madeira ao longo dos anos resultou na diminuição da mata nativa desta região, acarretando em custos financeiros elevados e prejuízos ambientais (COELHO, 2008).

Mesmo com a redução do consumo nos últimos anos, o carvão vegetal ainda possui uma posição de grande importância na economia brasileira, em especial, para Minas Gerais, principal estado produtor e consumidor. Ocupa posição de destaque no setor siderúrgico, pois contribui para a produção de ferro-gusa, aço e ferro-liga. O carvão vegetal está intimamente ligado à siderurgia, a qual consome 82% de sua produção. Além da indústria siderúrgica, o carvão vegetal também participa como substituto do óleo combustível nas caldeiras e nos fornos de combustão da indústria de cimento e de materiais primários (TRUGILHO et al., 2005).

Acacia mangium apresenta ocorrência natural que abrange a Nova Guiné, Indonésia e Austrália, onde vegeta em solos com pH inferior a 4,5 e teor de fósforo abaixo de 0,2 mg/dm³. Em sítios de melhor qualidade, a produtividade desta espécie pode atingir 46m³/ha/ ano e 20m³/ha/ano em sítios inferiores (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1983).

As plantações florestais têm crescido cerca de 2,8 milhões de ha/ano e 87% dessa áreas são para produção de madeira e fibra. Estas plantações representam 2,8% da área florestal global, com cerca de 109 milhões de ha. Apenas dez países respondem por 73% dessa área, com a China, a Rússia e os Estados Unidos somando mais da metade da área total., Na América do Sul, 82% das plantações estão localizadas na Argentina, no Chile e no Brasil. No Brasil, as primeiras introduções de *Acacia mangium* foram feitas pela Embrapa Florestas em 1979, na forma de pequenos talhões experimentais. Posteriormente, em 1985, foram implantados testes de procedências em Belterra PA, Belo Oriente e Coronel Fabriciano, no estado de Minas Gerais (TONINI et al., 2010).

Em 1983 a Copener Florestal realizou teste de introdução no município de Inhambupe BA.

2 OBJETIVO

2.1 Geral

Esse trabalho teve objetivo de estudar o comportamento de madeira de *Acacia mangium* na produção de carvão vegetal analisando-se seus rendimentos nas carbonizações bem como as características básicas do carvão produzido. E também objetivou-se verificar a variação da densidade básica da madeira da espécie *Acacia mangium* no sentido longitudinal do tronco.

2.2 – Específico

- Determinar a variação da densidade básica da madeira de *Acacia mangium*.
- Determinar o rendimento gravimétrico do carvão produzido de *Acacia mangium*.
- Determinar os teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo do carvão de *Acacia mangium*.

3 REVISÕES DE LITERATURA

3.1 A espécie *Acacia mangium* Willd.

A *Acacia mangium* é uma espécie da família Fabaceae, perenifólia, de altura superior a trinta metros, com diâmetro que raramente excede a 60 cm. Apresenta tronco reto com tendência á ramificação, com casca cuja cor varia de cinza-claro a marrom, com galhos finos que forma uma copa densa de forma oval. As flores são hermafroditas, os frutos são do tipo vagem, espiralados ou torcidos. Quando maduros, são marrons, curtos e deiscentes, com sementes pretas, pequenas pendentes na vagem por um arilo alaranjado (TONINI et al., 2010).

O gênero *Acacia*, com aproximadamente 2.000.000 ha plantados em todo o mundo, apresenta uma relevante importância do ponto de vista social e industrial no reflorestamento. As espécies de maior utilização são *Acacia mangium* e *Acacia auriculiformis* sendo suas produções direcionadas para polpa celulósica, madeira para indústria moveleira e construção civil, matéria-prima para compensados, combustível, controle de erosão, quebra-ventos e sombreamento (ANTUNES, 2009).

A espécie *Acacia mangium* ocorre naturalmente na região costeira norte da Austrália, na Indonésia, nas ilhas Molucas e Java e na província de Papua Nova Guiné entre latitudes 1° a 18°S e altitudes que vão desde o nível do mar até 800m (LELLES et al., 1996)

A *Acacia mangium* segundo Galiana et al citado por Smiderle et al., (2009), apresenta associação espontânea com bactérias do gênero *Rhizobium* e grande potencial para a recuperação de áreas degradadas A *Acacia mangium* é a espécie florestal mais plantada no Estado de Roraima, onde ocupa hoje aproximadamente 30 mil hectares em áreas de cerrado, tendo sido a sua silvicultura estudada nos projetos da Embrapa “Florestas energéticas na matriz da agroenergia brasileira” e “Silvicultura, manejo e tecnologia de madeira para sistemas de produção de florestas plantadas em áreas alteradas na Amazônia.

