



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E
AMBIENTAIS**

KEYLA MARIA NUNES E SILVA

Magister Scientiae

**ANÁLISE GENÉTICA DE *Tachigali vulgaris* PARA FINS DE MELHORAMENTO EM
CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DE ALTA MORTALIDADE DAS PLANTAS**

**CUIABÁ, MT
2022**

KEYLA MARIA NUNES E SILVA

ANÁLISE GENÉTICA DE *Tachigali vulgaris* PARA FINS DE MELHORAMENTO EM
CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DE ALTA MORTALIDADE DAS PLANTAS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Faculdade de Engenharia Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Daniele Aparecida Alvarenga Arriel

Coorientadora: Dr.^a Cassia Ângela Pedrozo

CUIABÁ, MT
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S586a Silva, Keyla Maria Nunes.

ANÁLISE GENÉTICA DE *Tachigali vulgaris* PARA FINS DE
MELHORAMENTO EM CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DE
ALTA MORTALIDADE DAS PLANTAS / Keyla Maria Nunes
Silva. -- 2022

41 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Daniele Aparecida Alvarenga Arriel.

Co-orientador: Cassia Ângela Pedrozo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Faculdade de Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Florestais e Ambientais, Cuiabá, 2022.

1. Modelos mistos. 2. Covariável. 3. Competição. 4. Ganhos de
Seleção. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ANÁLISE GENÉTICA DE *Tachigali vulgaris* PARA FINS DE MELHORAMENTO EM CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DE ALTA MORTALIDADE DAS PLANTAS.

AUTORA: MESTRANDA KEYLA MARIA NUNES E SILVA

Dissertação defendida e aprovada em 30 de maio de 2022.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. DOUTORA DANIELE APARECIDA ALVARENGA ARRIEL (PRESIDENTE BANCA / ORIENTADOR)

2. DOUTORA ÚRSULA RAMOS ZAIDAN (EXAMINADOR EXTERNO)

3. DOUTORA BÁRBARA LUÍSA CORRADI PEREIRA (EXAMINADOR INTERNO)

Cuiabá, 30 de maio de 2022.

 Documento assinado eletronicamente por **Daniele Aparecida Alvarenga Arriel, Usuário Externo**, em 30/05/2022, às 15:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

 Documento assinado eletronicamente por **BARBARA LUISA CORRADI PEREIRA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 30/05/2022, às 20:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Úrsula Ramos Zaidan, Usuário Externo**, em 31/05/2022, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o



código verificador **4763747** e o código CRC **6C5D5473**.

QRCode

Assinatura

Referência: Processo nº 23108.045598/2022-87

SEI nº 4763747

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela saúde, força e oportunidades. E à Nossa Senhora por sempre caminhar comigo e passar à Frente.

A minha família por sempre estar ao meu lado me dando forças, amor, carinho, paciência: minhas avós Maria Helena e Maria Benedita, meus pais Pedro e Kerly, meus irmãos Paula Karyne e Pedro Kayke e meus nenéns Lucky e Bidu.

A minha orientadora Prof. Daniele, pela paciência, cuidado, respeito, confiança e pelas oportunidades. Muito obrigada por ser sempre atenciosa, por entender meus momentos difíceis, por me incentivar a estudar, e por me orientar neste e em outros trabalhos que fizemos juntas.

Ao Professor Dr. Rafael Tassinari Resende por toda paciência, auxílio na análise de dados e pelas contribuições muito valiosas nesta dissertação.

A Dr^a Cássia por ter aceitado o convite de coorientação e por toda as contribuições feitas.

Aos Professores Sidney Caldeira e Paulo Flores pelas contribuições realizadas na qualificação.

A Dra Úrsula Ramos Zaidan e a Prof. Dra Barbara Luísa Pereira pela disponibilidade em participar da banca de defesa para avaliar e contribuir com o trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e Ambientais por todo suporte fornecido durante o mestrado.

As minhas amigas que sempre torcem por mim e me apoiam. Obrigada por sempre estarem ao meu lado: Isabela, Rudmilla, Taynara, Vanessa, Verônica, Joana, Larissa, Geisielly, Isaura e Lariza.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), à qual agradeço pela concessão da bolsa de estudos.

E a empresa Jari Celulose, ao pesquisador Delman de Almeida Gonçalves e ao Professor Dr. Thiago de Paula Protásio, por fornecer os dados do teste de procedências e progênies utilizados neste estudo.

E a todos que de alguma forma contribuíram para que essa dissertação se tornasse realidade meu muito obrigada.

RESUMO

SILVA, Keyla Maria Nunes e Silva. *M. Sc.* Universidade Federal de Mato Grosso, maio de 2022. **Análise genética de *Tachigali vulgaris* para fins de melhoramento em condições experimentais de alta mortalidade das plantas.** Orientadora: Prof.^a Dr.^a Daniele Aparecida Alvarenga Arriel. Coorientadora: Dr.^a Cassia Ângela Pedrozo.

Tachigali vulgaris é uma espécie arbórea nativa que possui destaque para uso na produção de energia. Entretanto, experimentos na área silvicultural e de melhoramento vem indicando que a espécie apresenta uma alta taxa de mortalidade. Assim, a hipótese deste estudo foi verificar se a mortalidade das árvores vizinhas influenciou no incremento médio anual (IMA) de uma árvore focal, na seleção e na estimativa de parâmetros genéticos em um teste de procedências e progênies de *T. vulgaris*. Os objetivos foram: 1) avaliar se considerar a mortalidade na análise de dados influenciava nas estimativas dos parâmetros genéticos; 2) analisar a influência do ajuste com covariáveis relacionadas à competição e mortalidade das árvores vizinhas nas estimativas de parâmetros genéticos; 3) verificar a possibilidade de se realizar a seleção precoce dos indivíduos de *T. vulgaris*. Foram simuladas três diferentes situações a depender da sobrevivência das árvores aos três e aos 10 anos de idade e ajustados dois modelos mistos independentes. Um para determinar qual situação de sobrevivência seria mais adequada realizar a estimativa de parâmetros genéticos de *T. vulgaris* e o outro modelo para verificar a possibilidade de praticar a seleção precoce. Foram calculados os valores genéticos aditivos os valores genéticos totais tanto para as procedências como para os indivíduos e o tamanho da população de indivíduos não consanguíneos (tamanho efetivo). Foi comprovada a hipótese de que a mortalidade das árvores vizinhas influencia no incremento médio anual de uma árvore focal de forma que quanto maior o número de árvores mortas próximas à árvore analisada maior será a produtividade desta árvore. Considerar as árvores mortas após três anos de plantio influenciou no ajustes dos modelos para poder estimar os parâmetros genéticos de *T. vulgaris*, bem como utilizar o ajuste com covariáveis relacionadas a mortalidade das árvores vizinhas influenciou nas estimativas dos parâmetros genéticos para realizar a seleção dos melhores materiais genéticos de *T. vulgaris*. Foram selecionados 480 indivíduos com um tamanho efetivo de 107 indivíduos não consanguíneos e genótipos não relacionados, obtendo-se um ganho de seleção de cerca de 15% na seleção baseada nos valores genéticos totais (EGV) e de cerca de 10% na seleção dos valores aditivos (EBV). A viabilidade de se realizar a seleção precoce foi confirmada através da correlação genética entre o IMA aos três anos de idade e o IMA aos 10 anos em que se obteve um valor igual a 90,12%.

Palavras chaves : Modelos mistos, Covariável, Competição, Ganhos de Seleção

ABSTRACT

SILVA, Keyla Maria Nunes e Silva. M. Sc. Universidade Federal de Mato Grosso, May, 2022. **Genetic analysis of *Tachigali vulgaris* for breeding purposes under experimental conditions of high plant mortality**. Advisor: Prof.^a Dr^a Daniele Aparecida Alvarenga Arriel. Co-advisor: Dr^a Cassia Ângela Pedrozo

Tachigali vulgaris is a native tree species that stands out for use in energy production. However, experiments in the silvicultural and breeding areas have indicated that the species has a high mortality rate. Thus, the hypothesis of this study was to verify whether the mortality of neighboring trees influenced the mean annual increment (IMA) of a focal tree, in the selection and estimation of genetic parameters in a test of provenance and progenies of *T. vulgaris*. The objectives were: 1) to evaluate whether considering mortality in the data analysis influenced the estimates of genetic parameters; 2) to analyze the influence of the adjustment with covariates related to competition and mortality of neighboring trees in the estimates of genetic parameters; 3) verify the possibility of carrying out the early selection of *T. vulgaris* individuals. Three different situations were simulated depending on the survival of the trees at three and 10 years of age and two independent mixed models were adjusted. One to determine which survival situation would be most appropriate to carry out the estimation of genetic parameters of *T. vulgaris* and the other model to verify the possibility of practicing early selection. Additive breeding values, total breeding values for both provenances and individuals and the population size of non-consanguineous individuals (effective size) were calculated. The hypothesis that the mortality of neighboring trees influences the average annual increment of a focal tree was confirmed, so that the greater the number of dead trees close to the analyzed tree, the greater the productivity of this tree. Considering the dead trees after three years of planting influenced the adjustment of the models to be able to estimate the genetic parameters of *T. vulgaris*, as well as using the adjustment with covariates related to the mortality of neighboring trees influenced the estimates of the genetic parameters to carry out the selection of the best genetic materials of *T. vulgaris*. We selected 480 individuals with an effective size of 107 non-consanguineous individuals and unrelated genotypes from the provenance and progeny test of *T. vulgaris*. Obtaining a selection gain of about 15% in the selection based on the total breeding values (EGV) and of about 10% in the selection of additive values (EBV). And the feasibility of carrying out the early selection was possible through the genetic correlation between the IMA at three years of age and the IMA at 10 years old, in which a value equal to 90.12% was obtained, indicating good feasibility to perform this technique.

Keywords: Mixed models, Covariate, Competition, Selection Gains.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	<i>A espécie Tachigali vulgaris</i>	10
2.2	Melhoramento genético florestal	12
3.	MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1	Descrição do Experimento	15
3.2	Coleta de dados e estimativa de IMA	16
3.3	Covariáveis utilizadas para ajustar o modelo base	18
3.4	Modelagem estatística	19
3.5	Estimativas de Parâmetros Genéticos	21
3.6	Ganhos genéticos com a seleção	22
4.	RESULTADOS	23
5.	DISCUSSÃO	30
6.	CONCLUSÕES	34
	REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

Tachigali vulgaris L. G. Silva & H. C. Lima, Fabaceae, Caesalpinioideae, é popularmente conhecida como tachi, tachi branco ou carvoeiro, devido seu potencial energético (FREITAS et al., 2012). É uma espécie endêmica brasileira que ocorre naturalmente em fisionomias savânicas e florestais, típica de estágios iniciais de sucessão. É encontrada nas regiões Norte (Pará, Amazonas e Tocantins), Nordeste (Maranhão, Piauí, Ceará e Bahia), Centro-Oeste (Mato Grosso, Goiás, Distrito Federal e Mato Grosso do Sul) e Sudeste (São Paulo e Minas Gerais) (LIMA, 2015).

O tachi é indicado em recuperação de áreas degradadas por ser do grupo ecológico das pioneiras (DIAS et al., 1992 CARVALHO, 2005; AMARAL et al., 2009). Outro fator que contribui para esse uso é sua rápida produção de biomassa decorrente da sua associação com bactérias do gênero *Rhizobium* que auxiliam na fixação de nitrogênio atmosférico, promovendo o seu rápido crescimento e a produção de serrapilheira rica em nutrientes que aumentam a matéria orgânica do solo (SOUZA et al. 2019).

