



Evolução da mortalidade e seleção para diâmetro em teste de progênies de *Astronium urundeuva* infestado por patógeno

Tainara da Silva Santos¹, Karina Martins^{2*}, Daniele Fernanda Zulian³, Carla Américo⁴, Laerte João Bertonha⁵, Marcela Aparecida de Moraes Silvestre⁶, André Cordeiro Alves dos Santos², José Cambuim⁷, Mario Luiz Teixeira de Moraes⁷

¹Eucatex, Setor de Tecnologia, Rua Antônio Nicolosi Filho 262, Jardim Chácara dos Pinheiros, CEP 18609-380, Botucatu, SP, Brasil

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Biologia, Rodovia João Leme dos Santos, Km 110, CEP 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil

³Irani Papel e Embalagem S.A., Rua Governador Hercílio Luz, 1348, CEP 89670-000, Catanduvas, SC

⁴Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, Rodovia João Leme dos Santos, km 110, CEP 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil

⁵Superintendência da Polícia Técnico-Científica, Instituto de Criminalística "Perito Criminal Dr. Octávio Eduardo de Brito Alvarenga", IC – CP – Núcleo De Perícias Científicas de São José Do Rio Preto – Equipe de Perícias de Catanduva, SP, Avenida Theodor Rosa Filho, 1250, Parque Iracema, CEP 15809-007, Catanduva, SP, Brasil

⁶Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências, Departamento de Ciências Químicas e Biológicas, Rua Professor Dr. Antônio Celso Wagner Zanin, 250, Distrito de Rubião Júnior, CEP 18618-689, Botucatu, SP, Brasil

⁷Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão, Avenida Brasil, 56, CEP 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

*Autor correspondente:
kmartins@ufscar.br

Termos para indexação:

Índice de vegetação
Herdabilidade
Correlação genética

Index terms:

Vegetation index
Heritability
Genetic correlation

Histórico do artigo:

Recebido em 12/10/2022
Aprovado tecnicamente em 03/05/2024
Aprovação final em 24/03/2025
Publicado em 13/05/2025

Resumo - *Astronium urundeuva* (aroeira verdadeira) é considerada uma espécie ameaçada nos âmbitos nacional e global. Em um teste de progênies puro foi verificado sintoma de apodrecimento do fuste e mortalidade devido a um patógeno. Os objetivos do trabalho foram: quantificar a evolução temporal da infestação no plantio; estimar parâmetros genéticos em três idades e determinar a eficácia do uso de índices de vegetação na detecção de mortalidade em plantios. As avaliações do diâmetro a 1,30 m do solo (DAP, cm) e da sobrevivência (%) foram feitas aos 11, 16 e 22 anos. Para o caráter DAP, a herdabilidade entre médias de progênies variou de 0,32 a 0,44, indicando a possibilidade de ganho genético. Os percentuais de sobrevivência aos 11, 16 e 22 anos foram, respectivamente, de 95,7%, 92,1% e 86,1%, com dependência espacial de sobrevivência entre as progênies. A sobrevivência obtida a partir do índice de vegetação foi altamente correlacionada à mortalidade medida em campo, sendo, portanto, um método válido e eficiente para o uso proposto.

Mortality evolution and selection for tree diameter in a progeny test of *Astronium urundeuva* infested by a pathogen



Abstract - *Astronium urundeuva* (true aroeira) is classified as an endangered species in Brazilian and global levels. In a pure progeny test was observed symptoms of stem rot and high mortality due to pathogen attack. The present work had as objectives: quantify the infestation level over the years; estimate genetic parameters at three ages; and determine the effectiveness of vegetation index analysis in detecting mortality in plantations. Measurements of tree diameter at 1.30 m above ground level (DBH, cm) and survival were performed at 11, 16 and 22 years old. For DBH, the heritability among progeny means ranged from 0.32 to 0.44, indicating the possibility of genetic gains. Survival at 11, 16 and 22 years old were 95.7%, 92.1% and 86.1%, respectively, with spatial dependence of survival among progenies. The survival percentage obtained from the vegetation index was highly correlated with the survival measured in the field, being, therefore, a valid and efficient method for the proposed use.

Introdução

De ocorrência natural desde o Ceará até o Chaco argentino, *Astronium urundeuva* (M. Allemão) Engl. (Anacardiaceae) é conhecida como aroeira-verdadeira ou aroeira preta. Possui madeira de crescimento lento a moderado (Canuto et al., 2016), com cerne durável e altamente resistente a cupins (Queiroz et al., 2002). Em consequência da elevada qualidade da madeira, a espécie foi extremamente explorada e atualmente se encontra na lista oficial das espécies ameaçadas de extinção da IUCN na categoria vulnerável (Rodriguez et al., 2017). Segundo Canuto et al. (2016), devido às elevadas ações antrópicas de exploração da espécie, têm-se recorrido à conservação ex situ, por meio de testes de progênies e procedências, que promovem maior garantia da conservação da diversidade genética das populações.

Nesse contexto, desde 1986 foram instalados vários experimentos com diversas espécies arbóreas nativas para futura formação de pomares de sementes por mudas na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), localizada no município de Selvíria, estado de Mato Grosso do Sul. Atualmente, existem 19 testes de progênies de *A. urundeuva*, oriundas de 12 locais distribuídos em diferentes biomas, estabelecidos em plantios puros e mistos com diferentes combinações de espécies (Cambuim et al., 2021). Além de conservar amostras representativas das populações naturais, retendo alelos e combinações alélicas, os testes de progênies e procedências configuram materiais de base valiosos para o desenvolvimento de programas de melhoramento genético. A caracterização e avaliação desses plantios possibilita estimar parâmetros genéticos, o que é essencial para a escolha das melhores estratégias de conservação e melhoramento (Guerra et al., 2009; Riva et al., 2020).