3.2 Características e utilização da madeira

A madeira da *Acacia mangium* pode ser facilmente serrada, planada, polida, envernizada, colada, pregada e receber tratamento preservativo com produtos químicos para aumentar sua durabilidade quando em contato com o solo. A densidade básica da madeira determinada em plantio da EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do

Norte) foi de 650 kg/m³, sendo considerada elevada, permitindo o seu perfeito uso na fabricação de móveis, bem como suas fibras curtas lhe conferem a qualidade necessária para produção de celulose e papel. O poder calorífico desta espécie é de 4.900 kcal/kg de madeira, sendo por isso uma boa fonte de lenha e carvão vegetal (ARAÚJO, 2010).

Segundo Antunes (2009), a madeira da *Acacia mangium* apresenta algumas características anatômicas e físicas como:

- limites de anéis de crescimento indistintos ou ausentes; anéis de crescimento acroposcopicamente visíveis em madeira proveniente de certas regiões;
- cor do alburno distinto a cor do cerne
- densidade básica variando de 0,400 e 0,600 g/cm³
- elementos de vasos dispostos em padrão não específico, agrupados, geralmente em grupos radiais curtos (de 2-3 vasos); diâmetro tangencial de 120 a 160 µm; frequência de vasos de 4 a 9 vasos/mm²; placas de perfuração simples; tilos ausentes;
- fibras de paredes finas e de espessura média; comprimento médio 0,9 a 1,3 mm.

3.2.1 Densidade básica

A densidade da madeira é uma característica complexa resultante da combinação de diversos fatores. Existem inúmeros trabalhos mostrando sua relação com as dimensões das fibras, particularmente espessura da parede, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira primaveril e outonal, e arranjo dos elementos anatômicos (FOELKEL et al., 1971).

Para estes mesmos autores a densidade é um importante fator na determinação das propriedades físicas e mecânicas que caracterizam diferentes espécies de madeiras, diferentes árvores de uma dada espécie e diferentes regiões de uma mesma árvore. Dentre as várias maneiras de se expressar a densidade da madeira, uma das mais práticas, vem a ser a densidade básica que é a relação entre o peso absolutamente seco da madeira, em gramas ou quilos, e seu volume, respectivamente em centímetros cúbicos ou metros cúbicos, quando em estado de saturação de água esteja acima do ponto de saturação das fibras.

Segundo Tonini et al. (2010), em plantios comerciais de *Acacia mangium* aos 9 anos de idade cultivados no estado de Roraima, a densidade básica encontrada foi de 0,483 g/cm³. A densidade básica da *Acacia mangium* varia conforme o sitio e tende a ser correlacionada ao

crescimento em diâmetro. Parece ser maior nos melhores sítios, onde o crescimento em diâmetro é mais rápido (LIANG e GAN, 1991).

Segundo Zobel e Talbert (1984) citado por Trugilho et al., (2005) em um trabalho com eucaliptos provenientes de povoamentos implantados pela Copener Florestal, onde os mesmos mencionam que a variabilidade da madeira geralmente está associada a fatores como o material genético, a idade, o local ou sítio, dentre outros.

3.3 Carbonização da madeira e rendimentos

O carvão vegetal que contribui significativamente para o desenvolvimento das indústrias de base florestal no Brasil é um subproduto florestal, resultante da pirólise da madeira, também conhecida como carbonização ou destilação seca da madeira. No processo de carbonização a madeira é aquecida em ambiente fechado, na ausência ou presença de quantidades controladas de oxigênio, à temperaturas acima de 300 °C, desprendendo vapor d'água, líquidos orgânicos e gases não condensáveis, ficando como resíduo o carvão vegetal (CASTRO et al., 2007).

Até a temperatura de 200°C ocorre a secagem da madeira. O processo é endotérmico, verificando-se a liberação de H₂O, traços de CO₂, HCOOH, CH₃COOH e glioxal (COELHO, 2008).

Na carbonização da madeira de *Acacia mangium*, acima de 200° C ocorre acentuada perda de peso, intensificando no intervalo de 250°C a 390°C, nesse intervalo a madeira perde aproximadamente 58% do seu peso inicial, quando ocorre o processo de pirólise propriamente dito (LELLES et al., 1996).