A madeira da espécie pode ser utilizada nos segmentos industriais de móveis, produção de lâminas, construções leves, utensílios, embalagens, revestimentos internos e é recomendada para a produção de álcool e coque (TONINI et al., 2018). Porém, seu maior potencial é para fins de bioenergia tanto na produção de lenha quanto de carvão cujos valores médios de densidade básica e poder calorífico de sua madeira variam de 0,493 a 0,633 g.cm⁻³ e 4390 a 4567 kcal.kg⁻¹, respectivamente, e sua produtividade média igual a 43,2 m⁻³.ha⁻¹.ano⁻¹ (TOMASELLI et al., 1983; FARIAS et al., 2016; SOUZA et al., 2008; ORELLANA et al., 2018; SILVA et al., 2021) valores semelhantes aos encontrados para *Eucalyptus*, principal gênero para o referido uso no Brasil.

Desde a década de 1980 alguns experimentos vêm sendo conduzidos para avaliar o crescimento e desenvolvimento de *T. vulgaris* em povoamentos puros e para realizar a seleção de genótipos superiores (CARPANEZZI et al, 1983; CASTRO et al, 1990; CASTRO et al, 1998; FARIAS NETO & CASTRO, 1999; FARIAS NETO & CASTRO, 2000; CRUZ et al., 2020). Entretanto, é observado que em alguns plantios a taxa de mortalidade da espécie varia em torno de 50% (CRUZ et al., 2020, FARIAS et al, 2016). Tal fator aponta um problema silvicultural que pode afetar a estimativa dos parâmetros genéticos para fins de seleção dos melhores materiais visando plantios mais produtivos e homogêneos.

A mortalidade de plantas em plantios experimentais é decorrente de inúmeros fatores que podem estar relacionados à formação do sistema radicular no plantio, à adaptação da

espécie ao ambiente, à competição, ao espaçamento, entre outros (CANUTO et al., 2015; NARDUCCI et al., 2016). Tais causas aumentam a variância residual e proporcionam ambientes heterogêneos dentro dos plantios experimentais, que por consequência favorecem o surgimento de indivíduos que possuem maior crescimento em comparação a suas árvores vizinhas (RESENDE, 2016).

Esse evento torna ainda mais difícil praticar a seleção dos melhores indivíduos, porque pode ocorrer a distorção entre a produtividade dos indivíduos competidores, que não fornecem condições ao genótipo suprimido de expressar sua real condição genotípica (EDWARDS, 1956; HÜHN, 1974). Dessa forma, uma maneira de minimizar essa variância ambiental é utilizar covariáveis junto aos modelos para melhor analisar os dados dos plantios experimentais (PAVAN, 2012).

Dentre as covariáveis mais utilizadas no ajuste de modelos mistos estão os índices de competição que estimam a competição total para árvores adjacentes que assumem afetar o desenvolvimento de outro indivíduo (LEONARDECZ NETO, 2003). A competição é causada por fatores genéticos e ambientais, resultado dos genótipos e do arranjo espacial de árvores vizinhas (CAPPA et al., 2016). Ela pode ser induzida pela densidade do plantio e ser considerada como um balanço em que o potencial da planta é prejudicado ou favorecido, a qual potencializa ou reduz o desenvolvimento da planta vizinha (DRAPER & GUTTMAN, 1980; HÜHN, 1973).

Nos modelos utilizados para analisar os testes de procedências e progênies, durante muitos anos, o ajuste de covariáveis não foi utilizado para estimar os parâmetros genéticos. Entretanto, atualmente, o ajuste de covariáveis deve ser realizado simultaneamente à estimativa dos componentes de variância via REML (máxima verossimilhança restrita) e à predição de valores genéticos individuais via BLUP (melhor predição linear não viciada) para maximizar a eficiência da avaliação genética (RESENDE & ALVES, 2021).

Dessa maneira, a hipótese deste estudo foi verificar se a mortalidade das árvores vizinhas influenciou no incremento médio anual (IMA) de uma árvore focal, na seleção e na estimativa de parâmetros genéticos em um teste de procedências e progênies de *T. vulgaris*. Os objetivos foram: 1) avaliar se considerar a mortalidade na análise de dados influenciava nas estimativas dos parâmetros genéticos; 2) analisar a influência do ajuste com covariáveis relacionadas à competição e à mortalidade das árvores vizinhas nas estimativas de parâmetros genéticos; 3) verificar a possibilidade de se realizar a seleção precoce dos indivíduos de *T. vulgaris*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A espécie *Tachigali vulgaris*

Tachigali vulgaris L. G. Silva & H. C. Lima anteriormente nomeada como *Sclerolobium paniculatum* Vogel (SILVA & LIMA, 2007), é uma espécie leguminosa arbórea, pertencente à família Fabaceae e subfamília Caesalpinioideae. É conhecida popularmente como tachi, taxi-branco, carvoeiro ou cachamorra (FREITAS et al., 2012). É uma espécie endêmica brasileira encontrada nas regiões Norte (Pará, Amazonas e Tocantins), Nordeste (Maranhão, Piauí, Ceará e Bahia), Centro-Oeste (Mato Grosso, Goiás, Distrito Federal e Mato Grosso do Sul) e Sudeste (São Paulo e Minas Gerais) (LIMA, 2015).

Ocorre naturalmente em fisionomias savânicas e florestais e é típica de estágios iniciais de sucessão. Solos com textura argilosa a muito argilosa favorecem o melhor desempenho da espécie (SOUZA et al., 2016). É classificada como semidecídua, heliófila e pioneira, que inicia a sucessão secundária em áreas abertas por meio da germinação intensa de suas sementes no solo (STALLBAUN et al., 2016).

O tachi é uma espécie arbórea de porte médio, tronco retilíneo que pode variar de 8 a 20 m de altura e alcançar de 30 a 70 cm de diâmetro à altura do peito (DAP) (CARPANEZZI et al., 1983). Sua madeira possui alburno bege claro, pouco diferenciado do cerne, que é amarelo-claro-oliváceo (LORENZI, 2002). Suas folhas são alternadas, estipuladas, compostas imparipinadas. As inflorescências são em panículas terminais amplas e o seu fruto é uma criptosâmara oblonga com uma única semente amarela-esverdeada de 1 a 1,5 cm de comprimento (LORENZI, 2002, ABREU et al., 2017).

As sementes de tachi branco apresentam dormência do tipo tegumentar exógena, na qual os tecidos da semente impedem parcial ou totalmente a difusão de água ao embrião (CARDOSO, 2004). Um dos métodos satisfatórios para superação da dormência da espécie é o desponte com tesoura na região oposta ao hilo que proporcionou a maior porcentagem de sementes germinadas e melhor velocidade de germinação (ABREU et al., 2017).

Quanto à sua reprodução, o tachi é uma espécie alógama, que realiza polinização cruzada dependente de seus agentes polinizadores como as abelhas. Possui elevado número de grão de pólen e alta taxa de produção de frutos, em que a primeira floração ocorre em média entre os dois aos três anos de idade com ciclo anual de floração e frutificação (VENTURIERI et al., 1999). A dispersão dos frutos ocorre de forma anemocórica e autocórica, mais especialmente da forma barocórica, por gravidade (CARVALHO, 2005). A

época de maturação do frutos e a disseminação de sementes ocorre de janeiro a abril, em condições experimentais em Belterra, PA (VENTURIERI et. al., 1999).

Esses aspectos fornecem ao tachi condições para ser indicada no uso de recuperação de áreas degradadas, devido a mesma ser do grupo ecológico das pioneiras que proporcionam condições favoráveis ao desenvolvimento de outras espécies (CARVALHO, 2005; AMARAL et al., 2009, FREITAS et al., 2012). Além disso, a espécie realiza associação com bactérias do gênero *Rhizobium* para fixação de nitrogênio atmosférico (N) (SOUZA et al., 2019) e assim produz uma alta quantidade de serrapilheira, que melhora a matéria orgânica em solos altamente intemperizados e na formação de horizontes orgânicos no solo (MOCHIUTTI et al., 2006).

Outra característica importante para a utilização do tachi é densidade de sua madeira, que é classificada como moderadamente densa. Essa densidade faz com que a madeira da espécie possa ser utilizada na confecção de moirões, esteios e caibros, nas construções rurais e urbanas e na produção de álcool e coque (CARVALHO, 2010). Entretanto, seu maior potencial é para fins de bioenergia cujos valores médios de densidade básica e poder calorífico de sua madeira variam de 0,493 a 0,645 g.cm⁻³ e 1900,05 a 4.812 kcal.kg⁻¹, e o poder calorífico de carvão varia de 7690 Kcal.kg⁻¹ a 7678 Kcal.kg⁻¹ (TOMASELLI et al., 1983, TONINI et al., 2018, ORELLANA et al., 2018, SILVA et al., 2021) valores semelhantes aos encontrados para *Eucalyptus*, principal gênero para o referido uso no Brasil.

A produção de mudas da espécie é mais eficaz em condições de maior luminosidade (FREITAS et al., 2012) e com uso de substrato composto por mistura de solo argiloso, areia e matéria orgânica curtida, na proporção de 3:1:1 (SOUZA et al., 2004). Recomenda-se 150 mg.dm⁻³ de fertilizante de nitrato de amônio aplicado aos poucos, a 25, 50, 75 e 100 dias para a produção de mudas de tachi (SIMÕES et al, 2017).

O plantio da espécie deve ser feito no início da estação chuvosa, logo que o solo esteja suficientemente umedecido, a pleno sol, em plantios puros e densos, ou plantio misto, no tutoramento de espécies secundárias tardias ou clímax (SOUZA et al, 2016). O espaçamento a ser utilizado dependerá da viabilidade econômica de cada projeto e da finalidade de uso dos indivíduos plantados (NARDUCCI et. al., 2021). Em plantios homogêneos da espécie para maior produtividade o espaçamento por árvore deve ser maior (9,0 m² e 12,0 m²). Já para maior produtividade por área, espaçamentos mais próximos (6,0 m² e 7,5 m²) devem ser escolhidos (SILVA et al. 2021).

O tachi apresenta uma rotação de 5 a 10 anos para plantações com fins energéticos (SIMÕES et al, 2017) e sua produtividade mensurada através do incremento médio anual

(IMA) é em média $43,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ em condições experimentais no Amazonas aos 11 anos de idade (SOUZA et al. 2008). Dessa forma, para obter maiores ganhos de produtividade para suas aplicações de biocombustível e bioenergia deve se investir em estudos e pesquisas da espécie quanto ao melhoramento genético e a silvicultura da espécie (SILVA et al. 2021).

2.2 Melhoramento genético florestal

O melhoramento genético florestal possui como principais objetivos o aumento da produtividade, adaptação a ambientes e melhor qualidade da madeira para os diversos produtos florestais (ASSIS et al, 2015). É, no geral, realizado baseado em ciclos recorrentes de seleção e recombinação, que são organizados de acordo com a metodologia utilizada para realizar o programa de melhoramento. Tem como sustentação a formação de uma população base, população de melhoramento, métodos para avaliar e selecionar árvores geneticamente superiores, métodos a serem utilizados na recombinação destas árvores para regenerar populações base, que serão submetidas a ciclos repetidos de seleção, e métodos de propagação vegetativa para fornecer material genético melhorado em quantidade e qualidade para plantios comerciais (ASSIS, 1987).

A fase inicial fundamental de um programa de melhoramento é a seleção das espécies e a formação base. Uma dos testes genéticos mais importantes para realizar a seleção são os testes de procedências e progênies (RESENDE, 2005). Esses testes consistem em avaliar diferentes populações de progênies de meios-irmãos, irmãos-completos ou plantas de autofecundação que irão fornecer dados para realizar as estimativas dos parâmetros genéticos que determinarão e orientarão as estratégias de seleção, a predição de ganhos e o sucesso do programa de melhoramento (CRUZ, 2012).

A estratégia de seleção mais utilizada no melhoramento florestal é o método da seleção recorrente, pois é o mais indicado para espécies alógamas, que são aquelas que realizam polinização cruzada, o tipo de polinização da maioria das espécies florestais (RESENDE & BARBOSA, 2005) e do tachi. Este método de seleção é capaz de melhorar características quantitativas, controladas por muitos genes, sujeitas a elevada influência ambiental e que apresentam herdabilidades moderadas a baixas. Seu principal objetivo é aumentar contínua e progressivamente os alelos favoráveis, por vários ciclos seletivos (RESENDE & ALVES, 2021).