A. urundeuva é incluída no grupo de madeiras imputrescíveis, devido à formação de extrativos como o tanino, que apresenta efeitos fungicida e inseticida, atuando como barreira de proteção química e mecânica (Queiroz et al., 2002). Atualmente, há relatos da eficácia de extratos da casca, cerne e folhas de *A. urundeuva* contra infecções fúngicas, bacterianas bem como atividade termicida (Sá et al., 2009; Sarria et al., 2018). Estas informações dão indícios de uma possível resistência de *A. urundeuva* a organismos patogênicos. Entretanto, estudos realizados nesta linha com a espécie basearam-se somente na análise bioquímica de seus extrativos,

sendo necessários mais estudos e avaliações de plantios em campo de forma que sejam conclusivos quanto à resistência ou não de *A. urundeuva* a organismos patogênicos, o grau e a velocidade de progressão das possíveis doenças, caso presentes. Um dos testes de progênies da espécie plantado na FEIS/UNESP foi recentemente diagnosticado com severos danos no tronco, apresentando sintomas de trincamento, apodrecimento do tronco e mortalidade, sob suspeita de infestação por patógeno. Assim, devido à urgente necessidade de se evitar a perda deste material, faz-se necessário mapear a mortalidade no plantio, para então propor estratégias de intervenção para conter o avanço da infestação.

Uma vez que o experimento já havia sido mensurado em outras ocasiões (Moraes et al., 2012; Bertonha et al., 2016), propomos nesse trabalho comparar mensurações fenotípicas em três idades do teste para resgatar o histórico de evolução da doença. Considerando que nem sempre os pesquisadores têm acesso aos dados de avaliações fenotípicas em diferentes idades para quantificar o avanço direcionado da mortalidade em plantios, há necessidade de que outras estratégias de quantificação do avanço da mortalidade sejam utilizadas e validadas. Como recurso para análise fitossanitária de plantios, propomos o uso de índices de vegetação estimados a partir da análise de mapas, os quais possibilitam avaliar o estado de saúde de plantios e detectar casos de estresse hídrico e doenças. O índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) é um dos mais comumente usados e estudados (Rouse Junior et al., 1973; Costa et al., 2020). De acordo com Qiu et al. (2021), os resultados obtidos a partir do índice NDVI têm sido usados com sucesso em muitas aplicações, como estimativa de produtividade da vegetação (Ruimy et al., 1994; Prince & Goward, 1995; Myneni et al., 2002), monitoramento de fenologia (Zhang et al., 2004; Delbart et al., 2006; Cao et al., 2018), e mapeamento da cobertura da terra e detecção de mudanças no uso e cobertura do solo (Lunetta et al., 2006; Gao et al., 2017). Assim, de posse das análises de mortalidade, tanto com base nos dados fenotípicos coletados em campo quanto nas análises de NDVI, buscamos comparar as metodologias com o intuito de avaliar a eficácia do NDVI na detecção de mortalidade em plantios.

Desse modo, o presente estudo teve por objetivo principal ampliar os conhecimentos referentes à aroeira, por meio de uma avaliação multidisciplinar do teste de progênie com sintomas de ataque por patógeno. Os objetivos específicos foram (i) quantificar o nível de infestação no plantio ao longo

dos anos, com uso de imagens de satélite e de dados de mortalidade quantificados em campo; (ii) estimar parâmetros genéticos e a correlação fenotípica e genotípica entre três idades; (iii) determinar a eficácia da análise de NDVI na detecção de mortalidade em plantios; e (iv) recomendar intervenções no plantio com vistas ao controle do patógeno.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo e do plantio

O teste de progênie de *Astronium urundeuva* foi instalado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), no município de Selvíria, estado de Mato Grosso do Sul, Brasil (Figura 1). O solo na FEPE é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico argiloso, A moderado

hipidistrófico, álico, caulínítico, férrico, compactado, muito profundo e moderadamente ácido (Santos, 2018). O clima da região é classificado como Aw, segundo o sistema Köppen, com temperatura e precipitação média anual em torno de 24,5 °C e 1.300 mm, respectivamente (Santos & Hernandez, 2013; Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2022).

O teste de progênes foi estabelecido em 1997 a partir de sementes de polinização livre procedentes de 30 árvores matrizes da Estação Ecológica do Instituto Florestal no município de Paulo de Faria, estado de São Paulo. Encontra-se plantado em um espaçamento de 3,0 m x 1,5 m, constituído de 30 progênes (tratamentos), três repetições, 10 plantas por parcela linear, em delineamento de blocos completos casualizados. Há uma bordadura de uma linha da mesma espécie ao redor de todo o experimento.