3.3.1 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

Carvão vegetal é o termo genérico do produto sólido obtido da carbonização da madeira. Mas, segundo as técnicas para sua obtenção e o uso para o qual ele é destinado, pode-se obter carvões muito diferentes. O rendimento gravimétrico é o valor em porcentagem da quantidade de carvão vegetal produzido de uma determinada massa de madeira que foi submetida a carbonização.

O rendimento gravimétrico de carvão vegetal gira em torno dos limites de 25 a 35% com base na madeira seca (BRITO e BARRICHELO, 1981).

Num estudo realizado por Lelles et al., (1996) sobre carbonização da madeira de *Acacia mangium*, de dezenoves procedências, aos 9 anos de idade, onde realizou a análise química imediata do carvão vegetal produzido, observou-se nas carbonizações variações em rendimento gravimétrico de 36,59 a 40,17%.

3.3.2 Rendimentos de licor pirolenhoso e do alcatrão

Tais produtos são representados pela água (no mínimo $\frac{3}{4}$ da totalidade dos produtos condensáveis), seguido pelo ácido acético, álcool metílico, acetona e alcatrões. Normalmente os produtos condensáveis se separam por repouso, em duas camadas: uma camada inferior formada por alcatrão bruto onde o creosoto é o constituinte mais importante e uma camada superior aquosa, onde são encontrados o ácido acético, álcool metílico, acetona e alcatrões solúveis dissolvidos em 80-85% de água. Essa camada é denominada de ácido ou licor pirolenhoso (BRITO e BARRICHELO, 1981).

Segundo Ferreira (2009), nas duas primeiras fases do processo de carbonização ocorre na primeira à secagem da madeira pela vaporização da água contida nela e na segunda fase ocorre a pré-carbonização, fase esta, ainda endotérmica, em que já se obtém líquido pirolenhoso e uma pequena quantidade de gases não-condensáveis.

Pereira et al. (2000), estudando o rendimento de licor pirolenhoso diferentes espécies de eucaliptos, obteve o valor médio para *E. cloeziana* 42,0%, para *E. camaldulensis* 42,6 % e para *E. citriodora* de 45,4%.

Segundo Jankowsky (1986), partes dos gases liberados durante a carbonização podem ser condensados dando origem ao licor pirolenhoso bruto, que é composto basicamente de água, ácido acético e alcatrão dissolvido em suspensão. Por decantação separa-se o alcatrão insolúvel com um rendimento de 4% a 20% em relação ao peso inicial da madeira seca.

3.3.3 Análise química imediata

Consiste em determinar numa massa conhecida do carvão vegetal produzido, os componentes em percentual de seus valores de carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV) e cinzas (CZ).

3.3.3.1 Teor de cinzas

Quanto ao teor de cinzas, um dos aspectos mais importantes está relacionado com sua composição. Os componentes das cinzas são P, SiO₂, Al₂O₃, S, CaO, MgO, K₂O e Na₂O. A composição química das cinzas varia de árvore para árvore e de galho para tronco. (ASSIS, 2008).

Ainda neste estudo, este autor apresenta que para uma boa qualidade do carvão vegetal para injeção nos alto-fornos, são analisadas as características de melhor combustibilidade, menor quantidade de cinzas e materiais voláteis, ou seja, maior concentração de carbono.

Enquanto o carbono fixo (em maior proporção) e os materiais voláteis (em menor peso) são responsáveis pela energia, as cinzas indicam o nível e a qualidade dos resíduos da combustão do carvão. Porém, vale lembrar que o mais importante da composição química é sua estabilidade com baixa umidade (BARROSO, 2007).

O setor siderúrgico exige parâmetros mínimos de determinadas propriedades do carvão vegetal que influenciam no desempenho na produção de ferro-gusa. Segundo Gomes (2006), a faixa ideal de teor de cinzas para o carvão siderúrgico está entre 1 e 2%.

Trabalhos realizados por Lelles et al. (1996), no estudo do carvão vegetal da madeira de *Acácia mangium*, obteve resultados de tores médios de cinzas, variando de 1,33 a 2%.

3.3.3.2 Teor de materiais voláteis

São substâncias formadas pelos elementos químicos carbono, hidrogênio e oxigênio. Sua qualidade é influenciada pela lignina, estrutura da madeira e carbonização. Um aumento de materiais voláteis acarreta abaixamento no percentual de carbono fixo. A reatividade é influenciada diretamente na quantidade de material volátil do carvão vegetal. Durante o processo de combustão do carvão no interior do “*raceway*” (zona de combustão no alto-forno), verifica-se que maiores porcentagens de materiais voláteis, no carvão, aumentam a reatividade do mesmo para o carvão mineral. No caso do carvão vegetal um aumento no carbono fixo acarretará um aumento da reatividade (ASSIS, 2008).

