

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FRANCIELI ALVES CALDEIRA SAUL

SELEÇÃO DE GENÓTIPOS DE *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* e *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret e Golfari PARA PRODUÇÃO DE RESINA E MADEIRA COMPARADO EM DOIS SISTEMAS DE RESINAGEM



Ilha Solteira
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FRANCIELI ALVES CALDEIRA SAUL

SELEÇÃO DE GENÓTIPOS DE *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* e *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret e Golfari PARA PRODUÇÃO DE RESINA E MADEIRA COMPARADO EM DOIS SISTEMAS DE RESINAGEM

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção.

Mario Luiz Teixeira de Moraes
Orientador

Generci Assis Neves
Coorientador

Miguel Luiz Menezes Freitas
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

Saul, Francieli Alves Caldeira.

Seleção de genótipos de *Pinus caribaea* morelet var. *bahamensis* e *Pinus caribaea* morelet var. *hondurensis* Barret e Golfari para produção de resina e madeira comparado em dois sistemas de resinagem / Francieli Alves Caldeira Saul. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025

146 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidades: Sistemas de Produção, 2025.

Orientador: Mario Luiz Teixeira de Moraes

Coorientador: Generci Assis Neves e Miguel Luiz Menezes Freitas

Inclui bibliografia

1. Atributos do solo. 2. Emissão de CO₂. 3. Melhoramento genético. 4. *Pinus caribaea*. 5. Atributos do solo. 6. Resina.

Impacto potencial desta pesquisa

A pesquisa visa modernizar a resinação com a seleção de genótipos superiores de *Pinus caribaea*, aumentando a produtividade e a qualidade da resina. Com uso de tecnologias como o sistema fechado, promove ganhos econômicos, ambientais e sociais, fortalecendo a inovação e o desenvolvimento sustentável no setor florestal.

Potential impact of this research

The research aims to modernize resin extraction by selecting superior *Pinus caribaea* genotypes, increasing resin productivity and quality. Using technologies such as the closed system, it promotes economic, environmental, and social gains, strengthening innovation and sustainable development in the forestry sector.

Impacto potencial de esta investigación

La investigación busca modernizar la extracción de resina mediante la selección de genotipos superiores de *Pinus caribaea*, aumentando así la productividad y la calidad de la resina. Mediante tecnologías como el sistema cerrado, se promueven beneficios económicos, ambientales y sociales, fortaleciendo la innovación y el desarrollo sostenible en el sector forestal.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Seleção de genótipos de Pinus caribaea Morelet var. bahamensis e Pinus caribaea Morelet var. hondurensis Barret e Golfari para produção de resina e madeira comparado em dois sistemas de resinagem

AUTORA: FRANCIELI ALVES CALDEIRA SAUL

ORIENTADOR: MARIO LUIZ TEIXEIRA DE MORAES

COORIENTADOR: MIGUEL LUIZ MENEZES FREITAS

COORIENTADOR: GENERCI ASSIS NEVES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia, área:
Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. MARIO LUIZ TEIXEIRA DE MORAES (Participação Presencial)
Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Socio-Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Pesquisadora Dra. ANANDA VIRGÍNIA DE AGUIAR (Participação Virtual)
Departamento de Pesquisa / Embrapa Florestas

Prof. Dr. JOAO ANTONIO DA COSTA ANDRADE (Participação Presencial)
Departamento de Biologia e Zootecnia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. CELSO LUIS MARINO (Participação Virtual)
Departamento de Genética / Instituto de Biociencias - UNESP

Pesquisador Dr. WANDERLEY DOS SANTOS (Participação Virtual)
Coordenação de Campo / Fundo Cooperativo para Melhoramento de Pinus - FUNPINUS

Ilha Solteira, 07 de agosto de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à minha filha Maya Alves Caldeira Saul, que nasceu durante esta jornada acadêmica, trazendo luz, inspiração e um novo significado para cada conquista. Sua chegada representou não apenas um marco pessoal profundamente transformador, mas também uma fonte inesgotável de motivação, resiliência e propósito ao longo desta jornada acadêmica. Dedico também aos meus pais, Mariano e Estela, minha eterna gratidão pelo amor, incentivo e suporte incondicional em cada etapa da minha vida. Sem o exemplo de dedicação e esforço de vocês, esta conquista não seria possível. Ao meu esposo, Regivan, pelo companheirismo, paciência e apoio constante. Sua presença foi essencial para que eu superasse os desafios desta trajetória, tornando cada conquista ainda mais significativa.

