

Qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* visando à produção de carvão vegetal siderúrgico

Thiago de Paula Protásio
Michael Douglas Roque Lima
Udson de Oliveira Barros Junior
Lina Bufalino
Arystides Resende Silva
Delman de Almeida Gonçalves
Paulo Fernando Trugilho

Introdução

A energia proveniente da biomassa é uma alternativa econômica eficaz, sustentável e viável para suprir as demandas de diversos setores da sociedade (Silva et al., 2015; Silva, 2019) e representa mais de 30% da matriz energética nacional. No Brasil, no que se refere aos povoamentos florestais comerciais, há preponderância do plantio de espécies dos gêneros *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Pinus*. De acordo com o Relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2021), o Brasil possui cerca de 9,55 milhões de ha de florestas plantadas, dos quais 7,47 milhões de ha são de espécies do gênero *Eucalyptus*, 1,7 milhões de ha de *Pinus* e 382 mil ha de outras espécies, especialmente *Hevea brasiliensis*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis* e *Schizolobium amazonicum*. Deste total de áreas plantadas, cerca de 14% são destinados exclusivamente à produção de carvão vegetal para siderurgia, atividade de destaque no País.

Nos estados do Pará e Maranhão, onde está localizado o polo siderúrgico de Carajás, segundo maior do Brasil, há necessidade de biomassa e carvão vegetal para geração de energia (Silva, 2019). Contudo, atualmente, os plantios florestais homogêneos são incipientes nesses estados da Amazônia brasileira. Com o aumento da demanda por florestas energéticas, a espécie *Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima, vulgarmente conhecida como tachi-branco ou carvoeiro, pode ser destaque na produção e diversificação da base florestal energética do Brasil (Martorano et al., 2018). Além disso, essa espécie já está adaptada às condições edafoclimáticas da região, o que alivia a pressão sobre o ecossistema nativo remanescente (Farias et al., 2016; Guimarães et al., 2018). Neste sentido, a utilização de espécies nativas em plantios supriria as necessidades dos setores siderúrgico e madeireiro, reduzindo impactos ambientais, tal como o desmatamento.

T. vulgaris é uma espécie pioneira pertencente à família Fabaceae-Caesalpinoideae, com elevado potencial para a recuperação de áreas degradadas (Campos-Filho, 2009). Souza et al. (2008) reportaram que a espécie apresenta excelente potencial para plantios comerciais na região Amazônica. Pesquisas recentes demonstraram que a madeira de *T. vulgaris* apresenta propriedades físico-químicas e térmicas adequadas aos processos de conversão termoquímicos, especialmente pirólise e combustão (Silva et al., 2021a; 2021b). A madeira de *T. vulgaris* proveniente de plantações experimentais apresentou densidade energética de 9,15 GJ m⁻³, aos sete anos de idade (Silva et al., 2021b). Esse valor é comparável à densidade energética de clones comerciais de *Eucalyptus* amplamente utilizados no Brasil, para fins energéticos em que se constata variação de 8,2-10,3 GJ m⁻³ (Protásio et al., 2020). Além disso, a espécie possui rápido crescimento em altura após o plan-

tio, podendo atingir 4,5 m de incremento médio anual e rápido acúmulo volumétrico (Rodrigues et al., 2020), com incremento médio anual variando de 20-25 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, nas idades de 3-11 anos (Patrício, 2021). Em plantações experimentais de *T. vulgaris*, com espaçamento de 3 m x 3 m, foram estimadas produções volumétricas variando de aproximadamente 133-476 m³ ha⁻¹, nas idades entre 6 anos e 11 anos, respectivamente (Souza et al., 2008; Rodrigues et al., 2020; Patrício, 2021).

A espécie *T. vulgaris* apresenta ampla distribuição nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica e tem sido recomendada para recuperação de áreas degradadas e utilizada na produção de lenha, carvão vegetal e madeira serrada devido às suas características tecnológicas, ecológicas e silviculturais. Entretanto, pouco se conhece sobre o crescimento dessa espécie considerando diferentes tratamentos silviculturais e sítios, além de suas implicações nas propriedades do lenho visando múltiplos usos como, por exemplo, madeira para geração de bioenergia ou abastecimento da construção civil. Há escassez de informações detalhadas das propriedades do lenho de árvores plantadas de *T. vulgaris*, especialmente nas condições edafoclimáticas da Amazônia. Além disso, deve-se considerar que as plantações experimentais de tachi-branco são provenientes de sementes selvagens e, portanto, o conhecimento do efeito da variabilidade genética e ambiental no comportamento tecnológico da madeira se torna fundamental para atender aos distintos usos.

Nos últimos anos, pesquisas relacionadas à silvicultura e manejo de espécies nativas se concentraram, principalmente, a entender o efeito de fatores como: espaçamento de plantio (Tonini et al., 2018; Rodrigues et al., 2020; Silva et al., 2021b; Barros Júnior et al., 2022), nutrição mineral (Oliveira et al., 2008), testes de procedências e progênies (Cruz et al., 2020), nas características dendrométricas e na produtividade de madeira. Avaliar o efeito da idade, espaçamento, sítio, dentre outros fatores ambientais e efeitos genéticos é de suma importância quando se planeja a domesticação de uma espécie arbórea para posterior realização de plantios homogêneos para fins energéticos. Uma das características primordiais a se definir no início do plantio é o espaçamento, visto que este interfere na produção de massa seca por árvore, área basal, diâmetro e altura (Eloy et al., 2015); além da idade de corte, qualidade da madeira e, conseqüentemente, nos custos de produção (Moulin et al., 2017). Por isso, as pesquisas com *T. vulgaris* precisam avançar para o melhor entendimento dos efeitos de espaçamento, idade e do tipo de fuste nas propriedades da madeira, que podem afetar diretamente a produção e propriedades do carvão vegetal. Estas pesquisas visam subsidiar a criação de protocolos de manejo e a definição das melhores estratégias para maximizar a produtividade energética por unidade de área.