Um dos procedimentos para se realizar a avaliação genética com maior acurácia seletiva é o REML/BLUP (máxima verossimilhança restrita/melhor predição linear não

viesada), em que o REML é o responsável por estimar os componentes de variância, sendo superior ao método da análise de variância (ANOVA) em situação de dados desbalanceados. Já o BLUP é responsável por fazer a seleção para os efeitos genéticos aditivos (a), de dominância (d) e genotípicos (g) (RESENDE et al., 2001).

Os coeficientes de variação genética e herdabilidade são os parâmetros mais importantes nos programas de melhoramento florestal, pois são essenciais para conhecer o potencial evolutivo de uma população, tanto para a conservação como para o melhoramento genético, uma vez que permite determinar a proporção da variação genética adaptativa que pode responder a alterações ambientais ou pode ser explorada em programas de melhoramento florestal (FREITAS, 2007).

Separar a variância genética da não genética é o principal objetivo de estudo da genética quantitativa (FALCONER, 1989), pois a heterogeneidade ambiental em experimentos genéticos florestais é inevitável e isso causa uma interação importante das parcelas pequenas é o aumento das interações entre indivíduos vizinhos devido à competição (MAGNUSSEN & YEATMAN, 1987). Dessa forma, a performance de uma progênie pode ser super ou subestimada devido à maior ou menor agressividade competitiva de sua árvore com a árvore vizinha, que pode causar uma distorção entre o real desenvolvimento dos competidores não dando condições ao genótipo suprimido de expressar sua real condição genotípica, fazendo com que ocorra distorções nas estimativas dos parâmetros genéticos e consequentemente na seleção (MAGNUSSEN & YEATMAN, 1987).

Assim torna-se necessário utilizar o ajuste de competição entre plantas vizinhas nas análises em que o ambiente é heterogêneo. As covariáveis mais utilizadas para ajustar os dados são Índice de Hegyi, Índice de falhas, Autocompetição e Alocompetição (LEONARDECZ NETO et al., 2003). Estas covariáveis devem ser ajustadas simultaneamente à estimativa de componentes de variância via REML e à predição de valores genéticos individuais via BLUP (RESENDE & ALVES, 2021).

Outra análise importante em programas de melhoramento florestal, principalmente devido aos longos ciclos de seleção, é a seleção precoce. Ela tem por objetivo identificar caracteres das árvores em idade juvenil correlacionados àqueles de interesse econômico em árvores em idades mais avançadas, isto é, predizer, em idade juvenil, o desempenho de um indivíduo adulto, diminuindo, assim, o tempo para se completar um ciclo de seleção (GONÇALVES et al., 1998). Este método se torna possível quando as variáveis analisadas apresentam correlações significativas entre si, em diferentes idades, o que viabiliza a eficiência na seleção precoce do material genético (MASSARO et al., 2010). A viabilidade do

uso da seleção precoce pode ser utilizada para diminuir os ciclos e aumentar o ganho genético de seleção (BELTRAME et al., 2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do Experimento

O teste de procedências e progênies de *T. vulgaris* foi implantado em de maio de 2011 e está localizado na região do Vale do Jari, no distrito de Monte Dourado, no município de Almeirim, no Estado do Pará (0° 51' 35,28" S; 52° 57'48,28" W e altitude de 65 metros), Brasil (Figura 1).

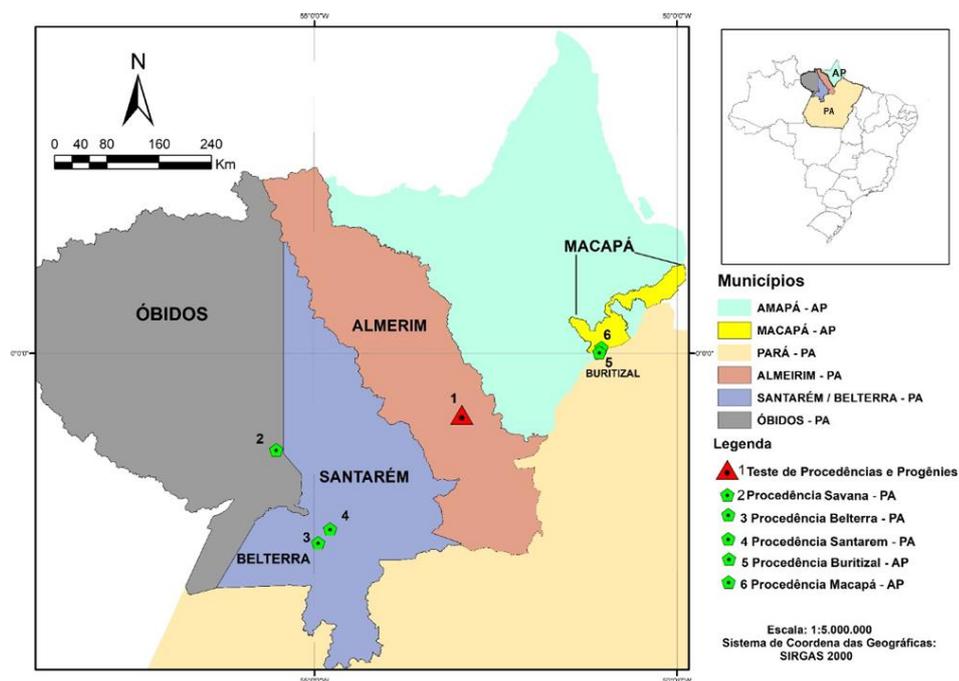


Figura 1 - Localização das procedências utilizadas e do teste de procedências e progênies de *Tachigali vulgaris*.

A vegetação que caracteriza a região é a Floresta Ombrófila Densa que é predominante do bioma amazônico. Esta região é caracterizada pelo clima do tipo Aw de Köppen, com duas estações bem definidas - uma chuvosa entre os meses de janeiro até abril e outra seca durante os meses de agosto a novembro. A temperatura média anual é de 26 °C, a umidade média relativa é de 80% e a precipitação pluviométrica média anual é de 1654 mm (CLIMATE-DATE.ORG, 2022). O solo do local de implantação do experimento é do tipo Latossolo Amarelo com textura média (SANTOS et al., 2018).

Antes da implantação, foi realizada a limpeza manual do terreno e o controle químico manual de formigas. O preparo do solo para o plantio consistiu na prática de enleiramento, realização de subsolagem com o uso de trator de esteira e adubação de base com 500 kg/ha de fosfato natural reativo, pelo método de aplicação em sulco. Seis dias após o plantio foi

realizada adubação de cobertura com 217 kg/ha de NPK 6-30-6 em cova por planta de forma manual na linha.

Foram utilizadas para compor o experimento 60 progênies de meio-irmãos provenientes de polinização aberta de *T. vulgaris*, advindas de cinco procedências diferentes (Tabela 1). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com quatro repetições e parcelas lineares contínuas com seis plantas por parcela totalizando 1440 mudas plantadas. Não houve bordadura ao redor do experimento.

Tabela 1 - Número de progênies de *Tachigali vulgaris* por procedências

Procedência	Latitude (S)	Longitude (W)	Quantidade de Progênies
Belterra	02° 38' 32,8"	54° 56' 35,1"	14
Buritizal	0° 0' 54,703"	51° 4' 18,241"	10
Macapá	0° 4' 50,706"	51° 2' 38,92"	5
Santarém	02° 27' 09,8"	54° 46' 21,1"	18
Savana	01°11'58.6"	55°29'11.7"	13
Quantidade total de Progênies			60

O espaçamento utilizado foi o 3,5 x 2,6 metros (9,1 m²/planta), em que 3,5 metros é a distância entre árvores entre linhas e 2,6 metros é a distância na própria linha. A disposição das plantas no experimento foi realizada de forma que a primeira árvore de uma parcela coincidiu com a última árvore de uma outra parcela para facilitar o caminhamento durante a coleta de dados.

3.2 Coleta de dados e estimativa de IMA

Três anos após a implantação do experimento foram coletados dados de sobrevivência, circunferência à altura do peito (CAP), em cm, e a altura, em metros, do fuste principal de todas as plantas do teste. A sobrevivência foi classificada em 0 quando a árvore estava morta e 1 quando árvore estava viva.

Aos 10 anos de idade esses mesmos dados foram mensurados. Nesta medição foi realizada a medição de CAP de todos os fustes de todas as árvores quando estas apresentavam bifurcação.

O volume individual por planta foi estimado por meio da Equação 1, desenvolvida para a própria a espécie *T. vulgaris* (RAMOS et al, 2021):

$$V = e^{(-9,164635 + 1,912123 \text{ Ln}[d_{eq}] + 0,751405 \text{ Ln}[h])}, \quad (1)$$

em que:

V = volume, em m³, de madeira com casca até diâmetro mínimo de 5 cm;

deq = diâmetro equivalente da j-ésima árvore (cm), medida a 1,30 m acima do solo. Para a medição aos três anos de idade do experimento foi utilizado o valor do diâmetro do fuste principal. Já para a medição aos 10 anos de idade foi calculado por meio da Equação 2, o diâmetro equivalente de cada planta:

$$deq = \sqrt{\sum_{i=1}^n d^2}, \quad (2)$$

h= altura, em m, total da árvore. Para a medição aos três anos de idade do experimento foi usado o valor da altura do fuste principal e para a medição aos 10 anos de idade, em que uma árvore continha vários fustes, foi utilizada a altura do fuste mais alto.

O volume individual estimado foi utilizado para calcular o incremento médio anual (IMA), o qual foi obtido por meio da extrapolação do volume individual por planta para um hectare e dividido pela idade (m³.ha⁻¹.ano⁻¹) aos três e aos 10 anos.

Ao analisar os dados de IMA aos 10 anos de idade foram simuladas três diferentes situações a depender da sobrevivência das árvores aos três e aos 10 anos de idade. Na primeira situação (situação A) as plantas que morreram até os três anos de idade foram consideradas como dados perdidos (“NA” = Não avaliado) e aquelas que morreram após essa idade como valor “0”. Foi adotada a premissa de que a mortalidade até os três anos de idade ocorreu devido a algum evento silvicultural, como problemas relacionados à muda, ao plantio ou à condução do experimento. Já para aquelas plantas que sobreviveram após os três anos e morreram depois, adotou-se que a mortalidade ocorreu devido a fatores genéticos. Para garantir o bom ajuste dessa condição, os valores de zero mantidos nos dados brutos foram confrontados como sendo *outliers*, e mantidos caso estivessem presentes dentro da normalidade de distribuição dos dados de IMA aos 10 anos de idade. Na segunda situação (situação B), todas as plantas mortas na avaliação aos 10 anos foram consideradas como dado perdido (“NA”) sendo desconsideradas da análise. Já na terceira situação (situação C), todas as plantas mortas na avaliação aos 10 anos entraram com valores igual a “0” e foram consideradas significativas durante a análise dos dados. Nas situações B e C foram desconsideradas os dados de mortalidade e sobrevivência das árvores aos três anos de idade.

3.3 Covariáveis utilizadas para ajustar o modelo base

Com a finalidade de diminuir os efeitos da mortalidade das plantas, que pode gerar uma competição desigual entre os indivíduos no teste de procedências e progênes de *T. vulgaris*, foram calculadas as seguintes covariáveis para analisar os dados de IMA aos 10 anos de idade:

- 1) Número de plantas vizinhas sobreviventes (NS), expressa pela soma algébrica do número de plantas vizinhas sobreviventes (RESENDE, 2002) (Equação 3).

$$NV = \sum_{j=1}^8 n, \quad (3)$$

em que n = a quantidade de planta (s) vizinha (s) sobrevivente (s) da j -ésima árvore, considerando-se as oito árvores vizinhas mais próximas de cada planta.