Lelles et al. (1996), estudando teor de materiais voláteis do carvão vegetal da madeira de *Acácia mangium* de diferentes procedências obteve valores médios variando de 19,33 a 24%.

3.3.3.3 Teor carbono fixo

Após a carbonização, elementos químicos participam no carvão em diferentes proporções. A reação de carbonização da lenha, mostra que o processo de carbonização consiste, basicamente, em concentrar carbono e expulsar oxigênio, com conseqüente aumento do conteúdo energético do produto. A relação teor de carbono no carvão vegetal/ teor de carbono na lenha é de aproximadamente 1,7 (ASSIS, 2008).

As propriedades fundamentais para o carvão vegetal ser empregado no setor siderúrgico são: resistência mecânica, umidade, teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico. Cada um destes parâmetros desempenha um importante papel na produção de ferro gusa. O carvão vegetal apropriado para o setor siderúrgico deve apresentar valores considerados ótimos de teor de carbono fixo de 75 a 80% (GOMES, 2006).

O carbono fixo depende da carbonização da madeira e teor de lignina na madeira, quanto maior a quantidade de carbono fixo maior será o índice de combustão da partícula (ASSIS, 2008).

O teor de carbono fixo é dependente dos valores de matérias voláteis e de cinzas, já que é dado pela diferença do somatório destes para 100. Como os teores de cinzas variam, em limites absolutos, muito menos do que os teores de matérias voláteis, são estes que influenciam mais os valores de carbono fixo (VELLA et al. 1989).

Lelles et al. (1996), estudando teor de carbono fixo do carvão vegetal da madeira de *Acácia mangium* obteve valores médios variando de 74 a 78,67%.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material experimental

Nesse experimento utilizou-se madeira de cinco árvores da espécie *Acacia mangium* coletadas do banco germoplasma da empresa Copener Florestal, localizado na fazenda Salgado, no município de Inhambupe, Bahia. O plantio na época do corte apresentava idade de sete anos, em solo classe argissolo amarelo. As árvores coletadas apresentavam alturas entre dezessete e vinte e dois metros. O espaçamento do plantio era de 3 m x 3 m. A região apresenta precipitação pluviométrica média de 900 mm e altitude em torno de 222m.

4.2 Coleta do material

Em cada árvore foram obtidos os dados de altura total (AT), altura comercial (AC) e diâmetro à altura do peito (DAP). Foi retirado um disco de 3 cm de espessura nas seções referentes à 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial estabelecida até 8cm de diâmetro (Figura 1). Os discos de cada posição foram utilizados para determinações de densidade básica, observando sua variação no sentido longitudinal. Além disso, foi retirada uma tora de 50 cm em cada seção da árvore. Essas toras foram utilizadas para a produção de carvão no laboratório. Os dados de altura total, altura comercial e diâmetro à altura do peito (DAP), estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Altura total, altura comercial, diâmetro a altura do peito e das árvores de *Acacia mangium* amostradas.

Árvore	AT (m)	AC (m)	DAP (cm)
1	17,70	15,30	16,88
2	21,40	18,80	17,52
3	19,90	17,30	16,88
4	17,30	14,40	15,92
5	19,00	15,70	16,56



A



B

Figura 1: **A** – Derrubada e retirada de toras e discos das árvores amostradas para o experimento. **B** – Identificação das toras e discos.

4.3 Determinação da densidade básica da madeira

Os discos foram utilizados para determinação da densidade básica, retirando-se duas cunhas, diametralmente opostas e saturadas em água, e seus volumes foram determinados pelo método de imersão em água. Em seguida as amostras foram levadas a estufa a 105 ± 2 °C, para secagem onde foram mantidas até peso constante, quando foram pesadas em balança analítica modelo FA 2104N com precisão de 0,0001g. A densidade foi determinada pela relação entre o peso seco da amostra e seu volume verde conforme metodologia descrita em Vital (1984).



Figura 2: - Discos de uma árvore com marcação das cunhas opostas para serem retiradas para determinação da densidade básica.