Estudos com tecnologia e utilização de produtos florestais têm avançado na análise de espécies exóticas, por exemplo, dos gêneros *Eucalyptus*, *Pinus*, *Khaya*, *Tectona* e *Toona*. Entretanto, é necessário conhecer os atributos de qualidade da madeira de árvores de espécies nativas da Amazônia quando cultivadas, como o *T. vulgaris*. Ademais, o comportamento físico-mecânico e a composição química da madeira jovem de *T. vulgaris* são desconhecidos, bem como a sua plasticidade fenotípica. Portanto, definir os potenciais usos do lenho dessas árvores é fundamental para a diversificação da cadeia produtiva do setor de base florestal na Amazônia.

Diante do exposto, o presente estudo visa esclarecer como o espaçamento afeta as propriedades da madeira, rendimento da carbonização e densidade relativa aparente do carvão vegetal de *T. vulgaris* produzido em condições de laboratório. As pesquisas foram realizadas no âmbito da "Rede brasileira de pesquisa em crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* (tachi-branco), proveniente de plantações homogêneas, para geração de bioenergia na Amazônia", coordenada pelo Professor Thiago de Paula Protásio da Universidade Federal Rural da Amazônia.

Efeitos do espaçamento de plantio sobre a qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris*

Variações importantes da densidade básica da madeira foram reportadas para *T. vulgaris*, aos 87 meses (0,386-0,610 g cm⁻³) e 102 (0,419-0,624 g cm⁻³) meses de idade (Figura 1). A análise de variância indicou efeito significativo do espaçamento sobre a densidade básica da madeira das árvores, aos 87 meses. Por outro lado, esse efeito não foi reportado para a densidade básica dessas madeiras, aos 102 meses (Lima et al., 2022). Dessa forma, para obter madeiras mais densas, independente do espaçamento de plantio, deve-se considerar a idade ideal de colheita das árvores. Cabe salientar que a densidade básica da madeira é um dos principais índices utilizados para a classificação de espécies destinadas à produção de carvão vegetal, em que madeiras com densidade básica elevada resultam em carvões densos. Os maiores espaçamentos influenciaram positivamente nos valores de densidade básica média de *T. vulgaris*, para a idade de 87 meses (Figura 2), em que os espaçamentos de 9,0 m² e 12,0 m² apresentaram os maiores valores, sendo em média 0,505 g cm⁻³ e 0,522 g cm⁻³, respectivamente.

Figura 1. Variação da densidade básica de madeiras de *Tachigali vulgaris*, aos 87 e 102 meses de idade, em diferentes espaçamentos de plantio.

Fontes: Adaptado de Barros Júnior (2020), Silva et al. (2021b) e Lima et al. (2022).

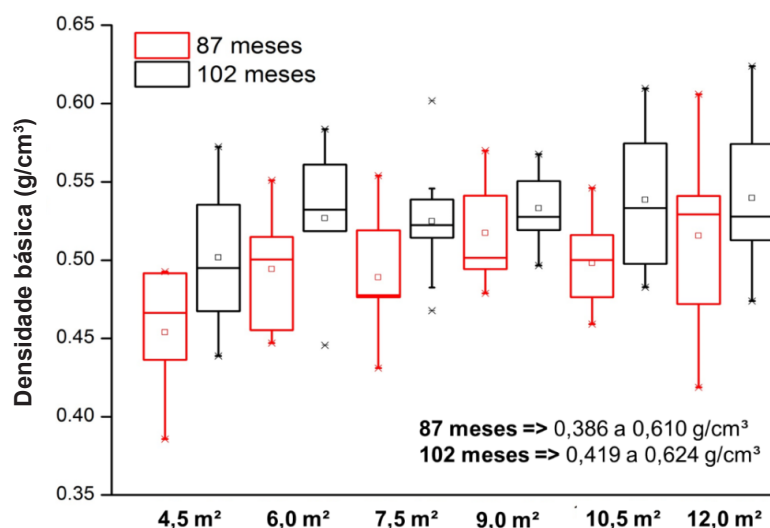
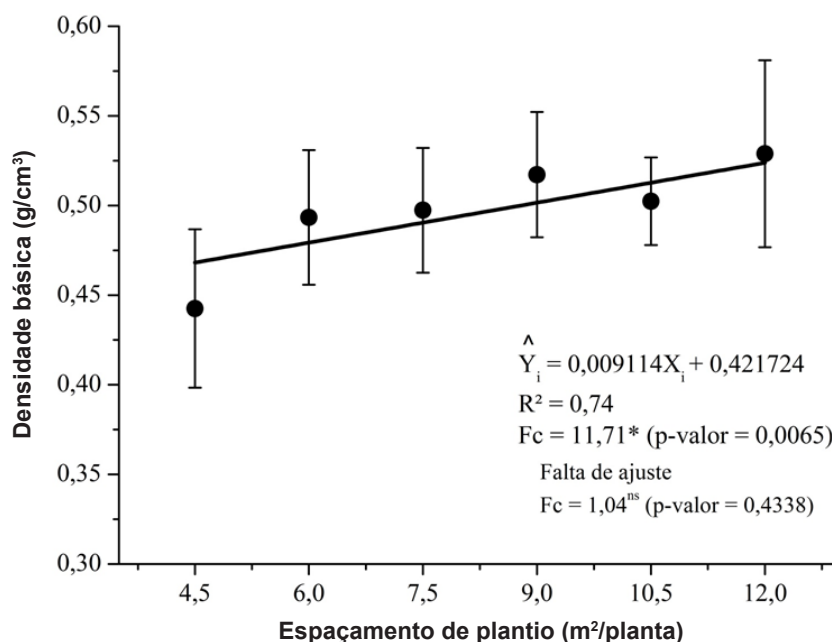