SOBRE A AUTORIA

Francieli Alves Caldeira Saul é casada com Regivan Antônio de Saul e mãe de Maya Alves Caldeira Saul. Filha de Mariano Caldeira de Souza e Estelina Fermina Alves Caldeira, sempre contou com o apoio e os valores familiares como base essencial para sua formação pessoal e profissional. É graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Fundação Educacional de Fernandópolis, onde desenvolveu atividades de pesquisa voltadas à propagação vegetal, com foco na propagação vegetativa de espécies frutíferas por estaquia utilizando enraizadores naturais. Desde a graduação, demonstrou forte interesse por práticas sustentáveis e pelo aprimoramento de técnicas aplicadas ao desenvolvimento vegetal. Concluiu o Mestrado em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, campus de Ilha Solteira, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, com ênfase na área de Sistemas de Produção – Genética, Melhoramento e Propagação de Plantas, tendo sido bolsista da CAPES entre os anos de 2018 e 2020. Em 2020, iniciou o curso de Doutorado na mesma instituição e programa, com bolsa CNPq vinculada ao projeto com a empresa Resineves. Durante o doutorado, atuou como bolsista didática por dois anos, ministrando aulas nos cursos de graduação em Agronomia, Biologia e Zootecnia. Participou como coorientadora de projetos de Iniciação Científica (PIBIC), foi avaliadora de trabalhos científicos nos eventos ENCIVI e CIC, foi coorientadora de Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC), além de compor bancas examinadoras também de TCC. Sua atuação acadêmica e científica está direcionada à pesquisa com espécies arbóreas, especialmente nas áreas de silvicultura, conservação genética e melhoramento genético florestal. Acumulou experiência prática e técnica em diversas atividades de campo e laboratório, como coleta de sementes, produção de mudas, instalação e condução de testes de progênies com diferentes espécies florestais, avaliação de fluxo de CO₂ em tempo real em oito experimentos realizados na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da UNESP, além de análises estatísticas e genéticas com o uso de softwares especializados. Destaca-se ainda pelo comprometimento com o trabalho em equipe, atuando de forma colaborativa e contribuindo para um ambiente de cooperação, aprendizado mútuo e excelência científica. Sua trajetória acadêmica é marcada pelo comprometimento com a pesquisa, pela dedicação ao ensino e pela contribuição significativa ao avanço do conhecimento na área de genética e melhoramento de espécies florestais.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder vida, saúde, sabedoria e forças para seguir em frente mesmo diante dos desafios mais intensos. Sua presença foi constante ao longo desta caminhada, sustentando-me em momentos de incerteza e fortalecendo minha fé nas etapas mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mário Luiz Teixeira de Moraes, pelo apoio, dedicação e valiosas contribuições ao longo desta jornada acadêmica. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa RESINEVES Ltda., em Generci Assis Neves, Milton de Assis Neves e Denilson Rodrigues especial pela parceria e pelo apoio na concessão da bolsa de estudos, contribuindo significativamente para a realização deste trabalho.

Meus especiais agradecimentos aos meus coorientadores, Generci A. Neves e Miguel L. M. Freitas pelo suporte e incentivo que foram fundamentais ao longo desta trajetória.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido durante a realização deste doutorado, que foi concedido pela chamada CNPq Nº 12/2020 - Programa de Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação - MAI/DAI processo nº 140906/2021-5.

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, pelo apoio financeiro durante três meses de trabalho.

Ao Professor Paulo C. Ceresini pelo empenho, dedicação e apoio que foram fundamentais para a concessão da bolsa de estudos, cuja viabilização foi essencial para o desenvolvimento desta etapa acadêmica.

Meu esposo Regivan A. de Saul pelo apoio na revisão do texto e na coleta de dados.

Aos professores Alan R. Panosso, Newton La Scala Júnior e sua equipe da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/UNESP, em especial aos pesquisadores Wanderson B. Lusena, Kleve F. F. Canteral e Arianis I. S. Nicolella, pelo apoio técnico-científico dos trabalhos realizados com a parte de solo.

Aos meus colegas da UNESP, Daniele F. Zulian, Marília G. Pereira, José C. Oliveira Júnior, Arnaldo P. P. Silva, Talita C. S. Santos, Julia A. Petreca e Thayná S. S. Alves pela ajuda nas coletas de dados, obrigado pelo apoio, confiança e amizade nessa trajetória.

Agradeço à Selma Maria Bozzite de Moraes pelos ensinamentos, pelo carinho e amizade durante todos meus anos de UNESP.

Agradeço os idealizadores do Centro de Conservação Genética e Melhoramento de Pinheiros Tropicais – CCGMPT, IPEF/DCF, ESALQ/USP, ex-Cafina/Grupo Freundemberg ((ex-Duratex Florestal S.A e atual Duratex Madeira/DexCo) e a ex-Aracruz Florestal S.A (ex-Fribria e atual Suzano), no município de Aracruz-ES, criado em 1997 com o objetivo de atender à grande demanda de sementes de qualidade no mercado interno e externo. Instalado no período de 1978 a 1984, constitui-se de 150 hectares de pomares de sementes clonais de *P. caribaea* var. *hondurensis*, *P. caribaea* var. *caribaea* e *P. caribaea* var. *bahamensis*, originários de materiais obtidos de 1000 árvores superiores em diversas populações comerciais crescendo nos estados de São Paulo e Paraná, para gerar e disponibilizar à silvicultura intensiva de Pinus no Brasil novas recombinações do material genético estudado (Pinto Júnior et al., 1979). E aos Professores e Engenheiros: Luiz Ernesto George Barrichelo, Paulo Yoshio Kageyama, Mario Ferreira, Edson Seizo Mori, Admir Lopes Mora, Israel Gomes Vieira, Paulo Henrique Müller da Silva, Sílvio Luiz Martini e Vera Lex Engel.