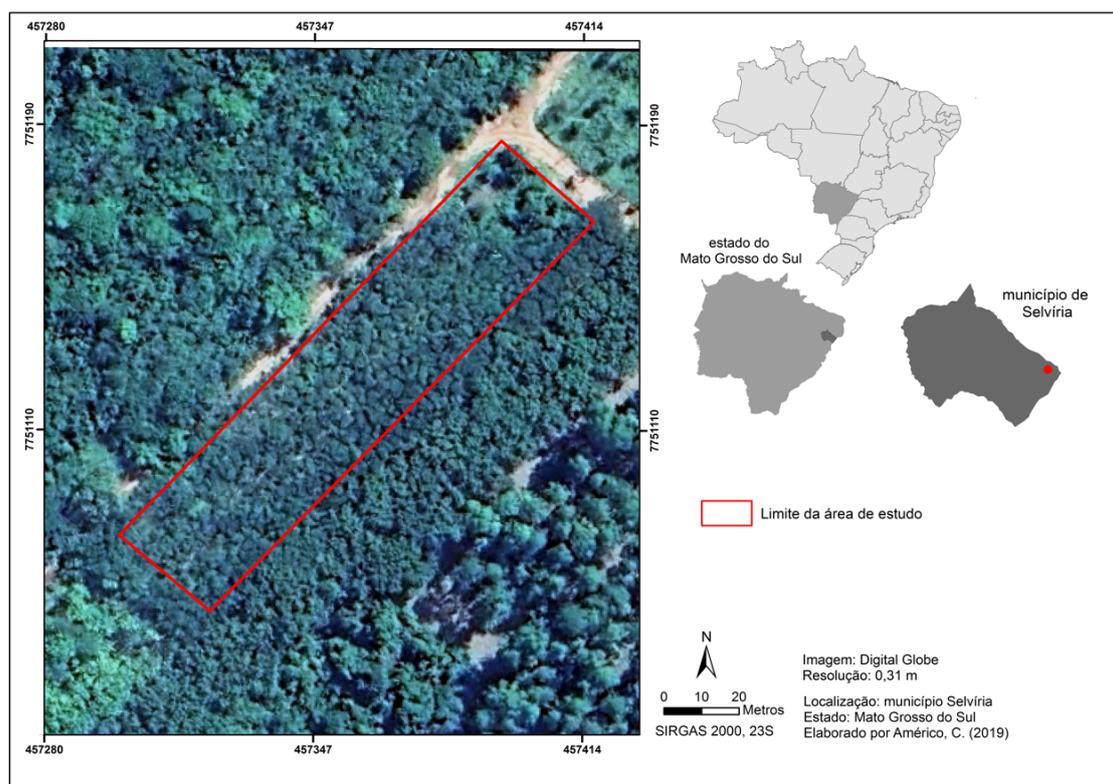


Figura 1. Localização do teste de progênes de *Astronium urundeuva* na Fazenda Experimental da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, em Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil.

Figure 1. Location of *Astronium urundeuva* progeny test at the Experimental Farm of Ilha Solteira Engineering Faculty, in Selvíria, Mato Grosso do Sul State, Brazil.

Avaliação do plantio

Aos 22 anos de implantação do experimento, foram realizadas medições de circunferência a 1,30 m do solo (CAP) com uso de fita métrica, e os valores foram posteriormente convertidos em diâmetro a 1,30 m do solo (DAP, cm). A mortalidade foi quantificada por meio do registro do número de falhas e da contagem das árvores mortas ainda presentes no plantio. É considerada falha a situação em que não há árvore, devido à morte da planta, seja ocasionada por doença ou outras causas. Foram

também classificadas como mortas as árvores que ainda estão presentes no plantio, mas com 100% de desfolha, degradação do fuste e demais sintomas de ataque por patógeno, tais como a murcha das folhas, envassouramento e o escurecimento do fuste (Figura 2). Para fins de comparação da taxa de mortalidade e do crescimento em DAP, foram ainda obtidos dados de medições anteriores do mesmo teste, realizadas aos 11 anos (Moraes et al., 2012) e aos 16 anos (Bertonha et al., 2016), disponibilizados pelos autores.



Figura 2. Sintomas nas árvores de *Astronium urundeuva* observados no teste de progênie: (a) escurecimento do fuste e broqueamento por insetos xilófagos; (b) amostra de casca manchada pelo patógeno; (c) murcha das folhas; (d) fuste com broqueamento por insetos xilófagos.

Figure 2. Symptoms observed in *Astronium urundeuva* trees in the progeny test: (a) stem darkening and xylophagous insects boring; (b) bark sample stained by the pathogen; (c) leaf wilting; (d) stem boring by xylophagous insects.

Análise de dados de diâmetro e sobrevivência

As análises estatísticas e a estimação de parâmetros genéticos foram obtidas com o programa Selegen-REML/BLUP (Resende, 2016). Para avaliação dos indivíduos em progênie de meios-irmãos (ou polinização aberta em espécies alógamas), foi utilizado o modelo 93, que é usado

para análise de dados de experimentos em delineamento de blocos completos. Baseia-se no modelo matemático apresentado na Equação 1.

$$y = Xr + Za + Wp + e \quad (1)$$

Em que y é o vetor de dados, r é o vetor dos efeitos de repetição (assumidos como fixos) somados à média geral, a é o vetor dos efeitos

genéticos aditivos individuais (assumidos como aleatórios), p é o vetor dos efeitos de parcela, e é o vetor de erros ou resíduos (aleatórios). As letras maiúsculas representam as matrizes de incidência para os referidos efeitos.