- 2) Índice de falhas (IF), o qual representa a correção de falhas baseada na mortalidade e nas distâncias entre a árvore analisada (focal) e suas vizinhas (Equação 4) (PIRES et al., 2011).

$$IF = P1.NFL + P2.NFC + P3.NFD, \quad (4)$$

em que: NFL = Número de falhas na linha; NFC = Número de falhas na coluna; NFD = Número de falhas na diagonal; $P1 = EL / EL$; $P2 = EL/EC$; $P3 = EL/ED$; EL = Espaçamento na linha = 3,5 metros; EC = Espaçamento na coluna = 2,6 metros; ED = Espaçamento na diagonal = 4,36 metros.

- 3) Índice de competição de Hegyi 1974 (IC) (Equação 5), o qual expressa a medida de competição por meio das distâncias e do desenvolvimento analisado das oito árvores vizinhas mais próximas de cada planta no experimento (LEONARDECZ-NETO et al., 2003):

$$C_{ijk} = \sum_{j=1}^8 \frac{Y_{ijk'}}{DIST_{ijk,ijk'}} \quad (5)$$

em que: C_{ijk} = valor de competição referente ao indivíduo k , da progênie i , do bloco j ; Y_{ijk} = valor fenótipo do indivíduo k ; $Y_{ijk'}$ = valor fenotípico do indivíduo competidor; $DIST_{ijk,ijk'}$ = distância do indivíduo k ao competidor k' .

- 4) Média da autocompetição (MAT) (Equação 6), dada pela média aritmética das árvores vizinhas autocompetitivas que possuem o mesmo material genético (PAVAN et al., 2012).

$$MAT = \sum_{j=1}^n \frac{Y_{au}}{n} \quad (6)$$

em que: Y_{au} = valor fenotípico observado da planta autocompetitiva; n = número de plantas autocompetitivas.

- 5) Média de alocompetição (MAL) (Equação 7), dada pela média aritmética das árvores vizinhas de parcelas adjacentes que possuem material genético diferente (PAVAN et al., 2012).

$$MAL = \sum_{j=1}^n \frac{Y_{al}}{n} \quad (7)$$

em que: Y_{al} = valor fenotípico observado da planta alocompetitiva; n = número de plantas alocompetitivas.

- 6) Média das 8 competidoras (M8) é a média das oito árvores competidoras (PAVAN et al., 2012) e foi realizada através da média aritmética do IMA das árvores vizinhas mais próximas concorrentes em questão à árvore focal (Equação 8).

$$M8 = \sum_{j=1}^n \frac{Y_{comp}}{n} \quad (8)$$

em que: Y_{comp} = valor fenotípico observado da planta competitiva; n = número de plantas competidoras.

3.4 Modelagem estatística

Foram ajustados dois modelos mistos independentes: um para determinar qual situação de sobrevivência e covariáveis seriam mais adequadas para realizar a estimativa de parâmetros genéticos de *T. vulgaris* com a finalidade de obter ganhos com a seleção dos melhores indivíduos e o outro para verificar a possibilidade de praticar a seleção precoce.

O primeiro modelo misto foi o modelo base que teve por objetivo verificar se considerar a mortalidade na análise dos dados, conforme detalhado no tópico 2.2, e as covariáveis influenciava nas estimativas dos parâmetros genéticos para IMA aos 10 anos de idade. Nesse modelo, todas as covariáveis foram consideradas como efeito fixo, porém, as que não foram significativas pelo procedimento de seleção de variáveis *stepwise* saíram da

análise, permanecendo apenas as covariáveis significativas. Esse modelo também foi analisado sem os efeitos das covariáveis e é dado pela Equação 9:

$$y = Xb + Z_1\alpha + Z_2\gamma + Wp + e, \quad (9)$$

em que: y = vetor de fenótipos mensurados nas parcelas (Incremento Médio Anual – IMA aos 10 anos de idade de plantio); b = vetor de efeitos fixos de blocos e dos efeitos fixos para todas as covariáveis descritas no tópico 2.3; α = é o vetor aleatório de efeitos genéticos aditivos (ou informação dentro de famílias); γ = é o vetor aleatório de efeitos genéticos não-aditivos (ou informação entre de famílias ou clones); p = é o vetor aleatório dos efeitos entre parcelas; e = representa o vetor de resíduos dentro de cada traço fenotípico. Vetores contendo os efeitos aleatórios assumem distribuição normal multivariada, centradas em zero com as seguintes estruturas de covariância: $Cov(a, a') = \mathbf{G}_0 \otimes \mathbf{A}$, $Cov(\delta, \delta') = \mathbf{I}_\gamma \sigma_\gamma^2$, $Cov(\varepsilon, \varepsilon') = \mathbf{I}_g \otimes \mathbf{R}_0$ e $Cov(g, \varepsilon') = 0$, sendo: \mathbf{I}_a uma matriz identidade de tamanho a ; \mathbf{I}_γ uma matriz identidade de tamanho δ ; \mathbf{G}_0 uma matriz de covariância do efeito genético das famílias ou clones em cada traço; e \otimes denota o produto de *Kronecker* entre matrizes; \mathbf{A} é a matriz formada pelo denominador dos coeficientes aditivos de parentesco de ordem $a \times a$, obtidos por meio da informação de *pedigree* (HAYES, VISSCHER e GODDARD, 2009).

Esse modelo foi executado utilizando-se o pacote Sommer do *software* livre R (COVARRUBIAS-PAZARAN, 2016).

Para verificar qual situação de mortalidade melhor representaria a realidade do experimento e se utilizar as covariáveis melhoraria o ajuste do modelo base aos dados de IMA aos 10 anos de idade, foi realizada a escolha do melhor ajuste do modelo com base no critério de informação de Akaike – AIC (AKAIKE, 1974) e pelo critério de informação bayesiano – BIC (SCHWARZ, 1978), calculados, respectivamente, pelas Equações 10 e 11:

$$AIC = 2k - 2 \ln(\hat{L}) \quad (10)$$

$$BIC = k \ln(n) - 2 \ln(\hat{L}) \quad (11)$$

em que: k é o número de parâmetros do modelo; \hat{L} é o valor máximo da função de verossimilhança; e n é o número de observações.

Já com o objetivo de verificar a possibilidade de realizar seleção em idade precoce dos indivíduos de *T. vulgaris* foi utilizado o modelo *multi-traits*. Esse modelo fez a correlação dos dados de IMA aos três anos com os dados de IMA aos 10 anos de idade, após verificar qual a

melhor situação a depender da sobrevivência das árvores aos três e aos 10 anos de idade que foi mais adequada para ajustar o modelo base (Equação 9). Foi utilizado modelo hierárquico compatível com o modelo descrito na Equação 9, porém apenas utilizando o efeito de blocos como de efeitos fixos. As covariáveis não foram utilizadas aqui, pois não fazem sentido serem aplicadas nos dados de IMA aos três anos de idade, pois nessa idade não havia um alto índice de mortalidade. Foram empregadas três estruturas de variância-covariância do tipo ‘não estruturada’ para se computar as covariâncias genéticas (aditivas e não aditivas) e residuais. Esta análise foi realizada no pacote Sommer do *software* livre R (COVARRUBIAS-PAZARAN, 2016).

Para ajustar os comportamentos não-lineares nas análises, adotou-se o procedimento de regressão *Locally weighted Scatterplot Smoothing (LOESS)*, que se baseia no ajuste de uma regressão polinomial ponderada para observações realizadas ao longo da vizinhança, em que os pesos diminuem com a distância do vizinho mais próximo (CLEVELAND et al., 1990). LOESS produz uma estimativa suavizada (\hat{y}) que é definido pela seguinte equação: $\hat{y}_i = \sum_{p=0}^d \beta_{jp} t_j^p$, em que, β_j é a $(d + 1)$ estimativa dimensional de quadrados mínimos da regressão ponderada; t_j^p é o vetor de $(d + 1)$ tempo de observação dimensional; j é a quantidade de tempo para o máximo definido pelo parâmetro de suavização n ; $p = \{0, \dots, d\}$ onde d é o grau de ajuste polinomial.

3.5 Estimativas de Parâmetros Genéticos

Com base no modelo que apresentou um melhor ajuste dos dados de acordo com os critérios AIC e BIC (Equações 10 e 11), foram estimados os componentes de variância utilizando o método da máxima verossimilhança restrita (REML) (RESENDE, 2016). Estes componentes foram utilizados para o cálculo dos coeficientes de herdabilidade nos sentidos amplo (h^2), restrito (h_α^2) e de procedências (h_δ^2) (Equações 12, 13 e 14) (FALCONER & MACKAY, 1996) da seguinte forma:

$$h^2 = \frac{(\sigma_\alpha^2 + \sigma_\gamma^2)}{(\sigma_\alpha^2 + \sigma_\gamma^2 + \sigma_\delta^2 + \sigma_\varepsilon^2)}, \quad (12)$$

$$h_\alpha^2 = \frac{\sigma_\alpha^2}{(\sigma_\alpha^2 + \sigma_\gamma^2 + \sigma_\delta^2 + \sigma_\varepsilon^2)}, \quad (13)$$

$$h_\delta^2 = \frac{\sigma_\delta^2}{(\sigma_\alpha^2 + \sigma_\gamma^2 + \sigma_\varepsilon^2)}, \quad (14)$$

em que: σ_α^2 é a variância genética aditiva; σ_γ^2 é a variância genética não-aditiva, σ_δ^2 é a variância de procedências; e σ_ε^2 é a variância residual.

A seleção individual, das melhores famílias e procedências foram simuladas com base nos valores genéticos preditos (*Best linear unbiased predictions, BLUP*) (RESENDE, 2016).

3.6 Ganhos genéticos com a seleção

Com a finalidade de realizar a seleção de materiais genéticos de *T. vulgaris* foram calculados os ganhos genéticos por meio da Equação 15:

$$GS = \frac{\bar{x}_s - \bar{x}_0}{\bar{x}_0} * 100, \quad (15)$$

em que: GS = ganho de seleção; \bar{x}_s são os BLUPs médios da população selecionada; \bar{x}_0 é o BLUP médio de toda população.

Para esse caso, o ganho de seleção é igual ao diferencial de seleção, pois a herdabilidade já está embutida nos efeitos estimados. O ganho foi estimado para todas as intensidades de seleção possíveis, desde selecionar o melhor indivíduo, grupos com os dois melhores, três melhores, e assim sucessivamente até que todos os 1440 indivíduos fossem selecionados. Também foi realizada a seleção da melhor procedência.

Os ganhos foram estimados tanto para os efeitos genéticos aditivos α (isto é, “*estimated breeding values*” – EBV), no intuito de praticar seleção dentro do programa de seleção recorrente intrapopulacional de *T. vulgaris*, a fim de identificar as melhores matrizes para a coleta de sementes ou uso de sementes remanescentes, bem como para os efeitos genéticos totais, isto é, efeitos aditivos α somados aos não aditivos δ (isto é, “*estimated genetic values*” – EGV), que são importantes para identificar indivíduos com maior desempenho para serem futuros clones.

Em ambas as situações foi estimado o tamanho da população de indivíduos não consanguíneos e genótipos não relacionados através do número do status (N_s) (Equação 16) (LINDGREN et al.,1996):

$$N_s = \frac{1}{\bar{A}}, \quad (16)$$

em que: \bar{A} é a média da matriz formada pelo denominador dos coeficientes aditivos de parentesco de ordem $a \times a$, obtidos por meio da informação de *pedigree* (HAYES, VISSCHER e GODDARD, 2009).

4. RESULTADOS

Aos três anos após o plantio, havia 306 plantas mortas, ou seja, contabilizando-se 78,75% de sobrevivência. Já aos 10 anos, observou-se 613 árvores mortas e uma taxa de sobrevivência de 57,43%. Portanto, 307 árvores morreram dos três aos 10 anos de plantio, o que representa 21,32% do total de árvores do experimento. Assim considerar esse aumento de mortalidade é importante, dada a influência que ela pode gerar no crescimento dos indivíduos e nas análises.