Figura 2. Comportamento da densidade básica da madeira em árvores de *Tachigali vulgaris*, aos 87 meses de idade, em função do espaçamento de plantio.

Fonte: Barros Júnior et al. (2022).



Para a idade de 87 meses, portanto, os maiores espaçamentos propiciaram árvores com maior densidade básica da madeira e, conseqüentemente, maior quantidade de energia estocada por metro cúbico. Isto pode ser importante do ponto de vista econômico, visto que se pode economizar no custo de implantação, na colheita e no transporte de madeira, se a floresta for implantada sob espaçamentos maiores (Moulin et al., 2017). Possivelmente, nos menores espaçamentos, a competição por luz e espaço entre as árvores acelerou os mecanismos de absorção de luz e nutrientes (Sereghetti et al., 2015). Assim, propriedades do lenho como a densidade tem seu desenvolvimento mais lento. Nos maiores espaçamentos, há uma maior área útil por árvore e, conseqüentemente, maior volume individual, bom desenvolvimento das raízes e da copa e disponibilidade de nutrientes para o aumento da densidade da madeira (Silva et al., 2021b). Em termos gerais, o espaçamento de 9,0 m², comparado ao 10,5 m² e 12,0 m², proporcionou produtividade volumétrica similar com menor número de árvores plantadas (Barros Júnior, 2020; Patrício, 2021), logo, apresenta melhor desempenho em termos de crescimento individual e por hectare, sem alterar negativamente a qualidade da madeira para geração térmica e produção de carvão vegetal com finalidades domésticas e industriais. Além disso, o espaçamento com área de 9,0 m² apresentou, em média, 65,59 % de árvores bifurcadas, enquanto os espaçamentos 10,5 m² e 12,0 m² apresentaram 76,30% e 72,99%, respectivamente (Patrício, 2021).

Aos 102 meses de idade, as árvores apresentaram menor variabilidade de densidade da madeira (Silva, 2019; Lima et al., 2022). Para a idade de 87 meses, os coeficientes de variação encontrados para a densidade básica média da madeira foram 8,00% e 8,32% para as árvores bifurcadas e não bifurcadas, respectivamente. Já na idade de 102 meses, os coeficientes de variação encontrados para a densidade básica média da madeira foram 5,91% e 6,41% para as árvores bifurcadas e não bifurcadas, respectivamente. Esses resultados comprovam que o acréscimo da idade proporcionou melhoria na qualidade e diminuição da heterogeneidade do lenho. Embora a espécie *T. vulgaris* seja descrita na literatura por apresentar fuste reto (Melo; Haridasan, 2010; Farias et al., 2016; Tonini et al., 2018), no plantio experimental realizado em Monte Dourado, PA, foi significativa a quantidade de árvores bifurcadas. Geralmente, as árvores bifurcadas apresentaram maior produção individual de madeira (Silva, 2019), mas, dependendo da idade de colheita, a densidade básica pode ser menor em árvores com múltiplos fustes (Lima et al., 2022). Dessa forma, há necessidade de trabalhos científicos que elucidem melhor as causas da formação desse tipo de fuste em *T. vulgaris*, haja vista que foi uma característica presente em todos os espaçamentos de plantio testados.

A menor densidade básica do lenho é uma característica desvantajosa para a produção energética, pois, quanto mais densa a madeira, maior será a quantidade de energia por unidade de volume e maior a produtividade de carvão vegetal por forno e melhores as propriedades do biorredutor. Há relatos na literatura da influência positiva da densidade da madeira nas propriedades físicas e mecânicas do carvão vegetal, destacando que essa característica do lenho deve ser considerada para a classificação de espécies visando plantios destinados à produção de biorredutor. Desta forma, fica evidente o efeito negativo da bifurcação na madeira de *T. vulgaris*, aos 87 meses, acarretando diminuição na sua densidade básica que poderá resultar em carvão vegetal com propriedades inferiores. No entanto, de acordo com os dados obtidos nesta experimentação, aos 102 meses, não há diferença na densidade básica de árvores bifurcadas e não bifurcadas. Além da rotação silvicultural, a idade deve ser considerada como fator importante nas alterações das propriedades da madeira.

O espaçamento de plantio não afetou significativamente o poder calorífico superior (PCS) da madeira de *T. vulgaris*, pois não foram detectadas diferenças nos teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre no lenho das árvores dessa espécie. Os valores reportados para o PCS

e para os componentes químicos elementares da madeira de *T. vulgaris* corroboram seu potencial energético, especialmente quando comparados com valores registrados na literatura para madeiras frequentemente utilizadas para essa finalidade, como àquelas do gênero *Eucalyptus*. A Figura 3 demonstra que os valores de PCS da madeira de *T. vulgaris* (4.720 cal g^{-1}) e *Eucalyptus* spp. (4.629 cal g^{-1}) são muito próximos. *T. vulgaris* apresentou valores de carbono (C = 49,8%) e hidrogênio (H = 6,3%) similares aos verificados para as madeiras de *Eucalyptus* spp. Ambas as madeiras apresentam valores de cinzas considerados baixos ($\leq 1\%$).