4.4 Carbonização da madeira em laboratório

4.4.1 Preparação das amostras para carbonização

Para o procedimento da carbonização as cascas foram removidas das toras e separadas por árvores. Cada tora foi serrada em discos e depois cada disco foi picado com um facão em pedaços menores. Os materiais de cada árvore, depois de fragmentados, foram secos ao ar, até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente, constatado através de pesagens diárias de amostras, determinando assim a umidade da madeira antes da carbonização. Em seguida foram colocados em sacos plásticos para evitar a entrada de umidade.



Figura 3: **A** – Madeiras em toras das cinco árvores separadas. **B** – Toras fragmentadas e separadas por árvores. **C** – Madeira fragmentadas e separadas acondicionadas em sacos plásticos.

4.4.2 Carbonização e recuperação dos gases condensáveis

Para realização das carbonizações utilizou-se um forno elétrico mufla, com temperatura controlada de até 1200°C modelo 1612 N1100 conforme a Figura 4 A, onde a madeira foi colocada em um compartimento onde ocorre a carbonização, que é conectado a um sistema de recuperação que funciona por meio de dois condensadores em série que realiza trocas de calor, que faz com que a fumaça canalizada possa passar pelo primeiro condensador esfriando e transformada em licor pirolenhoso e alcatrão, armazenados em um kitasato, em seguida passa pelo segundo condensador melhorando a eficácia da recuperação. Os gases não condensáveis são queimados (Figura 4 B). A temperatura inicial foi a temperatura ambiente, aproximadamente 26°C, a taxa de aquecimento foi de 2°C por minuto e a temperatura máxima foi de 450°C, permanecendo estabilizada nessa temperatura por um período de 30 minutos.

Nas carbonizações, as amostras utilizadas para ensaio apresentavam aproximadamente 2,2 Kg. Antes das carbonizações foram determinados os teores de umidade das amostras, para se determinar o peso seco real da madeira utilizada e assim o rendimento gravimétrico das carbonizações.



Figura 4: **A** – Adaptação do forno elétrico mufla modelo 1612 N1100, para carbonização e condensação de gases condensáveis. **B** – Queima de gases não condensáveis durante o processo de carbonização. **C** – Kitasatos para captura dos gases condensados.

4.5 Rendimento gravimétrico, de licor pirolenhoso e de alcatrão

Depois de cada carbonização, as amostras de carvão foram pesadas e determinado os teores de umidade de cada uma delas. Com o peso seco do carvão e o peso seco da madeira calculou-se o rendimento gravimétrico da carbonização utilizando-se a fórmula:

$$RG = psc / psm * 100, \text{ onde:}$$

RG = Rendimento gravimétrico de carvão (%)

psc = peso seco do carvão (g)

psm = peso seco da madeira (g)

Utilizando-se o peso do volume líquido do alcatrão, do licor pirolenhoso (Figura 5) e o peso da madeira seca de cada carbonização foram determinados os rendimentos calculados pelas fórmulas:

$$RA = pA / psm * 100 \quad e \quad RLP = pLP / psm * 100, \text{ onde:}$$

RA = Rendimento de alcatrão (%)

RLP = rendimento de licor pirolenhoso (%)

pA = peso do alcatrão (g)

pLP = peso do licor pirolenhoso (g)

psm = peso seco de madeira (g)



Figura 5: Procedimento de pesagem do licor pirolenhoso e alcatrão.

4.6 Análise química imediata

Para a realização das determinações utilizou-se amostra triplicata com base na metodologia das normas ABNT NBR 8112/83. Uma amostra de carvão foi retirada de cada carbonização que foi moída em moinho de madeira (Figura 6 A). Em seguida, o material foi peneirado em peneiras de 20 e 100 mesh. (Figura 6 B). As amostras que passaram pela peneira de 20 mesh e na peneira de 100 mesh foram utilizadas nas análises posteriores.



A



B

Figura 6: A - Moinho utilizado para moer as amostras de carvão. B – Peneiras de 20 e de 100 mesh.

4.6.1 Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade do carvão, foram retiradas amostras representativas do carvão moído, peneirado e classificado. Em seguida, pesadas nos cadinhos, e secas em estufa a $105 \pm 2^\circ \text{C}$ até peso constante sendo determinado o peso seco. As amostras foram pesadas em uma balança analítica modelo FA 2104N de precisão 0,0001g. O teor de umidade foi determinado pela equação:

$$TU = ((m_o - m_1) / m_o) * 100, \text{ onde:}$$

TU = Teor de umidade (%)

m_o = massa inicial (g)

m_1 = massa seca (g)



A



B

Figura 7: **A** – Amostras das três carbonizações de cada árvore e os cadinhos utilizados.