A primeira situação de mortalidade analisada (situação A), em que as plantas que morreram até os três anos de idade foram consideradas como dados perdidos (“NA”) e aquelas que morreram após esta idade como valor “0”, propiciou, no ajuste do modelo base, menores valores de AIC (-251,27, Tabela 2) e BIC (-224,90, Tabela 2). Em contrapartida, retirar da análise os dados de mortalidade (situação B), fez com que o modelo base apresentasse maiores valores de AIC (315,40, Tabela 2) e BIC (341,76, Tabela 2). Já ao considerar todas as plantas mortas como “0” (situação C) fez com que os valores dos critérios AIC (-142,049, Tabela 2) e BIC (-115,687, tabela 2) fossem medianos.

Assim, tendo em vista, que valores mais baixos de AIC e BIC indicam melhor desempenho do modelo (BURNHAM & ANDERSON, 2002), considerar os dados de mortalidade após os três anos de plantio (situação A) fez com que o modelo base se ajustasse melhor aos dados de IMA aos 10 anos de idade para estimar os parâmetros genéticos. Ainda, observa-se que a viabilidade desse procedimento foi corroborada pelos fatos dos dados: i) não se mostrarem como *outliers*; ii) por não comprometerem ao padrão de distribuição dos dados (i.e., usando somente as árvores sobreviventes aos 10 anos de idade).

Simultaneamente, foram realizadas análises para verificar a influência das covariáveis, em que procurou-se ajustar o modelo base, considerando as três situações de mortalidade de árvores sem o efeito de nenhuma covariável. Desse modo, quando se considerou a situação A (AIC = 1425,39 e BIC = 1430,66), a situação B (AIC = 1416,56 e BIC = 1421,84) e a situação C (AIC = 1427,34 e BIC = 1432, 61), foram observados maiores valores para os critérios AIC e BIC no ajuste do modelo base. Logo, pode se dizer que as covariáveis melhoram os ajustes do modelo para estimativa dos parâmetros genéticos.

No geral, o melhor modelo ajustado para realizar as estimativas de parâmetros genéticos de *T. vulgaris* baseado nos critérios de AIC e BIC foi o modelo que utilizou os dados de mortalidade da situação A, adicionando-se as covariáveis (Tabela 2).

Tabela 2 - Significância dos componentes do modelo, componentes de variância e parâmetros genéticos de *T. vulgaris* para os três tipos de situações de produtividade aos 10 anos de idade. Efeitos fixos foram selecionados pelo procedimento *stepwise*.

Efeitos Fixos	Plantas que morreram até os três anos de idade= “NA” e plantas mortas após os três anos =0 (Situação A)		Plantas mortas aos 10 anos = “NA” (Situação B)		Plantas mortas aos 10 anos = 0 (Situação C)	
	Q.M.	p-valor	Q.M.	p-valor	Q.M.	p-valor
Blocos	600,87	0,01 ns	533,20	0,05 ns	404,95	0,04 ns
IF.	700,11	0,04 ns	17,82	0,76 ns	699,02	0,03 ns
N. S.	803,20	0,03 ns	0,78	0,95 ns	735,52	0,02ns
M. 8.	14250,43	<0,00*	35695,08	<0,00*	11163,84	<0,00*
Índice Hegyi	437219,47	<0,00*	379681,21	<0,00*	497065,33	<0,00*
Índice Hegyi ²	105401,38	<0,00*	19447,63	<0,00*	113359,19	<0,00*
MAL	2357,66	0,00*	5609,47	<0,00*	1741,46	0,00*
MAT	2,78	0,90 ns	56,90	0,60 ns	27,80	0,66 ns
Efeitos Aleatórios	σ^2	s.e.,	σ^2	s.e.,	σ^2	s.e.,
Parcelas	11,38	5,79	12,24	5,18	0,00	2,83
Aditiva [progênies]	26,99	16,17	6,79	11,47	6,57	6,59
Procedências	11,33	9,38	9,02	7,319	3,78	3,22
Resíduo	225,74	15,76	204,22	12,14	144,90	7,87
Herdabilidades	valor	s.e.,	valor	s.e.,	valor	s.e.,
h^2_α	0,09	0,05	0,02	0,04	0,042	0,04
h^2_δ	0,04	0,03	0,03	0,03	0,024	0,02
h^2	0,13	0,09	0,06	0,08	0,067	0,06
Crítérios do Modelo	Valor		valor		valor	
AIC	-251,27		315,40		-142,04	
BIC	-224,90		341,76		-115,68	

IF = Índice de Falhas; N. S. = Número de Plantas Vizinhas Sobreviventes; M. 8. = Média das 8 Competidoras; MAL = Média das Alocompetitivas; MAT = Média das Autocompetitivas; NA = dados perdidos; h^2_α = herdabilidade sentido restrito; h^2_δ = herdabilidade de procedências; h^2 = herdabilidade sentido amplo QM = Quadrado Médio. Os efeitos fixos não significativos (i.e, com p-valor < 0,05 ÷ 8 = 0,00625, pela correção de Múltiplos testes – Bonferroni) foram removidos do modelo para o cálculo dos efeitos aleatórios; AIC= Akaike Information Criteria; BIC = Bayesian Information Criteria; s.e. = erro padrão da estimativa.

Observa-se que ao decorrer dos anos houve uma grande diminuição na sobrevivência de indivíduos e que esta mortalidade no local analisado favoreceu o crescimento dos indivíduos sobreviventes (Figura 2). Dessa forma, esses indivíduos possuem uma maior produtividade em comparação com os locais em que a sobrevivência é mais uniforme. Por

essa questão, utilizar covariáveis neste estudo foi apropriada para estimar os parâmetros genéticos de *T. vulgaris* aos 10 anos de idade. Isso porque verificou-se locais dentro do experimento que continham sobrevivência em torno de 85% aos três anos de idade (Figura 2A) e aos 10 anos de idade os mesmos apresentavam cerca de 50% da sobrevivência (Figura 2B). Nesses mesmos locais, é observado um IMA em torno de $55 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, aos 10 anos de idade, um dos maiores do experimento. Ressalta-se que a produtividade vai diminuindo à medida que o número de indivíduos sobreviventes aumenta (Figura 2C e 2D). Isso porque o IMA foi estimado a partir de valores de árvores individuais, extrapolado para hectare, o que explica essa relação entre menor número de indivíduos sobreviventes e maior IMA individual, possivelmente devido a menor competição para o indivíduo analisado.

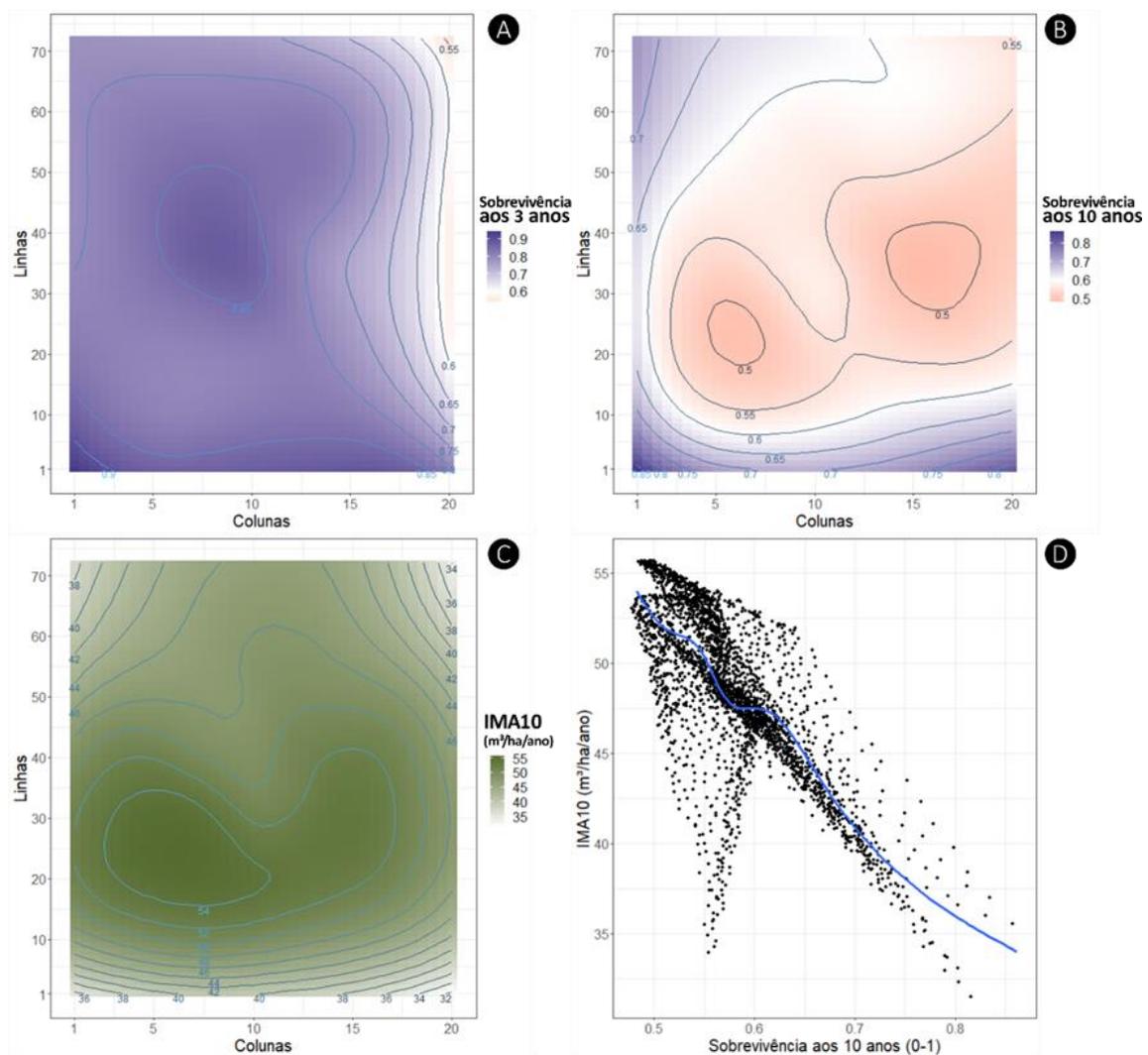


Figura 2 - Comportamento da mortalidade e produtividade média de *T. vulgaris* na área de estudo. As figuras 2A e 2B indicam a sobrevivências na área do teste, em que, por exemplo, 0,85 significa que 85% das plantas estão vivas nessa região. A figura 2C representa a produtividade média das plantas vivas na região do experimento, em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. A figura 2D representa a relação entre a sobrevivência com a produtividade.

Nem todas as covariáveis foram significativas nas estimativas dos parâmetros genéticos. Apenas as covariáveis Média das 8 Competidoras (M.8), Índice de Competição de Hegyi (IC) e Média da Alocompetição (MAL) apresentaram-se como efeitos fixos significativos para a estimativa dos componentes de variância (Tabela 2).

Foram calculadas as médias das procedências em relação as covariáveis (Tabela 3) e foi observado que as covariáveis M8, IC e MAL (Figura 3D, 3E e 3F, respectivamente) apresentaram uma maior média para a procedência Macapá e essa procedência apresentou uma menor média de IMA.

Tabela 3. Média dos Valores de IMA ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$), Mortalidade e das Covariáveis por Procedências

Procedências	IMA	Mortalidade (%)	MAT	I.F.	IC	MAL	N. S.	M.8
Belterra	32,11	43,25	25,94	3,63	28,41	25,66	4,29	26,77
Buritizal	26,30	41,25	21,88	3,69	27,80	24,60	4,20	24,89
Macapá	21,18	60,83	18,84	3,91	37,82	28,63	4,12	27,18
Santarém	29,67	39,81	25,13	3,42	28,62	26,29	4,51	26,95
Savana	23,97	39,74	20,49	3,41	26,19	25,94	4,51	25,64
Média	27,74	44,97	23,25	3,55	28,68	25,98	4,38	26,30

MAT – Média Autocompetição; I.F. índice de Falhas; IC Índice de Competição de Hegyi; MAL Média alo competição; N. S. Número de Plantas Vizinhas Sobreviventes; M8 Média das 8 Competidoras

Já as covariáveis número de árvores vizinhas (Figura 3B), índice de falhas (Figura 3C) e média da autocompetição (Figura 3G) não foram significas estatisticamente para estimar os parâmetros genéticos.