Os parâmetros genéticos foram estimados de acordo com Vencovsky & Barriga (1992) e Resende (2002), a saber; variância genética aditiva ($\hat{\sigma}_a^2$), variância ambiental entre parcelas ($\hat{\sigma}_e^2$), variância residual (ambiental + não aditiva) ($\hat{\sigma}_e^2$), variância fenotípica individual ($\hat{\sigma}_f^2$), herdabilidade individual dos efeitos aditivos (\hat{h}_a^2), coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas (\hat{c}_p^2), herdabilidade da média de progênies (\hat{h}_m^2), acurácia (r_{aa}), herdabilidade aditiva dentro de parcela (\hat{h}_{ad}^2), coeficiente de variação genética aditiva individual (cv_g), coeficiente de variação genotípica entre progênies (cv_g), coeficiente de variação experimental (cv) e coeficiente de variação relativa (cv).

Posteriormente, o modelo 8, foi aplicado para análise de dados de experimentos em delineamento em blocos completos com resultado por indivíduo para avaliação em um local e em várias colheitas ou safras, sendo utilizado para obtenção dos valores de repetibilidade individual. Esse baseia-se no modelo matemático apresentado na Equação 2.

$$\gamma = X_m + Z_a + W_p + T_s + e \quad (2)$$

Em que m é o vetor dos efeitos das combinações medição-repetição (assumidos como fixos) somados à média geral, s é vetor dos efeitos permanentes (aleatórios) e os demais vetores foram definidos anteriormente. O vetor m contempla todas as medições em todas as repetições e ajusta simultaneamente para os efeitos de repetições, de medição e da interação entre repetição e medição (Resende, 2016). As letras maiúsculas representam as matrizes de incidência para os referidos efeitos.

A partir desse modelo, avaliou-se a efetividade da seleção para diâmetro aos 11 e aos 16 anos com base no índice de eficiência de seleção. Segundo Grattapaglia & Resende (2011), a resposta à seleção é inversamente proporcional à duração do ciclo reprodutivo. Assim, à medida que o tempo necessário para completar uma geração de reprodução é reduzido, a resposta de seleção por unidade de tempo aumenta. Assim foi calculado o ganho de seleção por ano para as idades de 16 e 22 anos com a Equação 3.

$$GS_{\text{ano}} = \frac{r_{aa} \times I_s \times \hat{\sigma}_a^2}{I_d} \quad (3)$$

Em que I_s é a intensidade de seleção e I_d a idade do plantio.

De posse dos ganhos nas duas idades, o índice de eficiência de seleção foi obtido como a razão entre os ganhos nas duas idades.

Mapeamento da taxa de sobrevivência por imagens de satélite

Em comparativo com os dados de sobrevivência medidas em campo e descritas no item anterior, utilizaram-se imagens de satélite para contabilizar a taxa percentual de sobrevivência do teste ao longo dos anos. Foram analisadas imagens orbitais do satélite Landsat (30 m) nos anos de 2008 (11 anos), 2013 (16 anos) e 2019 (22 anos), os quais coincidem com os anos de avaliação fenotípica. A escolha do satélite se deu pela disponibilidade de imagens orbitais para os anos em questão, sendo utilizadas imagens do último mês de cada ano, sendo elas pré-processadas com as devidas correções.

Para isso, as bandas de infravermelho próximo (IVP) e vermelho (V) foram utilizadas para compor o índice de vegetação da diferença normalizada (*normalized difference vegetation index* - NDVI), desenvolvido por Rouse Junior et al. (1973). Embora existam muitos índices de vegetação, o mais frequentemente utilizado para a caracterização da vegetação é o NDVI, por oferecer bons contrastes em relação a outros elementos da paisagem.

O índice NDVI estima a atividade fotossintética por uma combinação de bandas de vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP) que são geralmente condicionadas pela presença de clorofila, cujo cálculo é dado pela Equação 4.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (4)$$

Em que: IVP é o valor da reflectância da banda no Infravermelho próximo e V é o valor de reflectância da banda no vermelho.

O NDVI varia entre -1 e +1 e valores maiores representam maior atividade fotossintética, o que indica, indiretamente, uma vegetação mais densa (Spadoni et al., 2020). O pré-processamento das imagens e o cálculo do NDVI foram realizados em Sistema de Informação Geográfica (SIG), sendo os dados padronizados para o datum SIRGAS 2000, 23S.

Utilizou-se uma reclassificação, para extrair informações das imagens de NDVI e reconhecer padrões e objetos homogêneos e para mapear as áreas da superfície terrestre, as quais corresponderam aos plantios de *A. urundeuva*.

Resultados

Parâmetros genéticos para DAP

Para o caráter diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), os valores de *deviance* mostraram que não há diferença significativa entre as parcelas e entre progênies nas idades avaliadas, considerando o nível de 5% significância (Tabela 1). Para efeito de bloco, os valores de *F* obtidos de 7,1579 (11 anos), 6,7951 (16 anos) e 11,0392 (22 anos) foram significativos em nível de 1% ($F_{\text{tab}} = 5,420$), mostrando a diferença entre blocos no desenvolvimento das progênies, devido a fatores ambientais.

Tabela 1. Valores de *deviance* do teste de razão de verossimilhança (LRT) para o diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), em um teste de progênies de *Astronium urundeuva*, em três idades em Selvíria, MS, Brasil.

Table 1. Likelihood ratio test (LRT) deviances for diameter at 1.30 m above ground level (DBH) in the *Astronium urundeuva* progeny test evaluated at three ages, in Selvíria, Mato Grosso do Sul State, Brazil.