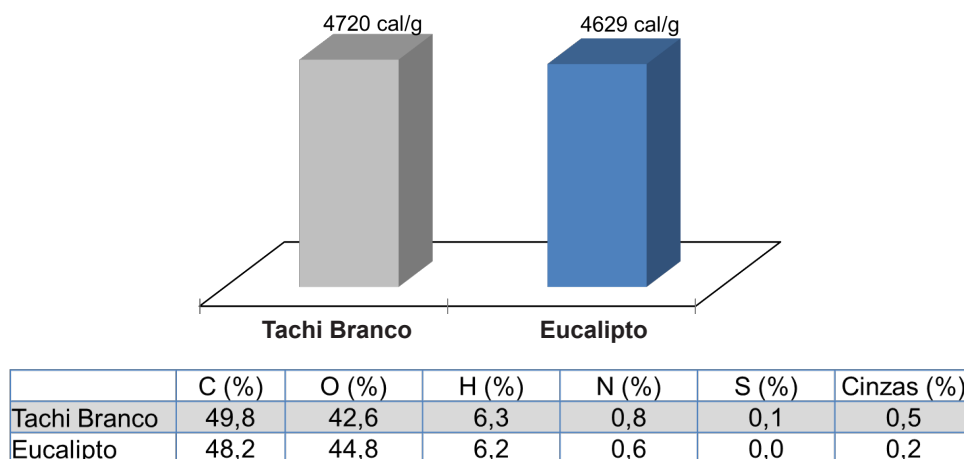


Figura 3. Poder calorífico e química elementar de madeira de *Tachigali vulgaris* e *Eucalyptus* spp.

Fontes: Protásio et al. (2019) e Silva et al. (2021b).

Madeiras com elevados valores de C e H tendem a liberar maior quantidade de energia durante a queima direta, pois esses elementos são combustíveis. Os valores de C e H são ligeiramente maiores que os reportados em madeiras de *Eucalyptus* spp., o que justifica os valores médios de PCS das madeiras comparadas e o potencial energético de *T. vulgaris*.

Efeitos do espaçamento de plantio sobre a produção e qualidade do carvão vegetal de *Tachigali vulgaris*

O espaçamento de plantio não influencia significativamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) produzido sob condições de laboratório (taxa de aquecimento = $1,67 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ e temperatura final de carbonização = $450 \text{ }^\circ\text{C}$). Por outro lado, o valor médio reportado para o RGC de madeiras de *T. vulgaris* (35,9%) é próximo aos valores reportados para *Eucalyptus* spp. (34,5%) e *Corymbia citriodora* (35,9%), demonstrando seu potencial para produção de carvão vegetal (Figura 4).

De acordo com Siqueira et al. (2020), o carvão da espécie *T. vulgaris*, proveniente de madeiras de áreas de Cerrado, apresentou densidade aparente (298 kg m^{-3}), baixo teor de cinzas (1,14%), elevado teor de carbono fixo (76,32%) e PCS (7.615 cal g^{-1}). Considerando as mesmas condições de pirólise descritas anteriormente e, a partir do estudo de madeiras de *T. vulgaris* provenientes de áreas de Cerrado, Siqueira et al. (2020) reportaram RGC de 35%. Esse valor é próximo ao obtido para a carbonização de madeiras dessa espécie provenientes de florestas plantadas e indica que o rendimento da carbonização é pouco afetado pelos tratamentos silviculturais e idade.

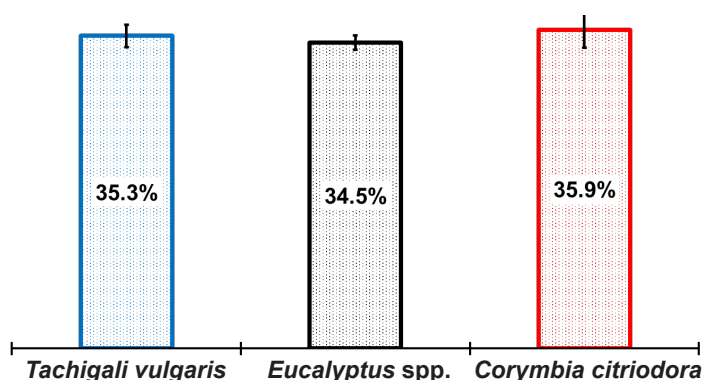


Figura 4. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal da carbonização de madeiras de *Tachigali vulgaris*, *Eucalyptus spp.* e *Corymbia citriodora*.

Fontes: Adaptado de Couto et al. (2015), Barros Junior (2020) e Protásio et al. (2021).

Valores elevados de RGC são importantes do ponto de vista econômico, especialmente quando a produção interfere diretamente nas receitas de uma unidade produtora de carvão vegetal, embora os resultados médios apresentados sejam de carbonizações realizadas em laboratório.