Dentre os componentes de variância estimados a partir do modelo base com melhor ajuste, a variância residual (σ_{ϵ}^2) foi o componente com maior participação na estimativa dos parâmetros genéticos de *T. vulgaris* (Tabela 2), indicando uma alta influência ambiental no experimento. Entretanto, observou se que as covariáveis auxiliaram na redução deste componente e aumentaram o valor da variância aditiva (σ_{α}^2), pois ao estimar os componentes de variância sem as covariáveis a σ_{ϵ}^2 era igual a 792, 33 e σ_{α}^2 12,55, e nas estimativas com as covariáveis a σ_{ϵ}^2 foi igual a 225,74 e a σ_{α}^2 igual a 26,99. Dessa maneira, também foram aumentados os valores das herdabilidades dos indivíduos em consequência do aumento da variância aditiva.

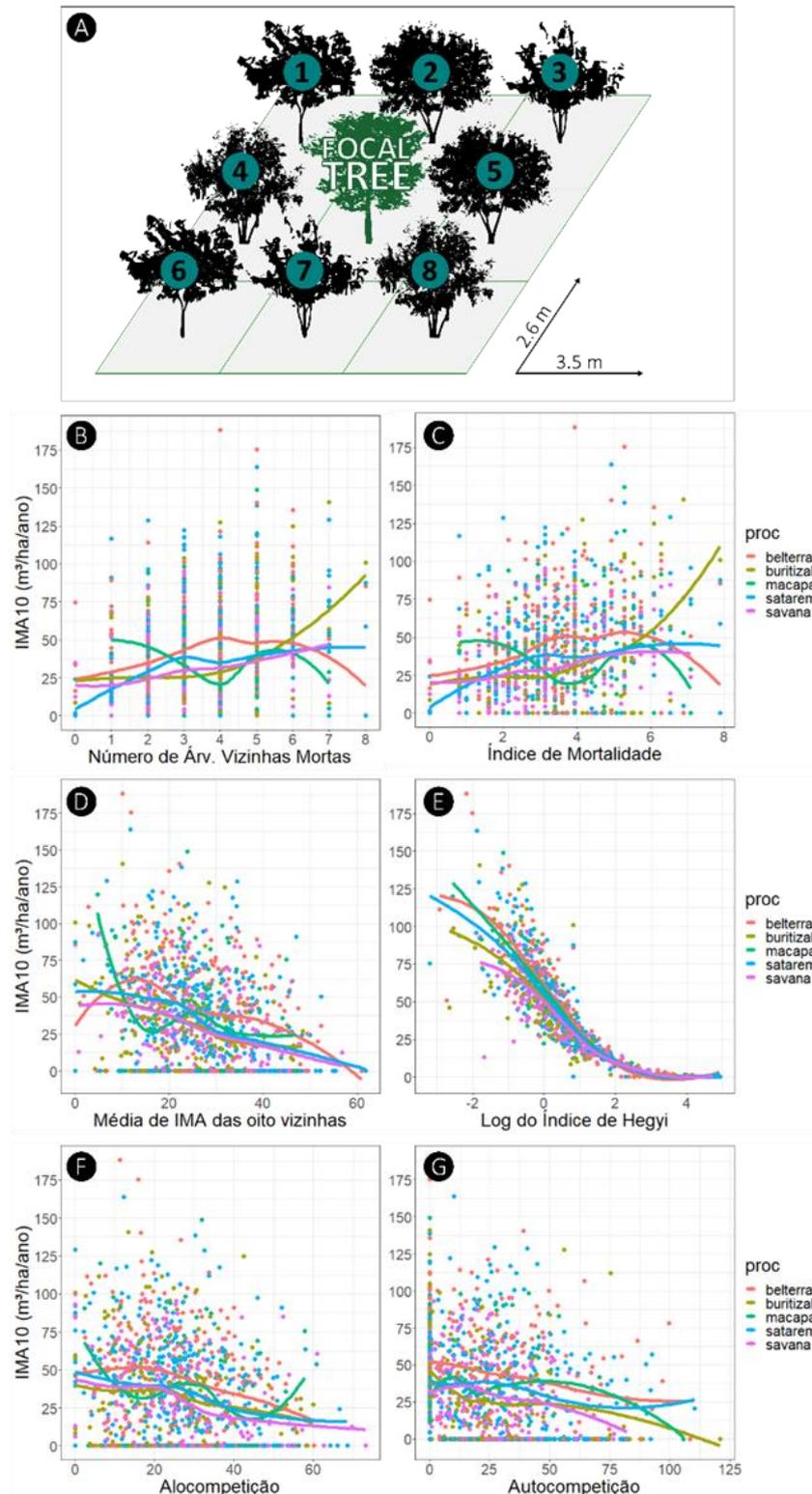


Figura 3 - Comportamento de vizinhança em relação à uma árvore focal. A figura 3A mostra o sistema composto por 9 plantas, sendo oito vizinhas e uma árvore focal, em espaçamento igual a 2,6 metros na linha por 3,5 m na entrelinha de plantio. Nas figuras B, C, D, E, F e G é mostrado a tendência “loess” de Incremento Médio Anual aos 10 anos (IMA10) para cada uma das procedências para todas as covariáveis analisadas.

As estimativas de herdabilidades são consideradas de baixa magnitude quando seus valores estão entre de 0,01 a 0,15, média magnitude 0,15 a 0,50, alta magnitude quando são acima de 0,50 (RESENDE et al., 2002). Neste estudo as herdabilidades obtidas foram de baixas magnitudes, com h_a^2 igual a 0,09, h_d^2 igual a 0,04 e h^2 igual a 0,13 (Tabela 2).

Foram calculados os valores genéticos aditivos (EBV) e os valores genéticos totais (EGV) tanto para as procedências como para os indivíduos (Figura 4). Para as procedências, os valores aditivos (EBV) foram muito próximos. Já para os valores genéticos totais pode-se observar que a procedência Belterra apresentou os maiores valores genéticos Savana os menores (Figura 4 A).

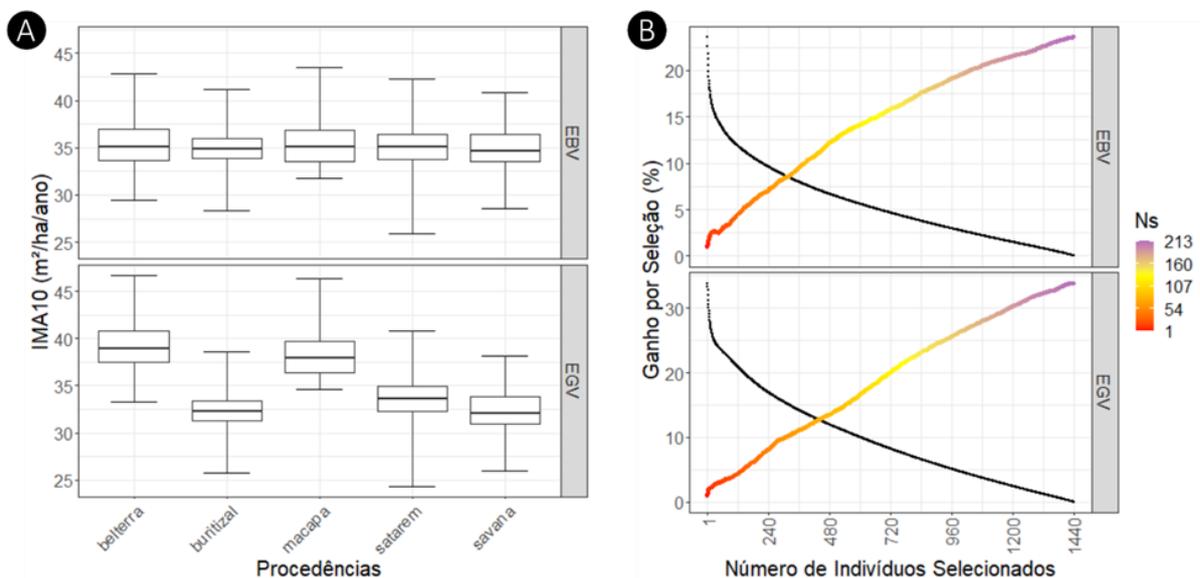


Figura 4 - A: Valores genéticos aditivos (EBV) e valores genéticos totais (EGV) estimados para as procedências; B: Ganhos em % ao se praticar seleção genética (em preto) para cada grupo de indivíduos selecionados e tamanho efetivo (tons coloridos) na forma de Status Number (Ns) tanto para os valores de EBV como para os valores de EGV, notado que o Ns máximo da população total (1440 indivíduos) é de 213.

Para obter maiores ganhos com a seleção foi utilizado o critério de intersecção da curva do ganho de seleção e da curva do tamanho efetivo amostrado para seleção dos melhores indivíduos (Figura 4B). Dessa forma, foram selecionados 480 indivíduos com um tamanho efetivo de 107 indivíduos não consanguíneos e genótipos não relacionados do teste de procedências e progênes de *T. vulgaris*. Observou-se um ganho de seleção de cerca de 15% na seleção baseada nos valores genéticos totais (EGV) e de cerca de 10% na seleção dos valores aditivos (EBV) (Figura 4B). Verifica-se que ao selecionar todos os 1440 indivíduos o tamanho efetivo da população a ser formada é de 213 indivíduos e obtém-se menores porcentagens de ganhos tanto para EGV quanto para EBV (Figura 4B).

Ao verificar a possibilidade de se realizar essa seleção em idades mais precoces, através do modelo multi-traits foi analisada a correlação genética entre o IMA aos três anos de idade e o IMA aos 10 anos e obteve-se um valor igual a 90,12%, indicando viabilidade para realizar esta técnica. Além da viabilidade de seleção precoce, esta alta correlação é um ponto positivo, pois os dados de IMA de *T. vulgaris* aos 10 anos de idade foram estimados a partir da medição de vários fustes por árvore, os quais foram utilizados para calcular o diâmetro equivalente e então o volume. Já os dados de IMA aos três anos de idade foram estimados a partir da medição do fuste com maior diâmetro. Esse resultado indica que medir apenas um fuste pode ser viável para estimar os parâmetros genéticos e praticar a seleção, economizando tempo e recurso financeiros nas medições de campo.

5. DISCUSSÃO

O IMA foi influenciado significativamente pela mortalidade dos indivíduos e pelas covariáveis média das 8 competidoras, índice de competição de Hegyi e média da alocompetição, de forma que quanto maior a média da mortalidade e das covariáveis menor a média de IMA. Isso porque o crescimento de uma árvore focal geralmente é sensível a competição com as árvores vizinhas (CANHAM et al., 2004). Esses fatores foram importantes para estimar os parâmetros genéticos, pois ao considerar os indivíduos que morreram após os três anos como zero nas análises de dados e utilizar as covariáveis diminuiu-se os efeitos ambientais e aumentou-se a expressão da variância genética, melhorando a acurácia na seleção de procedências e de indivíduos de *T. Vulgaris*. A análise da correlação de dados de produtividade das idades de três e 10 anos indicou a que praticar a seleção precoce para o tachi é viável no experimento.