Aos amigos da equipe do Laboratório de Genética de Populações, Evolução e Silvicultura (LGPS) e pela ajuda no campo e ótimas conversas: Selma Maria Bozzite de Moraes, Patrícia Ferreira Alves e Alexandre Marques da Silva.

Também aos Funcionários da Fazenda de Ensino e Pesquisa da FEIS/UNESP, pela colaboração e auxílio na pesquisa de campo: Zé Raimundo, João, Cézar, e em especial o Manoel Fernando da Rocha Bonfim (Baiano), José Cambuim e Alonso Ângelo da Silva. Muito obrigada pela amizade e apoio incondicional em minha formação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

As estratégias de melhoramento genético e manejo sustentável em *Pinus caribaea* visam ampliar a produtividade de madeira e resina em ambientes tropicais, conciliando aspectos ambientais, genéticos e silviculturais. O presente estudo foi estruturado em dois capítulos complementares. No Capítulo 1, avaliou-se a variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo e sua relação com atributos físico-químicos em áreas cultivadas com diferentes espécies e variedades tropicais de *Pinus*. O estudo foi conduzido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP, em Selvíria-MS, em áreas plantadas com *P. caribaea* var. *bahamensis* (PCB), var. *hondurensis* (PCH), var. *caribaea* (PCC1 e PCC2), além de *Pinus tecunumanii* (TECU) e ensaio de competição de espécies (CEV). Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0–0,2 m, 0,2–0,4 m e 0,4–0,6 m para análises de densidade, porosidade, textura, pH, carbono e nitrogênio totais, CTC e nutrientes. A emissão de CO₂ do solo foi mensurada com sistema automático LI-8100 (LI-COR Biosciences), em diferentes dias e condições ambientais, associada a medições de temperatura com termômetro infravermelho. Os resultados evidenciaram fluxos de CO₂ entre 0,42 e 4,77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com destaque para *P. tecunumanii* em área de pastagem, apresentando maiores emissões ligadas à atividade microbiana e ao manejo. Observou-se correlação positiva entre temperatura do solo e emissão de CO₂, mas também influência decisiva da umidade e da matéria orgânica. Esses achados reforçam que atributos edáficos são fundamentais para a sustentabilidade dos povoamentos de *Pinus* tropicais e devem ser considerados em estratégias de melhoramento e manejo. No Capítulo 2, foram avaliados parâmetros genéticos, silviculturais e produtivos de progênies de *P. caribaea* var. *bahamensis*, var. *caribaea* e var. *hondurensis*, conduzidas na mesma fazenda experimental. Os testes de progênies, instalados entre 1986 e 1990 em delineamentos em quadrado latino, foram avaliados para sobrevivência, altura, diâmetro à altura do peito (DAP), volume de madeira e produção de resina. Para estimar o volume, foram ajustadas equações volumétricas, sendo a de Meyer a mais precisa (R^2 entre 0,92 e 0,98). A resinagem foi comparada entre sistema tradicional em painel e sistema fechado *borehole* (2025). A variedade *P. caribaea* var. *bahamensis* apresentou herdabilidade individual elevada para volume (0,75) e altos coeficientes de variação genética, mas forte mortalidade reduziu o tamanho efetivo populacional, evidenciando a necessidade de ações de conservação genética. Já *P. caribaea* var. *hondurensis* manteve herdabilidade moderada a alta para volume (0,47 aos 39 anos), acurácia seletiva consistente (0,8381) e elevada variabilidade genética, destacando-se como base promissora de melhoramento. A variedade *P. caribaea* var. *caribaea* apresentou maior estabilidade genética, embora com menor desempenho produtivo. O sistema *borehole* demonstrou-se eficiente e sustentável para a extração de resina, reduzindo danos fisiológicos às árvores. De forma integrada, os resultados demonstram que a associação entre atributos ambientais (fluxo de CO₂ e dinâmica do solo) e parâmetros genéticos (volume e resina) é estratégica para identificar genótipos superiores, orientar práticas de resinagem mais sustentáveis e desenvolver sistemas florestais resilientes. O estudo reforça a importância de integrar dados de solo, ambiente e desempenho genético para ampliar a eficiência no uso dos recursos e atender simultaneamente às demandas econômicas e ambientais da silvicultura tropical.

Palavras-chave: atributos do solo; emissão de CO₂; melhoramento genético; *Pinus caribaea*; resina.