Idade (anos)	Valores de <i>deviance</i>		
	11	16	22
Progênie	1,42 ^{ns}	3,19 ^{ns}	2,65 ^{ns}
Parcela	1,92 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,48 ^{ns}

^{ns} não significativo a 5% para o teste de qui-quadrado com um grau de liberdade.

^{ns}: non-significant at 5% for a qui-square test, one degree of freedom.

A partir dos parâmetros genéticos (REML Individual) foi feita a caracterização da população estudada (Tabela 2). Os valores para herdabilidade

individual dos efeitos aditivos (h_a^2) para DAP foram baixos (de 0,08 a 0,11) e não variaram significativamente ao longo dos anos, considerando os valores de desvio padrão, o que significa que os efeitos aditivos não foram afetados pelas perturbações sofridas no teste. Esses valores indicam um baixo controle genético do caráter analisado e a pequena possibilidade de se obter progressos genéticos por seleção individual.

Por outro lado, os valores de h_m^2 variaram de mediano (0,32) a relativamente alto (0,44) entre as idades avaliadas, sugerindo a possibilidade de se obter ganhos genéticos com a seleção das melhores progênies. A acurácia variou de 0,54 a 0,64 entre idades, sendo considerada moderada (considera-se alta > 0,70) (Tabela 2).

Os valores do coeficiente de variação genética em nível de indivíduo aumentaram com a idade (de 8,8% a 11,9%), bem como os valores de coeficiente de variação genética entre progênies (4,4% a 6,0%). O coeficiente de variação aditiva não teve mudança significativa ao longo das três idades, o que indica uma forte correlação entre anos (Tabela 2). Esses resultados sugerem que uma seleção precoce, aos 16 anos, teria resultado em ganho genético similar à seleção aos 22 anos.

As estimativas dos ganhos genéticos por ano para o caráter DAP para as idades de 11, 16 e 22 anos foram de 0,029; 0,027 e 0,018, respectivamente. Os índices de eficiência de seleção foram de 46,0% para uma seleção na idade de 16 anos em relação aos 22 anos e de 58,7% para uma seleção aos 11 anos em relação aos 22 anos. A seleção dentro de progênies aos 11 anos gerou os maiores ganhos de seleção (Figura 3).

Tabela 2. Estimativas de parâmetros genéticos para o caráter diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) em teste de progênies de *Astronium urundeuva* em três idades, em Selvíria, MS, Brasil.

Table 2. Estimation of genetic parameters for diameter at 1.30 m above ground level (DBH) in a *Astronium urundeuva* progeny test evaluated at three ages, in Selvíria, Mato Grosso do Sul State, Brazil.

Parâmetros	Estimativas			
	Idade (anos)	11	16	22
Herdabilidade individual dos efeitos aditivos (\hat{h}_a^2)		0,08 ± 0,05	0,12 ± 0,07	0,11 ± 0,07
Coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas (\hat{c}_p^2)		0,0299	0,0189	0,0151
Herdabilidade da média de progênies (\hat{h}_m^2)		0,32	0,44	0,42
Acurácia (r_{aa})		0,55	0,64	0,61
Herdabilidade aditiva dentro de parcela (\hat{h}_{ad}^2)		0,06	0,09	0,09
Coef. de variação genética aditiva indiv. (CV_{gi} %)		8,75	11,84	11,88
Coef. de variação genotípica entre progênies (CV_{gp} %)		4,37	5,92	5,94
Coeficiente de variação experimental (CV_e %)		11,05	11,64	11,99
Coeficiente de variação relativa (CV_r)		0,39	0,51	0,50
Média geral (\bar{m})		8,49	9,33	9,80

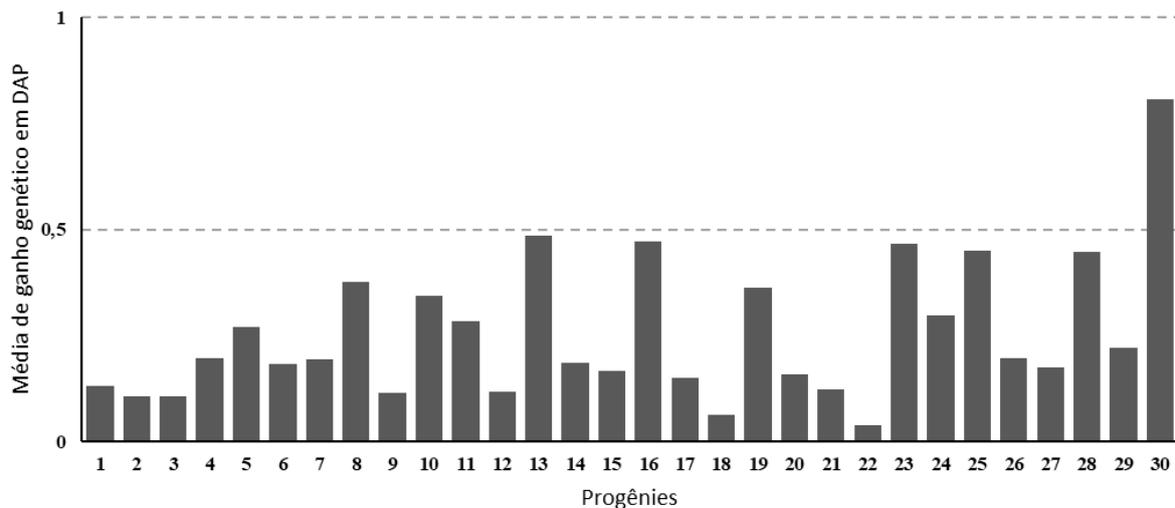


Figura 3. Ganhos genéticos por progênie para diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), em um teste de progênes de *Astronium urundeuva* aos 11 anos, em Selvíria, MS, Brasil.