A sobrevivência dos indivíduos do teste de procedências e progênies de *T. vulgaris* deste estudo nos primeiros três anos de plantio foi de 78,75%. Valores de sobrevivência mais altos para a espécie nos anos iniciais de experimentos foram observados em Mato Grosso aos 20 de meses idade, com cerca de 86,5% de sobrevivência no espaçamento de 3 x 3 m (MARTINOTTO et al., 2012) e no Pará, aos após 12 meses de plantio com 83,8% de sobrevivência no espaçamento 2 x 1 m (BRIENZA JÚNIOR et al., 2011). Já em Roraima, em um teste de procedências e progênies, a sobrevivência foi de 62,10%, 50,96% e 50,68% aos 6, 12 e 18 meses após o plantio, respectivamente, no espaçamento 3 x 2 m (CRUZ et al., 2020). Valores em torno de 50% de sobrevivência de *T. vulgaris* foram encontrados Mato Grosso aos 4 anos após o plantio no espaçamento 2 x 2 m (FARIAS, 2016).

Aos 10 anos de idade foi observada uma queda na sobrevivência dos indivíduos no experimento. Essa mortalidade pode estar relacionada ao espaçamento utilizado, tendo em vista que a competição da espécie em condições de menor espaçamento tende a acentuar, o que causa mortalidade no plantio (RODRIGUES et al., 2020). Outro fator que pode estar relacionado a essa mortalidade são questões ecológicas da espécie, que é classificada como pioneira e necessita de luz para seu desenvolvimento e crescimento (FREITAS et al., 2012). Logo, pode-se levantar a hipótese de que o espaçamento adotado não propiciou à espécie ao longo dos anos, condições de luminosidade que pudessem favorecer sua sobrevivência, possibilitando supor que utilizar espaçamentos maiores e uma idade de rotação e análise de dados antes dos 10 anos de idade auxiliaria a diminuir esta mortalidade. Algumas pesquisas apontaram que idades técnicas de corte para *T. vulgaris*, com base na maior produção média

em volume, ocorrem por volta dos 5 a 6 anos (SOARES, dados não publicados). Dessa maneira, recomenda-se que em futuros testes genéticos sejam analisados também nesta idade, a fim de selecionar materiais mais produtivos para a idade rotacional indicada para a espécie.

Observa-se ainda que plantios de *T. vulgaris* no Pará, em espaçamentos mais amplos, proporcionaram porcentagens de sobrevivências maiores com valores de 78,3%, 62,5% e 51,8%, aos 7 anos de idade nos espaçamentos 4 m x 4 m, 4 m x 3 e 4 m x 2 m, respectivamente (NARDUCCI et al., 2016). Isso reforça a hipótese de que o espaçamento utilizado nesse teste de procedências e progênes de *T. vulgaris* poderia ter sido maior, para favorecer o desenvolvimento e a sobrevivência da espécie e assim diminuir a competição intraespecífica dos indivíduos.

Ao comparar a sobrevivência de *T. vulgaris* com a sobrevivência de outras espécies tradicionalmente plantadas como as do gênero *Eucalyptus*, são observadas altos valores de sobrevivência para progênes de irmãos completos de *Eucalyptus* variando de 88,6% aos 2 anos de idades a 83,5% aos 7 anos de idade (HENRIQUES et al., 2018). Entretanto, em condições semelhantes de plantios a sobrevivência aos quatro anos de idade, foi significativamente maior para *T. vulgaris* (>50%) do que para o *Eucalyptus* (<40%) (FARIAS et al., 2016).

Verificou-se que considerar os dados de mortalidade do plantio após três anos de idade iguais a zero (situação A) durante a análise favoreceu o ajuste do modelo para a estimativa dos parâmetros genéticos e para a seleção. Isso porque ao considerar os dados de mortalidade após os três anos de plantio iguais a 0 fez com que a média de IMA diminuísse, o que tornou a média da produtividade mais representativa. Quando se desconsiderava totalmente os dados de mortalidade, havia superestimação da produtividade do plantio, o que possibilitava um erro durante a seleção dos melhores materiais genéticos.

É uma prática recomendável incluir a variável de competição na análise biométrica de ensaios com essências florestais em que os indivíduos são condicionados a competir uns com os outros no seu desenvolvimento (LEONARDECZ NETO et al., 2003). Observou-se que o IMA aos 10 anos de idade dos indivíduos de *T. vulgaris* foi influenciado pelas covariáveis média das 8 competidoras, índice de competição de Hegyi e média de alocompetição. Estas covariáveis estão relacionadas à competição intergenotípica e mostram que as árvores da parcela vizinha influenciaram mais que os indivíduos da própria parcela no IMA do indivíduo analisado. As covariáveis média da alocompetição (MAL) e índice de competição de Hegyi (IC) foram covariáveis significativas também para analisar o volume de madeira em dois testes de progênes de *Eucalyptus* spp (PAVAN et al., 2012). Índices de competição também

foram utilizados para melhorar o ajuste de modelos de crescimento e produção para árvores individuais em uma floresta manejada na Amazônia oriental (OLIVEIRA et al, 2021).

A competição está relacionada a ambientes heterogêneos que pode ser causada por variações microambientais que geram um evento de distúrbio local que, ao longo do tempo, provocará a competição entre as árvores vizinhas (KIM et al., 2015; RESENDE et al., 2016). Essa casualidade faz com que ocorra no plantio o surgimento de árvores dominantes, ou seja, indivíduos que se sobressaem em relação aos outros quanto produtividade, em que sua ocorrência pode estar ligada a qualidade da planta do material implantado, diferenças de fertilidade do solo em microsítios e características inerentes ao material genético (CAMPOE et al., 2013). Dessa forma a utilização de covariáveis no ajuste do modelo auxilia a diminuir os efeitos da variância residual que está ligada ao ambiente de plantio. Neste estudo verificou se a diminuição da variância residual proporcionou um aumento da variância aditiva. Esse resultado também foi observado no ajuste com covariável de competição para os indivíduos de *E. grandis* e *E. urophylla* (PAVAN et al., 2012) e para *Gallesia gorarema* Vell. Moq (LEONARDECZ-NETO et. al., 2003). Entretanto, mesmo com a redução, a variância residual ainda foi a que teve maior influência sobre as estimativas de parâmetros genéticos de *T. vulgaris*, indicando alta influência ambiental.

Como consequência dos baixos valores de variâncias genéticas, observou-se herdabilidades de sentido restrito, de procedências; e de sentido amplo de baixas magnitudes. Estas magnitudes de herdabilidade encontradas neste estudo foram menores que as herdabilidades verificadas para indivíduos de *T. vulgaris* estudados em Roraima, em que se encontrou estimativas de herdabilidade individual no sentido restrito (h^2_{α}) igual a 0,1800 aos 12 meses e a 0,3560 aos 6 meses para variável altura e 0,1473 aos 12 meses a 0,3288 aos 6 meses para diâmetro do caule (CRUZ et al., 2020). Magnitudes maiores de herdabilidade para indivíduos de *T. vulgaris* também foram observadas em Macapá aos 48 meses de idade, com h^2_{α} de 0,20 para a variável altura e 0,192 para a variável DAP (FARIAS NETO & CASTRO, 1999). Assim, pode-se dizer que o controle genético do IMA dos indivíduos e procedências de *T. vulgaris* deste estudo foi influenciado em sua maior parte pelos efeitos ambientais, o que pode ter sido decorrente da alta mortalidade no experimento, que causou um ambiente heterogêneo e por consequência uma alta variância residual. Ainda estes baixos valores podem ser decorrentes também de uma baixa variabilidade genética existente entre os genótipos estudados.

Apesar dos baixos valores encontrados para herdabilidade, foi possível obter ganhos com a seleção dos melhores indivíduos de *T. vulgaris*, em que os indivíduos que possuem

maior valor genético total poderão ser utilizados como potenciais clones, quando houver um protocolo de propagação vegetativa estabelecido para espécie, e os que possuem maiores valores aditivos poderão ser utilizados para realizar propagação seminal ou para conservação da diversidade da espécie. Tamanho efetivo populacional de 107 indivíduos, superior a 30 que é o recomendado para espécies florestais que ainda estão nas primeiras gerações de melhoramento (LINDGREN et al., 1996), proporcionou com ganho de seleção de cerca de 15% na seleção baseada nos valores genéticos totais (EGV) e de cerca de 10% na seleção dos valores aditivos (EBV). Esse número apresenta o tamanho genético do teste de procedência e progênes de *T. vulgaris* que trará uma diversidade genética máxima para reduzir as características indesejáveis da endogamia na seleção, como menor vigor das plantas, menor adaptabilidade e menor produtividade (FORTI et al., 2014). O tamanho efetivo encontrado é o suficiente para se realizar um programa de melhoramento da espécie, pois um tamanho efetivo em torno de 200 indivíduos garante a conservação da variabilidade das espécies alógamas (NUNES et al., 2021), como é o caso do *T. vulgaris*.

A importância ecológica e econômica do tachi torna a necessidade da construção do seu programa de melhoramento genético muito eminente. Assim a seleção precoce por meio do modelo multi-traits comprovou a correlação dos dados de IMA dos indivíduos aos três e 10 anos de idade de *T. vulgaris*. Dessa forma foi possível prever em idade juvenil o desempenho da produção de um indivíduo adulto, diminuindo assim o tempo de seleção, sendo essa uma informação importante para programas de melhoramento genético. Além disso, o modelo ajustado para verificar a seleção precoce desta espécie pode ser recomendado para outras espécies que também tenham uma alta taxa de mortalidade, tendo em vista que neste experimento houve uma baixa sobrevivência que pode estar associada ao espaçamento adensado. A viabilidade da seleção precoce também foi verificada para progênes de *T. vulgaris* aos 48 e 96 meses de idade no Pará (FARIAS NETO et al, 2003). Essa estratégia de seleção também foi viável aos três anos após o plantio para identificar clones de híbridos de *Eucalyptus* com bom vigor de crescimento (BELTRAME et al., 2012).

6. CONCLUSÕES

Foi comprovada a hipótese de que a mortalidade das árvores vizinhas influencia no incremento médio anual de uma árvore focal e quanto maior o número de árvores mortas próximas a ela, maior será a produtividade dessa árvore.

Considerar as árvores mortas após três anos de plantio nos ajustes dos modelos tornou o modelo mais adequado para poder estimar os parâmetros genéticos de *T. vulgaris*.

O ajuste com covariáveis relacionadas à mortalidade das árvores vizinhas melhorou as estimativas dos parâmetros genéticos e propiciou a seleção dos melhores materiais genéticos de *T. vulgaris*, pois as covariáveis proporcionaram uma redução da variância residual e aumento da variância aditiva, que por consequência aumentou as herdabilidades e proporcionou ganhos com a seleção.

Foi possível obter na seleção dos melhores indivíduos de *T. vulgaris* deste estudo cerca de 15% de ganho na seleção baseada nos valores genéticos totais (EGV) e cerca de 10% na seleção dos valores aditivos (EBV) com um tamanho efetivo superior a 30.

A alta correlação genética entre o IMA nos diferentes anos de medição indicou que é possível realizar a seleção precoce dos indivíduos de *T. vulgaris*.

REFERÊNCIAS

- ABREU, D. C. A., et al. Métodos de Superação da Dormência e Substratos para Germinação de Sementes de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H. C. Lima. **Revista Floresta e Ambiente**, v.24, e000718142017, 2017.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- AMARAL, D. D., et al. Checklist da flora arbórea de remanescentes florestais da região metropolitana de Belém e valor histórico dos fragmentos, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. V. 4, n.3, p.231-289. 2009.
- ASSIS, F.T. Produção de híbridos interespecíficos em *Eucalyptus* spp. In: **REUNIÃO SOBRE TÉCNICAS PARA PRODUÇÃO DE HÍBRIDOS**, 1987, Piracicaba, São Paulo. Anais... Piracicaba: IPEF, 1987. p.2-5.
- ASSIS, T. F.; et al. **Melhoramento genético do eucalipto**. Cap. 7. 2015.
- BELTRAME, R., et al. Desempenho silvicultural e seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.47, n.6, p.791-796, 2012.
- BRIENZA JÚNIOR, S., et al. Plantio de árvores de crescimento rápido para recuperação de áreas agrícolas na Amazônia Oriental brasileira: estudo de caso com produção de milho e mandioca. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 347-353, 2011.
- BURNHAM, K. P., ANDERSON, D. R. **Model Selection and Multimodel Inference**. A Paractical Information – Theoretic Approach. Springer-Verlag, New York. 2002.
- CAMPOE, O. C., et al. Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 43-48, 2013.
- CANHAM, C. D., et al. A spatially explicit watershed-scale analysis of dissolved organic carbon in Adirondack lakes. **Ecological applications**, v. 14, n. 3, p. 839-854, 2004.
- CANUTO, D. S., et al. Caracterização genética de um teste de progênies de *Dipteryx alata* Vog. proveniente de remanescente florestal da Estação Ecológica de Paulo de Faria, SP, Brasil. **Hoehnea**. v. 42, n. 4 p. 641-648. 2015.
- CAPPA, E. P., et al. Identification and joint modeling of competition effects and environmental heterogeneity in three Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*) trials. **Tree Genetics & Genomes**, v. 12, n. 6, p. 102, 2016.
- CARDOSO, V. J. M. **Dormência: estabelecimento do processo**. In: FERREIRA, A.G.; BORGHETTI, F. (Org.). Germinação: do básico ao aplicado. Porto Alegre: Artmed, p. 95-108. 2004.