ABSTRACT

Genetic improvement and sustainable management strategies for *Pinus caribaea* aim to increase timber and resin productivity in tropical environments, reconciling environmental, genetic, and silvicultural aspects. This study is structured in two complementary chapters. Chapter 1 assesses the temporal variability of soil CO₂ emissions and their relationship with physical and chemical attributes in areas cultivated with different tropical pine species and varieties. The study was conducted at the UNESP Teaching, Research, and Extension Farm in Selvíria, Mato Grosso do Sul, in areas planted with *P. caribaea* var. *bahamensis* (PCB), var. *hondurensis* (PCH), var. *caribaea* (PCC1 and PCC2), as well as *Pinus tecunumanii* (TECU), and a species competition trial (CEV). Soil samples were collected from the 0–0.2 m, 0.2–0.4 m, and 0.4–0.6 m layers for analysis of density, porosity, texture, pH, total carbon and nitrogen, CEC, and nutrients. Soil CO₂ emissions were measured with an automated LI-8100 system (LI-COR Biosciences) on different days and environmental conditions, combined with temperature measurements using an infrared thermometer. The results showed CO₂ fluxes between 0.42 and 4.77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, with *P. tecunumanii* in the pasture area showing higher emissions linked to microbial activity and management. A positive correlation was observed between soil temperature and CO₂ emissions, but also a decisive influence of moisture and organic matter. These findings reinforce that soil attributes are fundamental for the sustainability of tropical pine stands and should be considered in improvement and management strategies. In Chapter 2, the genetic, silvicultural, and productive parameters of progenies of *P. caribaea* var. *bahamensis*, var. *caribaea*, and var. *hondurensis*, grown on the same experimental farm, were evaluated. Progeny tests, conducted between 1986 and 1990 in Latin square designs, were evaluated for survival, height, diameter at breast height (DBH), wood volume, and resin production. Volume was estimated using volumetric equations, with Meyer's equation being the most accurate (R^2 between 0.92 and 0.98). Resin production was compared between the traditional panel system and the closed borehole system (2025). The variety *P. caribaea* var. *bahamensis* showed high individual heritability for volume (0.75) and high coefficients of genetic variation, but high mortality reduced the effective population size, highlighting the need for genetic conservation measures. *P. caribaea* var. *hondurensis* maintained moderate to high heritability for volume (0.47 at 39 years), consistent selective accuracy (0.8381), and high genetic variability, standing out as a promising breeding base. The variety *P. caribaea* var. *caribaea* showed greater genetic stability, although with lower production performance. The borehole system proved to be efficient and sustainable for resin extraction, reducing physiological damage to the trees. In an integrated manner, the results demonstrate that the association between environmental attributes (CO₂ flux and soil dynamics) and genetic parameters (volume and resin) is strategic for identifying superior genotypes, guiding more sustainable resin extraction practices, and developing resilient forest systems. The study reinforces the importance of integrating soil, environmental, and genetic performance data to increase resource use efficiency and simultaneously meet the economic and environmental demands of tropical forestry.

Keywords: soil attributes; CO₂ emissions; genetic improvement; *Pinus caribaea*; resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Estrutura do Banco Ativo de Germoplasma de <i>Pinus</i> da FEIS/UNESP (BAG- <i>Pinus</i> spp.): componentes edáficos, climáticos e genéticos avaliados neste trabalho.....	34
Figura 2	- Imagem de satélite com a localização das áreas experimentais de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> (PCC 2), <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> (PCB) e <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (PCH) na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP, Selvíria-MS".....	34
Figura 3	- Registro aéreo com drone da área experimental de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> (PCB), evidenciando a mortalidade das árvores do teste de progênies.....	34
Figura 4	- Imagens aéreas do teste de progênies <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> (PCC2).....	49
Figura 5	- Imagens aéreas do teste de progênies <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	51
Figura 6	- Em sequência, o processo de instalação do sistema fechado de extração de resina tipo <i>borehole</i>	52
Figura 7	- Evolução anual da temperatura média do ar (°C), umidade relativa média (%) e precipitação total (mm), no período de 1992 a 2024.....	114
Figura 8	- Localização das áreas experimentais na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP – Ilha Solteira, em Selvíria-MS, delimitadas em vermelho.....	116
Figura 9	- Coleta de amostras indeformadas de solo em áreas cultivadas com variedades tropicais de <i>Pinus caribaea</i> (PCB, PCH, PCC1, PCC2), além das áreas de CEV (competição de espécies e variedades) e TECU (<i>Pinus tecunumanii</i>).....	117
Figura 10	- Amostras de solo sendo: (A) amostras destinadas às análises químicas, devidamente identificadas e armazenadas em sacos plásticos; (B) amostras indeformadas dispostas em anéis volumétricos para análises físicas, no Laboratório de Fertilidade do Solo da UNESP, campus de Ilha Solteira.	

Figura 11	- Medição da emissão de CO ₂ do solo com o uso do LI-8100 (LI-COR Biosciences), em área de cultivo de <i>Pinus caribaea</i> , no município de Selvíria-MS.....	120
Figura 12	- Sistema LI-8100 (LI-COR <i>Biosciences</i>) em operação para medição da emissão de CO ₂ do solo em ambiente florestal.....	121
Figura 13	- Termômetro a laser infravermelho utilizado para medição da temperatura do solo nos experimentos de <i>Pinus</i>	122
Figura 14	- Variabilidade temporal da emissão de CO ₂ do solo (FCO ₂) (média ± erro padrão da média). a) Efeito dos tratamentos em cada dia de avaliação. b) Efeito dos dias de avaliação para cada tratamento.....	128
Figura 15	- Variabilidade temporal da Temperatura do solo (St) (média ± erro padrão da média). a) Efeito dos tratamentos em cada dia de avaliação. b) Efeito dos dias de avaliação para cada tratamento.....	129