Além disso, Siqueira et al. (2020) destacaram que a carbonização de uma tonelada de madeira de *T. vulgaris* resultaria em produtividade de carbono fixo de 265 kg. Já Protásio et al. (2021) reportaram que a carbonização de uma tonelada de madeira de *Eucalyptus* jovens propiciaria a obtenção de 259 kg de carbono fixo, nas mesmas condições de processo. Dessa forma, pode-se constatar que os rendimentos gravimétricos da carbonização da madeira de tachi-branco e eucalipto são próximos e isso reforça o potencial dos reflorestamentos com árvores de *T. vulgaris* como excelente alternativa para o abastecimento das indústrias siderúrgicas da região Norte e Nordeste do Brasil. No entanto, conforme destacado por Trugilho et al. (2001) e Protásio et al. (2021), é fundamental a análise dos parâmetros de crescimento para a correta escolha de espécies, procedências, progênies ou clones para a produção de carvão vegetal siderúrgico. É necessário implementar o programa de melhoramento genético de *T. vulgaris* para a seleção de genótipos com maior densidade da madeira. Nesse aspecto, Siqueira et al. (2020) e Silva et al. (2021b) comentaram que a densidade da madeira da espécie é considerada baixa (493 kg m^{-3}) e, segundo Protásio et al. (2021), a carbonização de madeiras com densidade $< 500 \text{ kg m}^{-3}$ não favoreceu o uso eficiente do volume dos fornos retangulares. Segundo os autores, isso pode resultar na produção de carbono fixo até 10% menor, comparativamente a madeiras com densidade básica $> 550 \text{ kg m}^{-3}$.

Quanto ao tipo de fuste, os resultados das pesquisas recentes demonstraram que árvores bifurcadas apresentaram densidade da madeira e, conseqüentemente, densidade aparente do carvão vegetal inferior às árvores não bifurcadas, considerando a idade de 87 meses (Barros Júnior, 2020). A densidade aparente do carvão vegetal obtida a partir da madeira das árvores de múltiplos fustes foi 6,80% inferior ao observado para o carvão vegetal das árvores de fuste único (Barros Júnior, 2020). Além disso, há relação direta entre a densidade da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal (Figura 5), ou seja, madeiras mais densas produziram carvões de maiores densidades, corroborando com o relatado por Trugilho e al. (1997). Esse resultado demonstra a relevância do tipo de fuste e, conseqüentemente, a densidade da madeira como características decisivas na classificação e seleção de espécies para a produção de carvão vegetal.

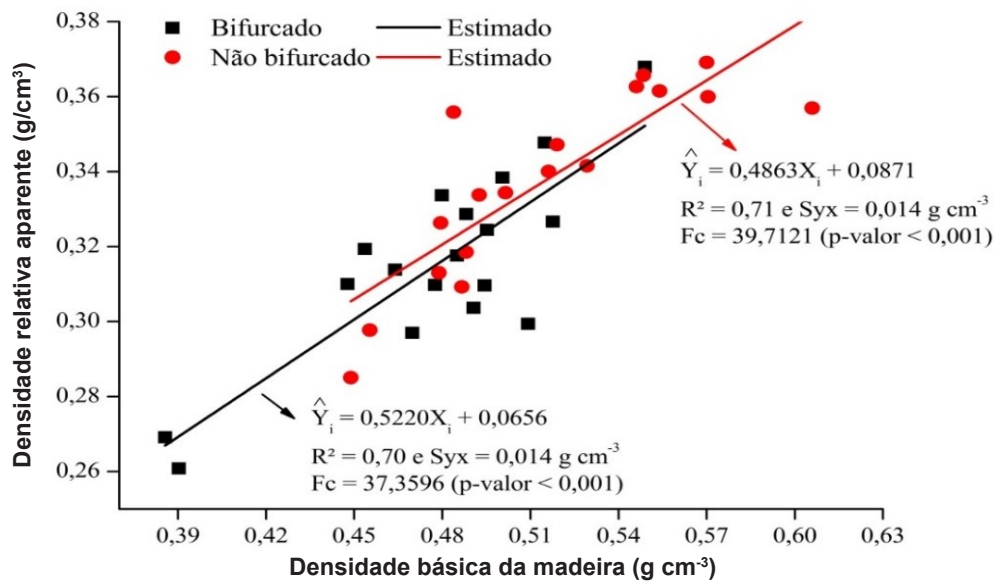


Figura 5. Efeitos da densidade da madeira e tipo de fuste na densidade relativa aparente do carvão de *Tachigali vulgaris*.

Fonte: Barros Júnior (2020).

As árvores de múltiplos fustes apresentaram maior variabilidade da densidade aparente do carvão vegetal, sendo uma característica indesejável. Para uso siderúrgico, deseja-se carvão vegetal com propriedades mais homogêneas e com maiores valores de densidade. A densidade relativa aparente é uma importante propriedade a ser considerada na destinação do carvão vegetal como biorreduzidor na siderurgia, pois quanto maior o seu valor, maior será a sua resistência à compressão e melhor será a ocupação do alto forno siderúrgico. Dessa forma, as árvores de fuste único, na idade de 87 meses, demonstraram apresentar melhor aptidão na produção de carvão vegetal.

Nas mesmas condições de pirólise, os carvões vegetais produzidos com madeira jovem de *T. vulgaris* e de clones de *Eucalyptus* apresentaram densidade relativa aparente de $0,327 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,347 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente (Barros Júnior, 2020; Protásio et al., 2021) (Figura 6). Isso significa que, em média, o carvão vegetal de tachi-branco apresentou densidade aparente 6% inferior ao relatado na literatura para o gênero *Eucalyptus*. Por outro lado, o carvão vegetal produzido a partir da madeira de *Corymbia citriodora* apresentou, em média, densidade relativa aparente de $0,434 \text{ g cm}^{-3}$ (Couto et al., 2015), sendo, portanto, consideravelmente superior aos carvões de tachi-branco e eucalipto.