Figure 3. Genetic gains of diameter at 1.30 m above ground level (DBH) per progeny in the *Astronium urundeuva* progeny test at 11 years of age, in Selvíria, Mato Grosso do Sul State, Brazil.

Parâmetros genéticos para sobrevivência

Os percentuais de sobrevivência obtidos foram de 95,7% (11 anos), 92,1% (16 anos) e 86,1% (22 anos), sendo considerados altos, mostrando a boa adaptação da população às condições ambientais da região de Selvíria. O teste de razão de verossimilhança (LRT) mostrou diferenças significativas ao nível de significância a 1% entre as parcelas nas avaliações aos 16 e aos 22 anos (Tabela 3). Não foram observadas diferenças significativas entre progênes nas três idades avaliadas.

A evolução e distribuição da mortalidade com o avanço na idade dentro das progênes (Figura 4) indica que, aos 11 anos, a mortalidade apresenta-se distribuída aleatoriamente na área, com uma ou duas árvores mortas por parcela no experimento. Aos 22 anos, pode-se notar aumento da mortalidade na extremidade do plantio mostrando o avanço do patógeno no experimento, com uma dependência espacial, que já começou a aparecer aos 16 anos. Os valores de F_{calc} para efeito de bloco

(1,1783, 0,7339 e 0,4791 aos 11, 16 e 22 anos, respectivamente) não foram significativos ao nível de 1% ($F_{tab} = 5,420$), mostrando que os três blocos vêm sendo atacados igualmente em reboleira pelo patógeno, com início pela bordadura.

Tabela 3. Valores de *deviance* do teste de razão de verossimilhança (LRT) para sobrevivência, em teste de progênes de *Astronium urundeuva* em três idades, em Selvíria, MS, Brasil.

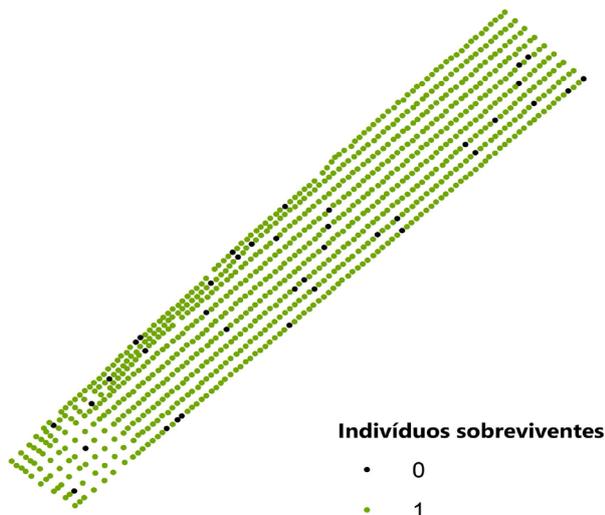
Table 3. Likelihood ratio test (LRT) deviances for survival, in a *Astronium urundeuva* progeny test evaluated at three ages, in Selvíria, Mato Grosso do Sul State, Brazil.

Idades (anos)	Valores de <i>deviance</i>		
	11	16	22
Progênie	0,01 ^{ns}	0 ^{ns}	1,09 ^{ns}
Parcela	0,39 ^{ns}	98,91 ^{**}	181,88 ^{**}

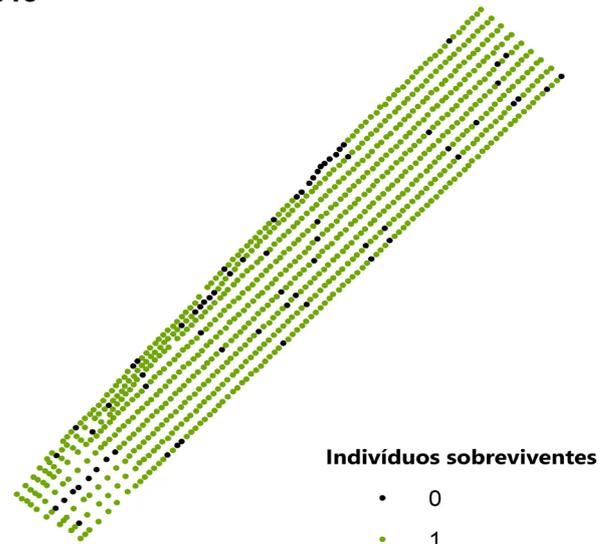
** $p \leq 0,01$ e ns (não significativo) a 1% para o teste de qui-quadrado com um grau de liberdade.