B – Balança analítica modelo FA 2104N utilizada nas análises.

4.6.2 Teor de Cinzas

Para determinação do teor de cinzas utilizou-se 1 grama a.s. (absolutamente seco) das amostras de carvão moído, peneirado e classificado, e colocadas em cadinhos de porcelana sem tampa e levados a uma mufla, onde foram aquecidas a uma temperatura de 750°C até a queima completa do carvão, que durou aproximadamente 4 horas (Figura 8 A). Ao final do processo os cadinhos foram transferidos para dessecadores com sílica gel em seu interior (Figura 8 B), até o resfriamento e depois, foram pesados. Os teores de cinzas foram obtidos através da equação:

$$CZ = (m_o / m_1) * 100, \text{ onde:}$$

CZ = Teor de cinzas (%)

m_o = peso de cinzas (g)

m_1 = peso a.s. de carvão moído (g)



Figura 8: **A** - Compartimento do forno elétrico mufla modelo 0212 J 200, com os cadinhos contendo as amostras de carvão pesadas. **B** - Dessecadores com sílica gel em seu interior.

4.6.3 Teor de Matérias Voláteis

Na determinação do teor de matérias voláteis utilizou-se o recipiente cadinho de porcelana com tampa, onde foi colocada para cada amostra 1 grama a.s. de carvão moído, peneirado e classificado (Figura 9 C). Em seguida os cadinhos foram tampados e colocados na porta da mufla a uma temperatura de 950°C por 3 minutos (Figura 9 A), após esse tempo os mesmos foram acondicionadas dentro da mufla por um período de 7 minutos (Figura 9 B). A equação usada para obter do teor de materiais voláteis foi:

$$MV = (m_0 / m_1) * 100, \text{ onde:}$$

MV = Materiais voláteis (%)

m_0 = Diferença entre o peso inicial e o peso da amostra após a queima à 950°C (g)

m_1 = peso a.s. de carvão inicial (g)

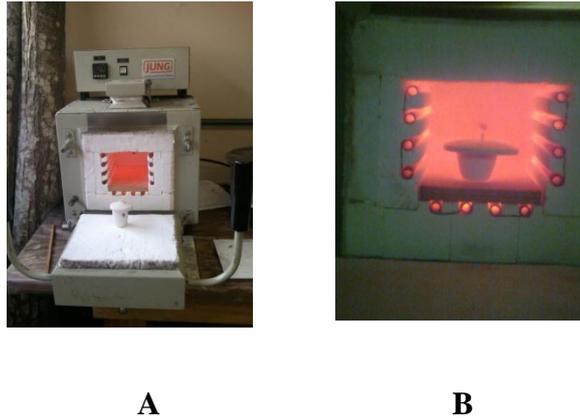


Figura 9: **A** – Cadinho tampado com amostra na porta do forno elétrico mufla modelo 0212 J200, durante 3 minutos na temperatura de 950°C. **B** – Cadinho tampado com amostra submetido à 950°C durante 7 minutos.

4.6.4 Teor de Carbono Fixo

O carbono fixo é uma medida indireta, foi calculado de acordo com a equação abaixo:

$$CF = 100 - (CZ + MV), \text{ onde:}$$

CF = Teor de carbono fixo, (%)

CZ = Teor de cinzas, (%)

MV = Teor de materiais voláteis, (%)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Densidade Básica da Madeira

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a densidade básica da *Acacia mangium* a diferentes porcentagens da altura comercial das árvores amostradas. Os resultados de densidade básica média da madeira apresentaram variações no sentido longitudinal do tronco, decrescendo da base para o topo.

Tabela 2: Densidades básicas médias e coeficiente de variação em diferentes porcentagens da altura comercial das árvores de *Acacia mangium*

Seções	Densidade Média g/cm ³	CV%
100%	0,309	10,35
75%	0,345	6,61
50%	0,352	2,93
25%	0,367	5,16
0%	0,418	5,89

Estes resultados de densidade básica são inferiores ao valores encontrados em plantios comerciais de nove anos de idade no estado de Roraima, de 0,483 g/cm³ conforme resultado de Tonini et al. (2010).

Estes resultados podem ser atribuídos à árvores utilizadas neste trabalho terem sido provenientes de um banco germoplasma sem nenhum manejo comparado aos dos plantios comerciais do estado de Roraima, bem como a idade inferior. Podemos atribuir também a melhoramento genético que a espécie tenha sido submetida com o objetivo de buscar cada vez mais variedades com maior densidade básica da madeira, e adaptação edafoclimáticas na região. Conforme relatado por Zobel e Talbert, (1984) no trabalho de Trugilho et al.(2005).