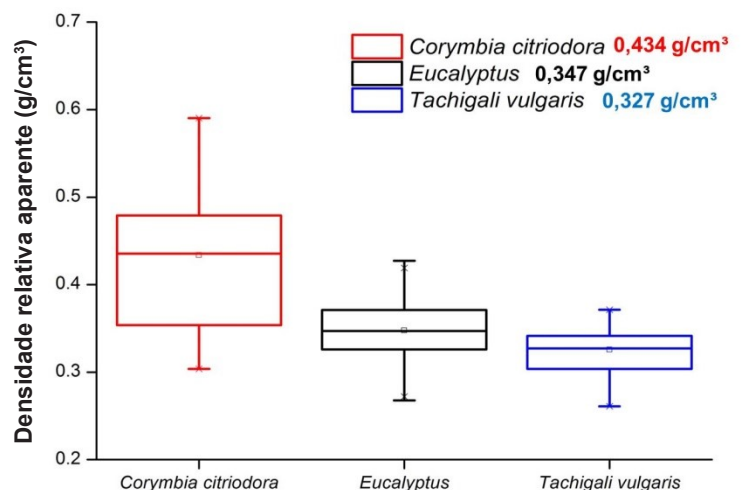


Figura 6. Densidade relativa aparente do carvão vegetal de madeiras de *Tachigali vulgaris*, *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*, nas mesmas condições de pirólise (taxa de aquecimento = $1,67 \text{ °C min}^{-1}$, temperatura final de carbonização = 450 °C).

Fontes: Adaptado de Couto et al. (2015), Barros Júnior (2020) e Protásio et al. (2021).

Esses resultados podem ser explicados pelas diferenças de densidade da madeira das espécies. As madeiras de *T. vulgaris*, *Eucalyptus spp.* e *C. citriodora*, com aproximadamente sete anos de idade, apresentaram densidade básica média de 0,486 g cm⁻³, 0,534 g cm⁻³ e 0,606 g cm⁻³, respectivamente (Couto et al., 2015; Protásio et al., 2021; Barros Júnior et al., 2022).

Reis et al. (2012) relataram densidade aparente para o carvão vegetal da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla*, aos 84 meses, igual a 0,326 g cm⁻³. Os clones comerciais GG680 (*E. urophylla* x *E. grandis*), GG157 (*E. urophylla*) e GG100 (*E. grandis* x *E. urophylla*), aos 84 meses, avaliados por Castro et al. (2016), apresentaram carvão vegetal com densidade relativa aparente de 0,355 g cm⁻³, 0,322 g cm⁻³ e 0,330 g cm⁻³, respectivamente. Portanto, observa-se a similaridade da densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* com aquele produzido a partir da madeira de árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*. Portanto, há evidências técnicas e científicas do potencial da espécie estudada para produção de carvão vegetal siderúrgico, pois, no Brasil, os clones de *Eucalyptus* são majoritariamente utilizados para redução do minério de ferro e produção de ferro gusa.

Perspectivas de estudos futuros com a espécie *Tachigali vulgaris*

As pesquisas deverão concentrar esforços ao esclarecimento dos efeitos de práticas silviculturais, como espaçamento, tipo de fuste e adubação, nas propriedades da madeira, no crescimento de árvores, no processo de carbonização e na qualidade do carvão vegetal de *T. vulgaris* proveniente de reflorestamentos na região Norte do Brasil. Além disso, os estudos voltados para a seleção de procedências e progênies de *T. vulgaris* devem ser priorizados, especialmente na estimativa de parâmetros genéticos que embasem os programas de melhoramento da espécie, além de estudar, por meio de marcadores moleculares e características morfológicas, a diversidade genética dos três testes de progênies instalados nas áreas do Grupo Jari, em Monte Dourado, PA.

Nos estudos de qualidade da madeira, o efeito da idade deve ser avaliado, pois sua influência nas características da madeira é consenso entre os pesquisadores e tem sido alvo de novas investigações nas últimas décadas, para o gênero *Eucalyptus*. No entanto, se referindo ao tachi-branco, essas informações são incipientes. Já os tratamentos silviculturais, como o espaçamento, podem influenciar a qualidade da madeira para produção de carvão vegetal siderúrgico, além de alterar a produção de massa seca por árvore, área basal, diâmetro e altura, tornando-se importante o estudo dessa variável para melhor aplicação das plantações florestais (Moulin et al., 2017). Outra problemática a ser solucionada nos plantios de *T. vulgaris* é a ocorrência da bifurcação do fuste que pode influenciar negativamente a densidade da madeira, conforme demonstrado em pesquisas recentes (Barros Júnior et al., 2022; Lima et al., 2022). Os trabalhos mais atuais têm indicado que a bifurcação das árvores de *T. vulgaris*, que ocorre entre 50-80 cm de altura do solo, pode ter causas predominantemente ambientais. No entanto, para esta espécie, são necessários mais estudos para compreender os possíveis efeitos da idade, do espaçamento de plantio e tipo de solo na ocorrência de árvores bifurcadas e o impacto dessa característica do fuste na qualidade da madeira.