LISTA DE TABELAS LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Estimativas de parâmetros genéticos para caracteres de crescimento obtidas em realização de trabalhos com espécies de <i>Pinus</i>	30
Tabela 2	- Estimativas de parâmetros genéticos para resina obtidas em realização de trabalhos com espécies de <i>Pinus</i>	32
Tabela 3	- Coeficientes para obtenção do Volume do PCB.....	66
Tabela 4	- Coeficientes para obtenção do Volume do PCC2.....	66
Tabela 5	- Coeficientes para obtenção do Volume do PCH.....	67
Tabela 6	- Estimativas de parâmetros estatísticos e genéticos para os caracteres: altura total das plantas (ALT), diâmetro a altura do peito (DAP) e volume (VOL) em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , em Selvíria-MS, aos 11, 11 com desbaste e 35 anos.....	71
Tabela 7	- Estimativas de parâmetros estatísticos e genéticos para os caracteres: altura total das plantas (ALT), diâmetro a altura do peito (DAP) e volume (VOL) em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> , em Selvíria-MS, aos 11, 11 com desbaste e 36 anos.....	74
Tabela 8	- Estimativas de parâmetros estatísticos e genéticos para os caracteres: altura total das plantas (ALT), diâmetro a altura do peito (DAP) e volume (VOL) em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> , em Selvíria-MS, aos 12, 12 com desbaste e 39 anos.....	77
Tabela 9	- Tamanho efetivo <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> em quatro momentos.....	79
Tabela 10	- Tamanho efetivo <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> em quatro momentos.....	80
Tabela 11	- Tamanho efetivo <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> 2 em quatro momentos.....	81
Tabela 12	- Volume e Produção de Resina extraída em painel com ranqueamento das 10 árvores mais produtivas avaliadas em um	84

	teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> em 2013.....	
Tabela 13	- Estimativas de volume e produção de resina em painel, com ranqueamento das 10 árvores mais produtivas avaliadas em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> para 2025.....	87
Tabela 14	- Volume e produção de resina extraída em painel com ranqueamento das 10 Árvores Mais Produtivas Avaliadas em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> em 2013.....	90
Tabela 15	- Estimativas de volume de madeira e produção de resina em <i>borehole</i> , com ranqueamento das 10 Árvores Mais Produtivas Avaliadas em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> para 2025.....	92
Tabela 16	- Frações de Alpha, Beta Pineno e Canfeno.....	95
Tabela 17	- Caracterização da goma-resina quanto ao peso da amostra, teor de água, frações de terebintina e breu em duas coletas, conforme análise realizada pela empresa RESINEVES.....	97
Tabela 20	- Variabilidade temporal da emissão de CO ₂ e temperatura do solo nos tratamentos.....	126
Tabela 21	- Síntese dos resultados de ECO ₂ e temperatura e interpretação ecológica, onde PCB – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> ; PCH – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> ; PCC1 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> 1; PCC2 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> 2; CEV – Ensaio com variedades de <i>Pinus</i> do IPEF e TECU – <i>Pinus tecunumanii</i>	131
Tabela 22	- Efeito da interação entre os tratamentos e as profundidades do solo para os atributos físicos do solo (Macro, Micro, PT (porosidade total), Ds (densidade do solo) Argila e Areia).....	134
Tabela 23	- Efeito da interação entre os tratamentos e as profundidades do solo para os atributos químicos do solo (CTC, P, Cu, Fe, Mn, H+Al e S).....	137
Tabela 24	- Efeito dos tratamentos e das profundidades do solo para os atributos químicos do solo Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Al, pH, C, MO, SB,	140

	V%, m% e B.....	
Tabela 25	- Análise de média da emissão de CO ₂ e temperatura do solo entre os tratamentos de <i>Pinus</i> spp.....	141

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	Características do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	21
2.2	Características do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	21
2.3	Características do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	22
2.4	2.4. Características do <i>Pinus tecunumanii</i>	23
2.5	Análise de solo em <i>Pinus</i>	23
2.6	Resinagem em <i>Pinus</i>	24
2.7	Melhoramento genético.....	27
2.8	REFERÊNCIAS.....	35
3	CAPÍTULO 1 - Seleção De Genótipos De <i>Pinus caribaea</i> Morelet Var. <i>bahamensis</i> E <i>Pinus caribaea</i> Morelet Var. <i>hondurensis</i> Barret E Golfari Para Produção de Resina E Madeira comparado Em Dois Sistemas de Resinagem.....	43
3.1	INTRODUÇÃO.....	47
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.2.1	Coleta de dados.....	54
3.2.2	Instalação do sistema de resinagem fechado (<i>borehole</i>) e modelagem da produção de resina por <i>borehole</i> (2025)	57
3.2.3	Análises estatísticas e componentes de variância.....	59
3.2.4	Tamanho efetivo populacional calculado no decorrer do tempo.....	65
3.2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.3.1	Definição da equação para estimativa de volume.....	65
3.3.2	Definição da equação para estimativa da resina.....	67
3.3.3	Parâmetros Genéticos Silviculturais <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	68
3.3.4	Parâmetros Genéticos Silviculturais <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	72
3.3.5	Parâmetros Genéticos Silviculturais <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	75
3.3.4	Tamanho efetivo das populações.....	78