** $p \leq 0,01$ and ns (non-significant) at 1% for a chi-square test, with one degree of freedom.

2008



2013



2019

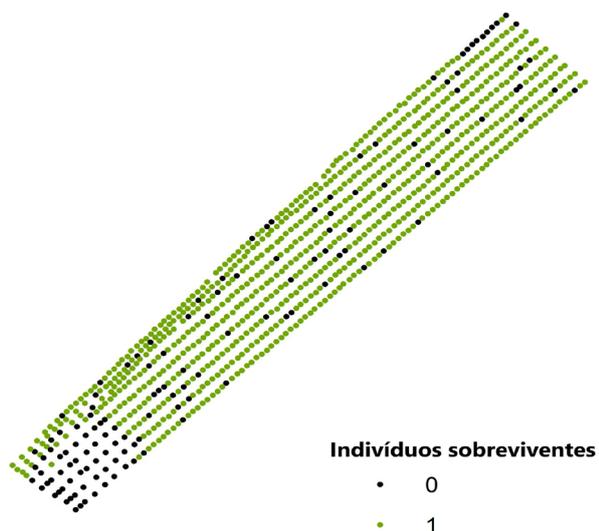


Figura 4. Distribuição de tendência espacial ajustada dos dados coletados em campo de sobrevivência em 2008 (aos 11 anos), 2013 (aos 16 anos) e 2019 (aos 22 anos), em um teste de progênies de *Astronium urundeuva* em Selvíria, MS, Brasil. Legenda de pontos: 1 para árvores vivas (verde) e 0 para árvores mortas (preto).

Figure 4. Adjusted spatial trend distribution of the survival measured in 2008 (at 11-year-old), 2013 (at 16-year-old), and 2019 (22-year-old), in a *Astronium urundeuva* progeny test in Selvíria, Mato Grosso do Sul State, Brazil. Legend: 1 for live trees (green) and 0 for dead trees (black).

Sobrevivência analisada por imagens de satélite

As classificações de vigor alto, médio e solo descoberto (sem presença de biomassa) (Figura 5) a partir do cálculo do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), demonstraram taxas de sobrevivência para os anos 2008 (11 anos),

2013 (16 anos) e 2019 (22 anos) de 90,8%, 89,9% e 84,3%, respectivamente. Em comparação, a taxa de sobrevivência medida em campo nas mesmas idades foi de 95,7%, 92,1% e 86,1%, com uma correlação de 0,98 considerada forte (positiva) entre os valores de NDVI e as taxas de sobrevivência medidas em campo.

(Garrity, et al. 2013; Byer & Jin, 2017; Rogers et al., 2018; Spruce et al., 2019), não identificamos trabalhos que tenham utilizado o NDVI em micro-escala espacial como fizemos nesse trabalho. Ressalta-se, entretanto, que seria ideal a utilização de imagens com maior resolução espacial para melhores resultados.

Sugerimos que outros plantios puros de *A. urundeuva* sejam monitorados quanto à infestação por fungos, especialmente os mais antigos e os com alta densidade. Adicionalmente, os plantios devem ser desbastados para diminuir a densidade populacional, a medida que envelhecem. O plantio que estudamos tem 22 anos e uma densidade populacional de 2.222,22 árvores ha⁻¹. O desbaste de 50% aumentaria o espaçamento para retardar a progressão do fungo de árvore a árvore. Já o desbaste seguido do plantio de outra espécie resistente nas entrelinhas não só aumentaria o espaçamento entre os indivíduos de *A. urundeuva*, como também formaria barreiras com árvores resistentes, evitando que o fungo progrida para o resto do experimento. O desbaste de 50% que propomos resultaria em uma densidade populacional próxima à encontrada na população natural, onde as sementes para esse plantio foram coletadas.

Conclusões

A seleção precoce para diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), a partir dos 11 anos, teria sido vantajosa, tendo em vista os valores de herdabilidade média entre progênies e índice de eficiência de seleção obtidos.

As avaliações do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) demonstram alta correlação em comparação a taxa de sobrevivência medida em campo, sendo um método considerado de baixo custo e de fácil execução.

Considerando que a mortalidade no experimento apresenta uma dependência espacial, conclui-se que é vantajosa a realização de um desbaste nesse experimento, com o intuito de retardar o avanço da doença.

Agradecimentos

Agradecemos à Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP) pelo apoio técnico e logístico. O plantio avaliado nesse estudo foi implantado com recursos do projeto FAPESP 94/2046-9, coordenado pelo Prof. Paulo Y.

Kageyama. Agradecemos ainda o apoio financeiro concedido no processo CNPq nº 303.103/2017-5.

Conflito de interesses

Os autores não têm conflito de interesses a declarar.

Contribuição de Autoria

Tainara da Silva Santos: metodologia, análise formal, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. **Karina Martins:** conceituação, supervisão, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. **Daniele Fernanda Zulian:** metodologia, escrita – revisão e edição. **Carla Américo:** metodologia, análise formal, escrita – revisão e edição. **Laerte João Bertonha:** escrita – revisão e edição. **Marcela Aparecida de Moraes Silvestre:** escrita – revisão e edição. **André Cordeiro Alves dos Santos:** metodologia, escrita – revisão e edição. **José Cambuim:** metodologia, investigação, escrita – revisão e edição. **Mario Luiz Teixeira de Moraes:** conceituação, escrita – revisão e edição.