5.2 Análise da Carbonização e dos Rendimentos

Na carbonização a desidratação foi observada pelas primeiras gotas de água condensadas nos kitasato, na temperatura média de 153°C. O início da condensação do licor pirolenhoso e do alcatrão foi observado na temperatura média de 250°C.

Os resultados médios de rendimentos das carbonizações e da análise química imediata do carvão vegetal produzido encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Rendimentos da carbonização e de análise química imediata do carvão de madeira de *Acacia mangium* com sete anos de idade.

Parâmetros Analisados	MÉDIA %	CV%
RG	32,71	5,38
RLP	30,95	21,56
RA	5,37	40,51
CZ	1,11	19,52
MV	17,80	13,87
CF	81,09	2,90

Valores médios de três repetições por árvore

5.2.1 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

A determinação do rendimento gravimétrico da madeira em carbonizações é de grande importância, principalmente nas grandes empresas do setor siderúrgico, onde o carvão vegetal é bastante utilizado, originado de madeira de reflorestamento, que são fontes de energia renováveis. O valor médio do rendimento gravimétrico observado foi de 32,71%. Esses valores estão de acordo com os limites de 25% a 35% com base na madeira seca, relatados por Brito e Barrichelo (1981), e inferiores aos valores médios no intervalo de 36,59 a 40,17% obtidos por Lelles et al. (1996).

De acordo com Brito e Barrichelo, (1977) madeira com menor densidade básica influencia diminuindo no rendimento gravimétrico do carvão vegetal.

5.2.2 Rendimento de licor pirolenhoso e de alcatrão

O valor médio obtido dos resultados de rendimento do licor pirolenhoso foi de 30,95%, ficando abaixo quando comparado ao encontrado para *Eucalyptus citriodora* de 45,4% por Pereira et al., (2000).

O rendimento médio de alcatrão encontrado foi de 5,37% dentro da faixa de 4 a 20% de acordo com Jankowsky (1986).

5.2.3 Teor de cinzas

O resultado obtido de teor médio de cinzas foi de 1,11%. Esse valor é menor em relação aos valores de 1,33 a 2% encontrados por Lelles et al., (2008). Essa pequena diferença em relação aos valores observados, pode ser atribuído a os teores de cinzas variarem, em

limites absolutos, muito menos do que os teores de materiais voláteis, bem como pela remoção da casca antes da carbonização influenciando nos teores de cinzas segundo Vella et al. (1989),

Este valor encontra-se também dentro da faixa ideal de 1 a 2% de cinzas, exigida pelas siderúrgicas, estabelecendo um maior desempenho na produção de ferro-gusa segundo Gomes (2006).

5.2.4 Teor de matérias voláteis

O teor médio de materiais voláteis encontrado foi de 17,8% se apresentando menor em relação aos obtidos por Lelles et al., (1996) entre 19,33 a 24%. Provavelmente esse resultado obtido pode ser atribuído à remoção das cascas da madeira antes da carbonização, influenciando na diminuição do teor de matérias voláteis do carvão vegetal de acordo com Vella et al. (1989).

5.2.5 Teor de carbono fixo

O teor médio de carbono fixo encontrado nas análises foi de 81,09%. Quando comparado com o trabalho de Lelles et al. (2008) , onde obteve valores na faixa de 74 a 78%, essa média é superior.

Este valor de teor médio de carbono fixo está dentro das exigências consideradas ótimas na produção de carvão vegetal pra siderurgia, que deve ter no mínimo 75 a 80% de carbono. (GOMES, 2006).

Este valor médio de carbono fixo não está de acordo com os resultados de 74 a 78,6% encontrados por Lelles et al., (1996). Isto provavelmente deve está relacionado com a remoção das cascas da madeira antes da carbonização, influenciando nos teores de matérias voláteis do carvão vegetal que por sua vez interfere nos valores de carbono fixo, conforme Vella et al. (1989).

6 CONCLUSÕES

Os valores médio de densidade básica da madeira de *Acacia mangium* com sete anos de idade, mostraram variações no sentido longitudinal do tronco decrescendo com a altura até o diâmetro comercial, variando de 0,418 a 0,309 g/cm³. Estes valores podem variar conforme a idade da árvore.