3.3.6	Parâmetros Genéticos Volume e Resina em Testes de Progenies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> e <i>bahamensis</i>.....	82
3.3.7	Caracterização físico-química da goma-resina e composição de monoterpenos em diferentes coletas, conforme análises da empresa RESINEVES.....	94
3.4	CONCLUSÕES.....	98
3.5.	REFERÊNCIAS.....	80
4	CAPÍTULO 2 - VARIABILIDADE TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREAS DE PINUS TROPICAIS PARA BASE DE MELHORAMENTO GENÉTICO.....	107
4.1.	INTRODUÇÃO.....	110
4.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	112
4.2.1	Características do local de coleta das sementes dos <i>Pinus</i> tropicais.....	112
4.2.2	Características do local de plantio.....	113
4.2.3	Característica dos testes de progenies.....	114
4.2.4	Atributos químicos e físicos do solo.....	116
4.2.5	Emissão de CO₂ e temperatura do solo	119
4.2.6	Análises de dados.....	122
4.3	RESULTADOS.....	124
4.3.1	Emissão de CO₂ e Temperatura do solo.....	124
4.3.2	Atributos físicos do solo.....	131
4.3.3	Atributos químicos do solo.....	135
4.4	DISCUSSÃO.....	142
4.5	CONCLUSÕES.....	144
4.6	REFERÊNCIAS.....	145
5	CONCLUSÃO GERAL.....	148
	ANEXO A – Croqui de campo do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> na FEPE.....	137
	ANEXO B – Croqui de campo do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> 1 na FEPE.....	139

ANEXO C – Croqui de campo do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> 2 na FEPE.....	140
ANEXO D – Croqui de campo do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> na FEPE.....	141
ANEXO E – Croqui de campo do experimento Competição de Espécies e Variedades de <i>Pinus</i> (CEVP) na FEPE.....	142
ANEXO F – Croqui de campo do <i>Pinus tecunumanii</i> na FEPE INSTALAÇÃO: 2010.....	143
ANEXO G – Distribuição do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> no CCGMPT.....	144
ANEXO H – Distribuição do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> no CCGMPT.....	145
ANEXO I – Distribuição do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> no CCGMPT.....	146

1 INTRODUÇÃO

Áreas com reflorestamento comercial no Brasil cresceu nos últimos anos, batendo recorde em 2024, ultrapassando pela primeira vez 10 milhões de hectares plantados. Desse total 19% ou 1,9 milhão de hectares são de áreas plantadas com *Pinus* (Ibá, 2024). As plantações florestais globais têm experimentado um crescimento significativo, passando de 167,5 milhões de hectares em 1990 para 277,9 milhões de hectares em 2015, representando um aumento de 4,06% para 6,95% (Payn *et al.*, 2015). Este crescimento reflete a crescente demanda por produtos florestais e a necessidade de alternativas sustentáveis para o suprimento de madeira e fibra. O gênero *Pinus* possui grande importância econômica e ao todo, no Brasil, são utilizados no mercado florestal 48,9 milhões de m³ anuais. Seu uso é na indústria madeireira, celulose, papel, painéis reconstituídos, e por último o consumo para lenha industrial (Ibá, 2024).

O gênero *Pinus* compreende espécies e variedades de expressiva relevância econômica mundial, entre as quais se destacam os chamados *Pinus* tropicais. *P. caribaea* tem sua distribuição natural abrangendo as regiões caribenhas, particularmente a ilha de Hispaniola que faz parte do grupo das Grandes Antilhas na região do Caribe (Ortiz; Musarella; Carmona, 2017). *P. caribaea* possui diversas utilidades que justificam sua importância econômica global. Essas diversas características tornam a madeira tropical altamente versátil, oferecendo inúmeras aplicações em construção, produtos químicos, e muito mais (Ramananantoandro *et al.*, 2024).

Esse gênero reúne centenas de espécies, sendo o *Pinus caribaea* uma das principais no cenário tropical, com três variedades economicamente relevantes: *caribaea*, *hondurensis* e *bahamensis*. Dentre essas, a *P. caribaea* var. *hondurensis* é a mais cultivada no mundo devido ao seu rápido crescimento e boa forma, enquanto a *P. caribaea* var. *bahamensis* tem se destacado pela elevada produtividade de resina em baixas altitudes e desempenho promissor na produção de madeira em regiões tropicais brasileiras (Shimizu, 2008).