Referências

- Bertonha, L. J. et al. Seleção de progênies de *Myracrodruon urundeuva* baseada em caracteres fenológicos e de crescimento para reconstituição de áreas de Reserva Legal. *Scientia Forestalis*, v. 44, n. 109, p. 95-104, 2016. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n109.09>.
- Byer, S. & Jin, Y. Detecting drought-induced tree mortality in Sierra Nevada forests with time series of satellite data. *Remote Sensing*, v. 9, n. 9, 929, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9090929>.
- Cambuim, J. et al. **Dinâmica de espécies arbóreas em um fragmento de Cerrado no Bólsão Sul-Matogrossense**. Curitiba: Appris, 2021. 71 p.
- Canuto, D. S. O. et al. Genetic variability in *Myracrodruon urundeuva* (Allemão) Engl. progeny tests. *Open Journal of Forestry*, v. 7, n. 1, p. 1-10, 2017. <http://dx.doi.org/10.4236/ojf.2017.71001>.
- Canuto, D. S. O. et al. Stability and adaptability in tests of progenies of *Myracrodruon urundeuva* under four systems of plantation. *Cerne*, v. 22, n. 2, p. 171-179, 2016. <https://doi.org/10.1590/01047760201622021978>.
- Cao, R. et al. Modeling vegetation green-up dates across the Tibetan Plateau by including both seasonal and daily temperature and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 249, p. 176-186, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.032>.
- Costa, L. et al. A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 172, 105334, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>.

- Delbart, N. et al. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: a free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982–2004). **Remote Sensing of Environment**, v. 101, n. 1, p. 52-62, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.012>
- Gao, F. et al. Toward mapping crop progress at field scales through fusion of Landsat and MODIS imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 188, p. 9-25, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.004>.
- Garrity, S. R. et al. Quantifying tree mortality in a mixed species woodland using multitemporal high spatial resolution satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 129, p. 54-65, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.029>.
- Grattapaglia, D. & Resende, M. D. V. Genomic selection in forest tree breeding. **Tree Genetics and Genomes**, v. 7, n. 2, p. 241-255, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11295-010-0328-4>.
- Guerra, C. R. S. B. et al. Estratégias de seleção dentro de progênies em duas populações de *Myracrodruon urundeuva* Fr. All. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 81, p. 79-87, 2009. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr81/cap09.pdf>.
- Lunetta, R. S. et al. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 2, p. 142-154, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.018>.
- Moraes, M. A. et al. Produtividade, estabilidade e adaptabilidade em progênies de *Myracrodruon urundeuva* FF & MF Allemão - Anacardiaceae. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 93, p. 69-76, 2012. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr93/cap07.pdf>.
- Myneni, R. et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 214-231, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00074-3).
- Nogueira, J. C. B. **Reflorestamento misto com essências nativas: a mata ciliar**. São Paulo, SP: Instituto Florestal de São Paulo, 2010. 148 p.
- Ponzoni, F. J. & Shimabukuro, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 127 p.
- Prince, S. D. & Goward, S. N. Global primary production: a Remote Sensing Approach. **Journal of Biogeography**, v. 22, n. 4/5, p. 815-835, 1995. <https://doi.org/10.2307/2845983>.
- Qiu, Y. et al. Spatiotemporal fusion method to simultaneously generate full-length normalized difference vegetation index time series (SSFIT). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 100, 102333, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102333>.
- Queiroz, C. R. A. A. et al. Caracterização dos taninos da aroeira-preta (*Myracrodruon urundeuva*). **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 485-492, 2002.
- Resende, M. D. V. **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2002, 975 p.
- Resende, M. D. V. Software Selegen-REML / BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 16, n. 4, p. 330-339, 2016. <https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>.
- Riva, L. C. et al. Genetic control of wood quality of *Myracrodruon urundeuva* populations under anthropogenic disturbance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 4, e320920411, 2020. <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n4a64>.
- Rodriguez, S. C. et al. *Myracrodruon urundeuva* Fr. All. (aroeira tree) population dynamics, diameter growth rate and its potential for sustainable management in seasonal tropical dry forest of Brazil. **Revista Árvore**, v. 41, n. 3, e410310, 2017. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000300010>.
- Rogers, B. M. et al. Detecting early warning signals of tree mortality in boreal North America using multiscale satellite data. **Global Change Biology**, v. 24, n. 6, p. 2284-2304, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.14107>.
- Rouse Junior, J. W. et al. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (Green Wave Effect) of natural vegetation**. Texas: Texas A & M University, Remote Sensing Center, College Station, 1973. 87 p. (Technical report). Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/42899154.pdf>.
- Ruimy, A. et al. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 99, n. D3, p. 5263-5283, 1994. <https://doi.org/10.1029/93JD03221>.
- Sá, R. A. et al. Antioxidant, *Fusarium* growth inhibition and *Nasutitermes corniger* repellent activities of secondary metabolites from *Myracrodruon urundeuva* heartwood. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 63, n. 4, p. 470-477, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.01.002>.
- Santos, G. O. & Hernandez, F. B. T. Uso do solo e monitoramento dos recursos hídricos no córrego do Ipê, Ilha Solteira, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 60-68, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100009>.
- Santos, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- Sarria, A. L. F. et al. Dimeric chalcones derivatives from *Myracrodruon urundeuva* act as cathepsin V inhibitors. **Phytochemistry**, v. 154, p. 31-38, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.06.009>.
- Spadoni, G. L. et al. Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, 100419, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100419>.
- Spruce, J. P. et al. Use of MODIS NDVI products to map tree mortality levels in forests affected by mountain pine beetle outbreaks. **Forests**, v. 10, n.9, p. 811, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10090811>.
- Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho". **Canal CLIMA da UNESP de Ilha Solteira: área de hidráulica e irrigação**. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br>. Acesso em: 9 fev. 2022.
- Vencovsky, R. & Barriga, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496 p.

Zhang, X. et al. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data. **Global Change Biology**, v. 10, n. 7, p. 1133-1145, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00784.x>.