Os estudos das propriedades do carvão vegetal da espécie *Acacia mangium* apresentaram como resultados rendimento gravimétrico 32,71 %, rendimento de licor pirolenhoso 30,95%, rendimento de alcatrão 5,37 %, teor de cinzas 1,11 %, matérias voláteis 17,80 % e carbono fixo 81,09 %.

Apesar de apresentar rendimento gravimétrico não muito elevado quando a carbonização é realizada a 450°C, o carvão vegetal obtido é de boa qualidade por apresentar teor de carbono fixo da ordem de 81,09% e baixo teor de cinzas, dentro da exigências do setor siderúrgico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Carvão Vegetal - Análise Imediata**. NBR-8112

ANTUNES, F. S. **Avaliação da qualidade da madeira das espécies *Acacia crassicarpa*, *Acacia mangium*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus glóbulos* e *Populus tremuloides***. Dissertação. Piracicaba, SP p 82. 2009.

ARAÚJO, M. S.; **Manejo de espécies florestais para produção de madeira, forragem e restauração de áreas degradadas**. EMPARN. Natal RN p 12, 2010.

ASSIS, C. F. C. **Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte**. REDEMAT, Ouro Preto MG p1-113 2008.

BARROSO, R. C. **Redução do teor de cinzas dos finos de carvão vegetal por concentração gravítica a seco**. Dissertação de mestrado. UFMG, Belo Horizonte, MG. p 1-98, 2007.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia**. Série Técnica. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Departamento de Silvicultura da ESALQ – USP, v. 2, nº 5, p. 1-25. Piracicaba, 1981.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E.G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de Eucalipto**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Departamento de Silvicultura da ESALQ – USP n.14 p 9-20. Piracicaba, 1977.

CASTRO, R. R.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G. e OLIVEIRA, L. R. **Retratibilidade econômica e risco na produção de carvão vegetal**. CERNE, v.13 n.2, p353-354, 2007.

COELHO, S. T. **Carvão vegetal, aspectos técnicos, sociais, ambientais e econômico**. Cenbio, IEE/USP, São Paulo SP 2008.(Norma técnica X).

FERREIRA, O. C. O futuro do carvão vegetal na siderurgia: emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo do carvão vegetal. **Revista Economia e Energia**, v. 4, n.21, 2000. <http://ecen.com/eee21/emiscar2.htm>. 20 Mai. 2009.

FOEKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. **Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas**. IPEF Piracicaba SP p.65-74, 1971

GOMES, M. T. M. **Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsas de mercadoria** (Dissertação de mestrado apresentada à comissão do Programa Pós Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

JANKOWSKY, I. P. **Os creosotos na preservação de madeiras**. IPEF, Piracicaba SP. n 34, p 5-14, 1986.

LELLES, J. G.; SILVA, F. P. & SILVA, J. **Caracterização** do carvão vegetal produzido a partir da madeira *Acacia mangium*. **Revista árvore**, Viçosa MG, vol. 20 n° 1 p 87-92 1996.

LIANG, S. B.; GAN, E. Performance of Acacia species on four sites of Sabah Florest Industries. In: TURNBULL, J. W. **Advances in tropical acacia research**. Canberra, AU: ACIAR, 1991. p. 159-165. (ACIAR Proceedings, n. 35)

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Mangium and other fast-growing Acacias for the humid tropics**. Washington, DC: National Academy Press, 1983. 57p.

NETTO, G. B. F. OLIVEIRA, A. G. P.; COUTINHO, H. W. M.; NOGUEIRA, M. F. M. & RENDEIRO, G. **Caracterização Energética de Biomassas Amazônicas**. An. 6. Enc. Energ. Meio Rural 2006. Disponível <<http://www.proceedings.scielo.br>> Acesso em 14 jun 2010.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V. & SHINIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Embrapa Floresta. Calombo, PR. 113p. 2000.

SMIDERLE, O. J.; TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; SCHWENGBER, L. A. M. **Coleta, Beneficiamento e Qualidade de Sementes de *Acacia mangium* Willd em Roraima**. Embrapa, Boa Vista RR p1-6, 2009.

TONINI, H.; HALFELD-VIEIRA, B. A. & SILVA, S. J. R. ***Acacia mangium*, características e seu cultivo em Roraima**. Embrapa, Roraima, 2010. 145 p.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. & MENDES, L. F. B. M. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

VELLA, M. M. C. F.; VALENTE, O. F.; VITAL, B. R. & LELLES, J. G. **Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido**. Departamento de Engenharia Florestal. UFV. Viçosa, MG. IPEF, n.41/42 p 64-76 1989.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, SIF, 1984. 21p. (Boletim técnico, 1).