Ao longo dos últimos dois séculos, o uso de recursos genéticos florestais tem impulsionado a disseminação global desta espécie. Nos últimos 200 anos, os recursos genéticos de árvores florestais vêm sendo amplamente movimentados, tanto dentro quanto fora de suas áreas nativas de ocorrência, com o objetivo de apoiar a pesquisa e o desenvolvimento florestal (I&D) (Koskela, 2014). Essa movimentação de germoplasma possibilitou o estabelecimento de *Pinus caribaea* em diversas regiões tropicais

e subtropicais do planeta, onde a espécie demonstrou notável capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas.

A exploração da resinagem configura-se como uma das utilizações mais tradicionais e economicamente significativas do *P. caribaea*. A elucidação dos mecanismos bioquímicos subjacentes à biossíntese e secreção da goma-resina é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que visem à maximização do rendimento e à sustentabilidade dessa atividade no contexto do manejo florestal (Gerry; Hall, 1935). Nos últimos dois séculos, a demanda por seus principais subprodutos, o breu e a terebentina cresceu exponencialmente, enquanto as indústrias químicas, como tintas, adesivos, colas, borrachas sintéticas, ceras depilatórias e vernizes etc., aumentaram a produção (Delgado, 2022).

A fertilidade do solo (física e química) é um dos fatores importantes que limitam o crescimento produção das plantas. O manejo adequado do solo constitui aspecto crítico para o sucesso das plantações de *P. caribaea*, influenciando diretamente a produtividade e sustentabilidade dos povoamentos florestais (Malik et al., 2015). Estudos específicos com *P. caribaea* demonstraram a necessidade de avaliação detalhada das condições edáficas antes do estabelecimento das plantações. Outro ponto importante é a mensuração direta das emissões de CO₂ do solo em plantações de *Pinus*, pois oferece informações valiosas para cálculos do balanço de carbono e para avaliar a sustentabilidade desses sistemas, assim os atributos físicos e químicos do solo, como matéria orgânica, textura, porosidade, pH e teores de nutrientes, influenciam diretamente a emissão de gases do efeito estufa (La Scala et al., 2000; Tulio et al., 2022). Entretanto, poucos estudos investigaram a correlação entre tais atributos e a emissão de CO₂ em espécies tropicais de *Pinus*, sobretudo em relação às variedades *caribaea*, *hondurensis* e *bahamensis*.

A adoção de boas práticas de manejo, aliada ao melhoramento genético e às condições edafoclimáticas favoráveis do Brasil, tem permitido ao país alcançar os mais altos índices de produtividade em plantações de *Pinus*, seja para produção de madeira, celulose ou resina (Ibá, 2020). Apesar disso, o cultivo comercial das variedades *bahamensis* e *caribaea* ainda é restrito a experimentos científicos, sendo necessário ampliar esforços em pesquisa e desenvolvimento para potencializar sua adoção em escala comercial. A sustentabilidade a longo prazo destes sistemas está provavelmente em parte ligada à manutenção da matéria orgânica do solo e à boa

estrutura e agregação do solo, especialmente em áreas com solos de baixa fertilidade (Beldini, *et al.*, 2009).

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar a relação entre atributos físico-químicos do solo, a emissão de CO₂ e a produção de genótipos de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus tecunumanii*, considerando também os diferentes sistemas de extração de resina. Busca-se, com isso, gerar subsídios técnicos e científicos para programas de melhoramento genético e práticas de manejo sustentável, promovendo o uso eficiente dos recursos naturais e a ampliação da base produtiva do setor florestal tropical brasileiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARACTERÍSTICAS DO *Pinus caribaea* var. *bahamensis*.

A variedade das Bahamas, *Pinus caribaea* var. *bahamensis* (Pinaceae) foi descrito por Barrett & Golfari, representa um pinheiro caribenho endêmico do arquipélago nas Bahamas e seus arredores como as Ilhas Turcas e Caicos (ICT). As espécies da América Central, Ilhas Bahamas e Cuba mantiveram o nome *Pinus caribaea* e, posteriormente, o *Pinus caribaea* compreende três variedades de pinheiros tropicais distribuídos na Bacia do Caribe: *P. var. hondurensis*, *caribaea* e *bahamensis* (Camacho *et al.*, 2018). *Pinus caribaea* var. *bahamensis* destaca-se por sua importância na produção de madeira e resina na região Sudeste brasileira (Shimizu; Sebbenn, 2008).

Plantios exploratórios de *P. bahamensis* em regiões tropicais e subtropicais têm mostrado que a variedade *bahamensis* cresce bem mesmo em altitudes maiores que 700 m e resistem bem a geadas (Shimizu; Sebbenn, 2008).

2.2 CARACTERÍSTICAS DO *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

O *Pinus caribaea* var. *caribaea* natural das regiões do Caribe, ocorrendo junto com *P. bahamensis*, que juntos servem como habitat para espécies como o *Bahama Oriole* (Pérez-Del Valle; Geada-López; Sotolongo-Sospedra, 2020). *P. caribaea* var. *caribaea* é restrito também na região do oeste de Cuba, Pinar del Rio e Isla de la Juventud (Isla de Pinos) (Farjon; Styles, 1997). Esta variedade foi descrita pela primeira vez por Morelet em 1851 para se referir a uma espécie de pinheiro cuja distribuição abrangia o norte da América Central, as Ilhas Bahamas e Cuba (Anoruo; Berlyn, 1992).