- CARPANEZZI, A. A., et al. Aspectos ecológicos e silviculturais de tachi-branco-da-terra-firme (*Sclerolobium paniculatum*). Curitiba: EMBRAPA-URPFCS, 1983. 8 p. (EMBRAPA-URPFCS. Circular técnica, 8).
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, v. 4, 644 p. . Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica ; Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2010.
- CARVALHO, P. E. R. **Taxi-Branco**. Circular técnica, 111. Colombo: Embrapa Florestas. 11 p. 2005.
- CASTRO, A. W. V., et al. Efeito do espaçamento na produtividade de biomassa de taxi-branco (*Sclerolobium paniculatum* Vogel). **Acta Amazônia**, v.28, n.2, p.141-146, 1998.
- CASTRO, A.W.V., et al. Comportamento silvicultural de *Sclerolobium paniculatum* (Taxi-branco) no cerrado amapaense. Macapá, AP: **EMBRAPA-UEPAE** de Macapá, 4p. (EMBRAPA-UEPAE de Macapá. Comunicado Técnico, 07). 1990.
- CLEVELAND, R. B., et al. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on Loess. **Journal of Official Statistic**, v. 6, n. 1, p. 3–70, 1990.
- CLIMATE-DATA.ORG. Dados climáticos para cidades mundiais. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/para/monte-dourado-317503/>>. Acesso em: 03/04/2022.
- COVARRUBIAS-PAZARAN, G. Genome-assisted prediction of quantitative traits using the R package sommer. **PloS one**, v. 11, n. 6, p. e0156744, 2016.
- CRUZ, C. D. **Princípios de Genética Quantitativa**. Viçosa: UFV, 2005. 394p. 2ª reimpressão 2012.
- CRUZ, S. L., et al. 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.
- DIAS, L. E., et. al. Formação de mudas de táxi-branco (*Sclerolobium paniculatum* Vogel): resposta a nitrogênio, potássio e enxofre. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 16, n. 2, p. 135-143, 1992.
- DRAPER, N. R.; GUTTMAN, I. Incorporating overlap effects from neighbouring units into surface models. Applied statistics. **Journal of the Royal Statistcs Society (C)**, v.29, p.128-134, 1980.
- EDWARDS, M. D. The design, layout and control of provenance experiments. **Silvae genetica**, v.5, p. 69- 180, 1956.
- FALCONER, D. S. **Introduction to Quantitative Genetics**. 3. ed. Longman Scientific and Technical. New York, 1989.
- FALCONER, D. S., MACKAY, T. E. C., **Introduction to Quantitative Genetics**, 4th ed. Longman, Essex. 1996.

FARIAS NETO, J. T., et al. Aplicação da seleção precoce em famílias de meios irmãos de taxi-branco. **Acta Amazonica, Manaus**, v. 33, n. 1, p. 85-91, 2003.

FARIAS NETO, J. T.; CASTRO, A. W. V. Aplicação de diferentes critérios de seleção no melhoramento genético do taxi-branco. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 41, p. 46- 54, jul./dez. 2000.

FARIAS NETO, J. T.; CASTRO, A. W. V. Avaliação de Progênes de Taxi-branco (*Sclerolobium paniculatum*) e estimativas de parâmetros genéticos. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 29, n. 3, p. 423- 428, 1999.

FARIAS, J., et al. Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 173-182, 2016.

FORTI, G., et. al. Low genetic diversity and intrapopulation spatial genetic structure of the Atlantic Forest tree, *Esenkia leiocarpa* Engl. (Rutaceae). **Annals of Forest Research**, [s.l.], v. 57, n. 2, p. 165-174, 2014.

FREITAS, G. A., et. al. Influência do sombreamento na qualidade de mudas de *Sclerolobium paniculatum* Vogel para recuperação de área degradada. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 3, p. 5-12, 2012.

GONÇALVES, P. de S., et al. Early selection for growth vigor in rubber tree genotypes in northwestern São Paulo state (Brazil). **Genetics and Molecular Biology**, v.21, p.620-630, 1998.

HAYES, B.J., et al. Increased accuracy of artificial selection by using the realized relationship matrix. **Genet Res**, v. 91, n.1, p. 47-60, 2009.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack pine stands. In: FRIES, J., ed. **Growth models for tree and stand simulation**. Stockholm: Department of Forest Yield. Research notes, n.30, p.74-85, 1974.

HENRIQUES, E. P., et al. Seleção genética em teste de progênes de irmãos completos de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Scientia Florestalis**, v. 46, n. 119, p. 405-413, 2018.

HÜHN, M. Populationsgenetische untersuchungen zur phänotypischen selektion in pflanzenständen mit konkurrenz. **Silvae genetica**, v.22, p. 2-145, 1973.

HÜHN, M. Über den einflub der konkurrenz auf die aussagefähigkeit forstlicher und landwirtschaftlicher versuche: experimentalle ergebnisse aus einer feldversuchsserie mit fichtenkreuzgen. **Silvae genetica**, v.23, p.74-94, 1974.

LEONARDECZ-NETO, E., et al. Ajuste para a competição entre plantas em teste de progênes e procedências de essências florestais. **Scientia Florestalis**, 63, p. 136-149. 2003.

LIMA, H.C. *Tachigali* in Lista de Espécies da Flora do Brasil. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. de 2015. Disponível em: <<http://floradobrasil2015.jbrj.gov.br/FB100914>>. Acesso em: 19 de maio de 2022.

LINDGREN, F. et al. Validação de modelos por testes de permutação: aplicações à seleção de variáveis. **Journal of Chemometrics**, v. 10, n. 5-6, pág. 521-532, 1996.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. Nova Odessa/SP: Instituto Plantarum, volume 2. 2. Ed. 2002.

MAGNUSSEN, S.; YEATMAN, C. W. Early testing of jack pine.: II. Variance and repeatability of stem and branch characters. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 17, n. 6, p. 460-465, 1987.

MARTINOTTO, F., et al. Sobrevivência e crescimento inicial de espécies arbóreas nativas do Cerrado em consórcio com mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, p. 22-29. 2012.

MASSARO, R. A. M., et al. Viabilidade de aplicação da seleção precoce em testes clonais de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, v.20, p.597-609, 2010.

MOCHIUTTI, S., et al. Produção de Serapilheira e Retorno de Nutrientes de um Povoamento de Taxi-branco e de uma Floresta Secundária no Amapá. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 52, p. 3-3, 2006.

NARDUCCI, T. S., et al. Growth and survival of *Sclerolobium paniculatum* vogel and the relationship between rainfall and the increment in diameter at different planting spacings. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 447-454. 2016.

NUNES, A. C. P., et al. Conservação genética de espécies florestais nativas: número de progênes e indivíduos a conservar para garantir a perpetuação da espécie no ambiente. **Boletim Técnico SIF**, Viçosa-MG, n.05, p.1-6, 2021.

OLIVEIRA, E. K. B., et al. Competition indices after reduced impact logging in the Brazilian Amazon, **Journal of Environmental Management**, v. 281, 111898, 2021.

ORELLANA, B. B. M. A. et al. Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, v. 6, p. 773-781. 2018.

PAVAN, B. E., et al. Efeito competitivo em testes de progênes de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 433-443. 2012.

PIRES, I. E., et al. **Genética florestal**. Viçosa: Arka, 2011.

RAMOS, L. O. et al. Wood volumetry of *Tachigali vulgaris* pure plantations in different planting spacings. **Floresta**, v. 51, n. 4, p. 990-999, set. 2021.

RESENDE, M. D. V.; ALVES, R. S. Genética: estratégias de melhoramento e métodos de seleção. In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 1160 p. 2021.

RESENDE, M. D. V. et al. Estimativas de parâmetros genéticos e predição de valores genotípicos no melhoramento do cafeeiro pelo procedimento REML/BLUP. **Bragantia**, v. 60, p. 185-193, 2001.

RESENDE, M. D. V. **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes**. Brasília: Embrapa. Informação Tecnológica, 975p. 2002.

RESENDE, M. D. V. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 16, n. September, p. 330–339, 2016.

RESENDE, M. D. V.; BARBOSA, M. H. P. **Melhoramento genético de plantas de propagação assexuada**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005.

RESENDE, M. D. V.; BARBOSA, M. H. P. **Melhoramento genético de plantas de propagação assexuada**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005.

RESENDE, R.T., et al. Intra-genotypic competition of *Eucalyptus* clones generated by environmental heterogeneity can optimize productivity in forest stands. **Forest Ecology and Management**. 380, p .50–58. 2016.

RODRIGUES, R. P., et al. 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.

SANTOS, H. G., et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SCHWARZ, G. Estimating the Dimension of a Model. **The Annals of Statistics**, v. 6, n. 2, p. 461–464, 1978.

SILVA, L. F. G.; LIMA, H. C. de. Mudanças nomenclaturais no gênero *Tachigali* Aubl. (Leguminosae - Caesalpinioideae) no Brasil. **Rodriguésia** [online]., v. 58, n. 2, 2007.

SILVA, M. O. S., et al. Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacing for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 211-224, 2021.

SILVA, R. R., et al. Desenvolvimento inicial de plântulas de *Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum. sob influência de sombreamento. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 365-370, 2007.

SIMÕES, P. H. O., et al. Biochemical response of Tachi-branco (*Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima) in function of sources and doses of nitrogen. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, n12, p.1579-1587. 2017.

SOUSA, V. G., et al. Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H.C. Lima): botânica, ecologia e silvicultura. **Belém: Embrapa Amazônia Oriental**, p. 37, 2016.

SOUZA, C. R., et al. Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 7-14. 2008.

SOUZA, C. R., et al. Taxi-branco (*Sclerolobium paniculatum* Vogel). Embrapa Amazônia Ocidental. Documentos; 34. **Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental**, 23 p. 2004.

SOUZA, J. C.; et al. Ambientes para a produção de mudas e nodulação por rizóbios em *Tachigali vulgaris*. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 116-129. 2019.

STALLBAUN, P. H. et al. Resistência natural da madeira de *Tachigali vulgaris* ao fungo xilófago *Postia placenta*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 459–463, 2016.

TOMASELLI, I., et al. Caracterização da madeira de taxi-branco-da-terra-firme (*Scleralabium paniculatum* VOGUEL) para energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n.6/7, p.33-44, jun. 1983.

TONINI, H., et al. Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo-PR, v. 38, e201801569, p. 1-8, 2018.

VENTURIERI, G. C., et al. Ecologia reprodutiva do taxi-branco (*Sclerolobium paniculatum* var. *paniculatum* Vogel) Leg: Caesalpinioideae. In: SIMPÓSIO SILVICULTURA NA AMAZÔNIA ORIENTAL: contribuições do Projeto Embrapa/DFID, 1999, Belém, PA. Resumos expandidos. Belém, PA: EMBRAPA-CPATU: DFID, 1999.