Entende-se que é fundamental a consolidação da Rede de Pesquisa de Tachi-Branco que envolve diversos pesquisadores de várias e renomadas instituições brasileiras, cujo objetivo é fornecer subsídios para o uso energético da madeira da espécie *T. vulgaris* proveniente de plantações homogêneas e, assim, propiciar ganhos concretos na produção sustentável de lenha e carvão vegetal no estado do Pará e em toda a Amazônia. Há necessidade de expansão das pesquisas com a

qualidade da madeira de tachi-branco, especialmente a partir da caracterização anatômica, física e química do lenho e dos anéis de crescimento da espécie. Esses estudos permitirão planejar com maior acurácia as decisões técnicas de empresas que visam implantar plantios comerciais com o tachi-branco. Ademais, as dissertações e teses que serão realizadas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (PPGCF/Ufra) e no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras (PPGCTM/Ufla) fornecerão subsídios reais para o cumprimento dos objetivos e metas estabelecidos neste projeto. Cabe salientar que as instituições executoras e colaboradoras dessa rede de pesquisa irão utilizar de forma coesa, organizada e complementar, os seus laboratórios, visando garantir o cumprimento dos objetivos estabelecidos e, conseqüentemente, o alcance da meta global do projeto. Além disso, os centros de excelência representados pelos coautores deste trabalho apresentam pesquisadores renomados em suas áreas de atuação, que ajudarão na criação, implantação e consolidação dessa colaboração mútua e permitirão uma abordagem multidisciplinar de elevado padrão científico/tecnológico. Dessa forma, por meio do intercâmbio de pesquisadores e colaboradores, diversas análises do lenho de *T. vulgaris* poderão ser executadas nas instituições nacionais parceiras. A soma de esforços para a realização das atividades desejadas, de forma multilaboratorial, interinstitucional e intrainstitucional, permitirá minimizar os riscos de fracasso na execução dos objetivos e metas almejados em áreas inovadoras desta pesquisa.

Finalmente, essas iniciativas compreendem os próximos passos para a consolidação e o desenvolvimento dessa importante espécie nativa da Amazônia, para a composição de florestas energéticas visando ao abastecimento do Polo Siderúrgico de Carajás, uma vez que os reflorestamentos com espécies do gênero *Eucalyptus* são incipientes na região. Estudos futuros devem ser realizados para: i) analisar os efeitos do espaçamento e níveis de nutrição nos parâmetros de crescimento da árvore; ii) caracterizar as propriedades do lenho do tachi-branco utilizando técnicas convencionais e modernas; iii) determinar as práticas silviculturais para a implantação comercial do tachi-branco e propor estratégias para a maximização da produtividade de biomassa para geração de energia; iv) compreender a influência da bifurcação do fuste nos índices de qualidade da madeira e v) verificar a possibilidade de uso do carvão vegetal de tachi-branco como biorredutor nos processos siderúrgicos do Polo de Carajás.

Considerações finais

O acréscimo da idade do plantio de 87 meses para 102 meses resultou em aumento da densidade básica da madeira, o que é importante, em termos de melhoria da qualidade, para a produção de carvão vegetal.

Há efeito significativo do espaçamento de plantio na densidade básica da madeira de *T. vulgaris*, aos 87 meses, em que o acréscimo da área útil por planta proporcionou aumento da densidade do lenho. Para as árvores aos 102 meses de idade, entretanto, não há efeito do espaçamento na densidade da madeira.

Para obter madeiras mais densas e adequadas à produção de carvão vegetal, independente do espaçamento de plantio, deve-se considerar a idade ideal de colheita das árvores de tachi-branco.

O espaçamento inicial de plantio não influenciou os rendimentos gravimétricos da carbonização e a qualidade do biorredutor, mas foi observado efeito significativo deste fator na densidade aparente do carvão vegetal.

Os resultados encontrados a partir das carbonizações, em escala de laboratório, demonstraram potencial da espécie *T. vulgaris* na produção de carvão vegetal com propriedades químicas e físicas similares ao carvão vegetal de *Eucalyptus*, amplamente utilizado nos pólos siderúrgicos do Brasil.

Considerando as propriedades da madeira e do carvão vegetal, indica-se o espaçamento 3 m x 3 m (9,0 m² planta⁻¹) para a espécie *T. vulgaris* visando à produção de florestas energéticas.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; processo nº 306793/2019-9), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes; códigos de financiamento 001, nº 88887.199858/2018-00), e Edital Procad Amazônia 2018 - processo nº 88881.199859/2018-01), à Embrapa Amazônia Oriental, ao Grupo Jari e ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa da Ufla pelo financiamento da pesquisa.

Aos discentes do Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal da Ufra, Câmpus de Parauapebas: Wilson Alan Santos do Rosário, Reynaldo Melo Koury Sobrinho, Rita de Cássia Carvalho Silva e Evelyn Poliana Santos Patrício, que defenderam seus trabalhos de conclusão no âmbito da “Rede de Pesquisa Tachi-Branco”, no período de 2019-2021.

Aos discentes do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Ufra: Marilene Olga dos Santos e Silva, Udson de Oliveira Barros Júnior, Rafaela Patrícia da Silva Ceretta e Roberthi Alef Costa Teixeira, que defenderam suas dissertações no âmbito da “Rede de Pesquisa Tachi-Branco”, no período de 2018-2021.

Os trabalhos de conclusão de curso e dissertações supracitados foram fundamentais para a consolidação da “Rede de Pesquisa Tachi-Branco” e, conseqüentemente, apresentação deste trabalho.

Referências

- BARROS JÚNIOR, U. O. ***Tachigali vulgaris* em plantios homogêneos na Amazônia**: parâmetros de crescimento, madeira e carvão vegetal para fins energéticos. 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas.
- BARROS JÚNIOR, U. O.; ROSÁRIO, W. A. S.; LIMA, M. D. R.; SILVA, M. O. S.; PATRÍCIO, E. P. S.; GONCALVES, D. A. de; BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. de P. Tree spacing, and forking modify the wood density of *Tachigali vulgaris* in a trial planted in Amazonia for energy purposes. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 34, n. 1, p. 11-23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26525/jtfs2022.34.1.11>.
- CAMPOS-FILHO, E. M. **Coleção Plante as árvores do Xingu e Araguaia**: volume II, guia de identificação. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2009. 304 p.
- CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C.; CARVALHO, A. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 551-560, 2016.

- COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. de P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.7>.
- CRUZ, S. L.; PEDROZO, C. Â.; OLIVEIRA, V. X. A.; SILVA, A. M.; RESENDE, M. D. V. de; GONÇALVES, D. de A. Parâmetros genéticos e seleção inicial de procedências e progênies de taxi-branco (*Tachigali vulgaris*) em Roraima. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 258-269, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509831631>.
- ELOY, E.; CARON, B. O.; SILVA, D. A. da; SOUZA, V. Q. de; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; ELLI, E. F. Produtividade energética de espécies florestais em plantios de curta rotação. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1424-1431, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130177>.
- FARIAS, J.; MARIMON, B. S.; SILVA, L. C. R.; PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MORANDI, P. S.; MARIMON-JÚNIOR, B. H. Survival, and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 173-182, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.022>.
- GUIMARÃES, Z. T. M.; SANTOS, V. A. H. F.; NOGUEIRA, W. L. P.; MARTINS, N. O. A.; FERREIRA, M. J. Leaf traits explaining the growth of tree species planted in a Central Amazonian disturbed area. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 618-628, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.048>.
- IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2021**. Brasília, DF: IBÁ, 2021. 93 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>.
- LIMA, M. D. R.; MORAES, L. G.; SILVA, R. C. C.; BARROS JUNIOR, U. O.; BUFALINO, L.; SOARES, A. A. V.; ASSIS-PEREIRA, G.; GONÇALVES, D. A.; TOMAZELLO-FILHO, M.; PROTÁSIO, T. P. *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density. **New Forests**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09932-y>.
- MARTORANO, L. G.; TOURNE, D. C. M.; LISBOA, L. S.; SOUSA, V. G. de; SANTOS, L. S. dos; BRIENZA JÚNIOR, S. **Zoneamento topoclimático do taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L. F.) na Amazônia Legal: estratégias de planejamento com metas de desenvolvimento sustentável**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2018. 70 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 435). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/170212/1/DOCUMENTOS-435-Online.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.
- MELO, J. T.; HARIDASAN, M. **Resposta de mudas de carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vog. Leguminosae) a doses de N, P, K, Ca e Mg**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. 23 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 278). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/75862/1/bolpd-278.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.
- MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; OLIVEIRA, J. G. L. D.; CAMPINHOS, E.; GOMES, F.; VIDAURRE, G. B. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00073914, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.073914>.
- OLIVEIRA, I. R. M.; VALE, A. T.; MELO, J. T.; COSTA, A. F.; GONÇALVEZ, J. C. Biomassa e características da madeira de *Sclerolobium paniculatum* cultivado em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 14, n. 4, p. 351-357, 2008.
- PATRÍCIO, E. P. S. **Compreensão dos efeitos de espaçamento e idade na produtividade e ocorrência de bifurcação em plantações de *Tachigali vulgaris* com finalidade energética**. 2021. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas.
- PROTÁSIO, T. de P.; SCATOLINO, M. V.; ARAÚJO, A. C. C.; OLIVEIRA, A. F. C. F.; FIGUEIREDO, I. C. R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior *Eucalyptus* firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 3, p. 629-641, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x>.
- PROTÁSIO, T. de P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34-45, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>.
- PROTÁSIO, T. de P.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; ARAÚJO, A. C. C.; FIGUEIREDO, I. C. R.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F. Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of *Eucalyptus* clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, 105835, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105835>.
- REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 4, p. 497-505, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4322/floram.2012.055>.

RODRIGUES, R. P.; GONÇALVES, D. de A.; SILVA, A. R.; MARTINS, W. B. R.; DIONÍSIO, L. F. S.; SCHWARTZ, G. Crescimento e mortalidade de *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima em diferentes espaçamentos de plantio para a produção de biomassa. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3269, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.01>.

SEREGHETTI, G. C.; LANÇAS, K. P.; SARTORI, M. S.; REZENDE, M. A.; SOLER, R. R. Effect of spacing on *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* growth and wood basic density in short cycle plantation. **Energia na Agricultura**, v. 30, p. 257-262, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n3p257-262>.

SILVA, D. A.; MULLER, B.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.677>.

SILVA, M. O. S.; SILVA, M. G.; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R.; GONÇALVES, D. de A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Características termogravimétricas e combustão da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantios com diferentes espaçamentos. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, e3164, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.01>.

SILVA, M. O. S.; SILVA, M. G.; BUFALINO, L.; ASSIS, A. R.; GONÇALVES, D. de A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 211-224, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8>.

SILVA, R. C. C. **Variabilidade dendrométrica e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* para produção de biomassa para energia na Amazônia**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas.

SIQUEIRA, H. F.; PATRÍCIO, E. P. S.; LIMA, M. D. R.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Avaliação de três madeiras nativas do cerrado goiano visando à utilização energética. **Nativa**, v. 8, n. 5, p. 615-624, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i5.10338>.

SOUZA, C. R.; LIMA, R. M. B.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B. Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 7-14, 2008. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/176297/1/cap01.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; OLIVEIRA, J. M. F. Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801569>.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr97/cap02.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.

TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.