A madeira do *Pinus caribaea* var. *caribaea* apresenta estrutura considerada “grosseira”, com fibras dispostas verticalmente, coloração que varia entre marrom amarelada e marrom avermelhada, presença de lenho outonal e anéis de crescimento largos. O cerne da árvore só começa a se formar após os 15 anos de idade (Wang; Malcolm; Fletcher, 1999). As características anatômicas das acículas de *Pinus caribaea* var. *caribaea* foram amplamente estudadas, com destaque para 14 variáveis

avaliadas em seções transversais, assim, as principais responsáveis pela variação e classificação foram o número de estômatos, a espessura e o número de bandas da hipoderme e todos os táxons analisados, os canais de resina apresentaram-se consistentemente como endonais e marginais (Pérez-Del Valle; Geada-López; Sotolongo-Sospedra, 2020).

Um aspecto fundamental das características do *Pinus caribaea* var. *caribaea* é o padrão de desenvolvimento da madeira ao longo do tempo, em que resultados indicaram que o madeira juvenil é formado entre os primeiros 5 a 9 anos, enquanto a madeira madura se desenvolve após 21 a 26 anos (Boggiano *et al.* 2025).

2.3 CARACTERÍSTICAS DO *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

P. caribaea var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H.G.Barrett & Golfari é apenas presente na América Central (Belize, Guatemala, Honduras, México, Nicarágua) (Farjon; Styles, 1997). É nativa da costa caribenha do sul do México (Quintana Roo e Yucatán), Belize, Guatemala, Honduras e Nicarágua (Acevedo-Rodríguez; Strong, 2012).

Pertencente ao complexo de pinheiros caribenhos, destaca-se por ser a variedade mais produtiva do grupo, combinando rápido crescimento com madeira de boa qualidade. Sua versatilidade permite aplicações diversas, desde a construção civil até a indústria de celulose e papel, sendo amplamente utilizada em programas de reflorestamento com fins comerciais e sustentáveis (Rojas-Sandoval; Acevedo-Rodríguez, 2022). *P. hondurensis* é a espécie mais comumente plantada, pois sua madeira é importante para diversos usos (Shimizu; Medrado 2005). O *Pinus caribaea* var. *hondurensis* é uma das espécies de pínus mais amplamente exploradas economicamente no mundo para a produção de madeira, em razão de sua capacidade de adaptação a diferentes condições climáticas. No Brasil, essa variedade de *P. caribaea* é a mais cultivada, principalmente pela facilidade de obtenção de sementes (Kronka; Bertolani; Ponce, 2005; Shimizu; Sebbenn, 2008).

2.4 CARACTERÍSTICAS DO *Pinus tecunumanii*.

Pinus tecunumanii pertence ao grupo de pinos tropicais duros e cresce entre 400 e 2600 m de altitude (Styles; Hughes, 1988). A classificação taxonômica do *Pinus tecunumanii*, também denominado *Pinus patula* Schiede & Deppe ssp. *tecunumanii* (Equiluz & Perry) tem sido motivo de divergências entre botânicos, havendo aqueles que defendem seu reconhecimento como uma espécie distinta e outros que a consideram apenas uma subespécie de *P. patula* (Equiluz; Perry, 1983; Styles; Hughes, 1988). Populações de baixa altitude diferem geneticamente das de alta altitude, fato comprovado por marcadores isoenzimáticos e por testes de campo (Dvorak *et al.*, 2000).

Na região nativa, a árvore forma bosques abertos em solos vulcânicos bem drenados. A variação anual varia de 1.200 a 3.500 mm, com estação seca de até quatro meses (Camcore, 2004). Na Guatemala, indivíduos maduros atingem 45 m de altura e 90 cm de diâmetro aos 60 anos (González, 2002). A densidade básica da madeira fica entre 0,40 e 0,55 g cm⁻³, valor superior ao de *Pinus caribaea* e menor que o de *Pinus patula* (Zobel; Van Wyk, 1998). Programas de melhoramento concentraram-se no grupo CAMCORE desde 1980. O primeiro teste de progênes incluiu 74 famílias e registrou herdabilidade individual de 0,26 para altura aos cinco anos (Dvorak *et al.*, 2000).

Em relação à produtividade, Moura e Vale (2002) relatam que entre as espécies de *Pinus*, o *P. tecunumanii* é um das que apresenta maior potencial, de acordo com as observações resultantes de uma série de ensaios internacionais. A IUCN mantém a espécie na categoria Vulnerável, mesmo assim, a agricultura no Altiplano guatemalteco removeu 30% da área natural entre 1990 e 2020 (IUCN, 2020).

2.5. ANÁLISE DE SOLO EM *Pinus*

A fertilidade do solo, tanto física quanto química, é um fator determinante para o crescimento das plantas e deve ser avaliada antes do cultivo e após a reabilitação florestal. Em estudos com *Pinus caribaea*, são analisadas propriedades físicas como densidade aparente, textura e umidade, além de atributos químicos como pH, carbono

e nitrogênio totais, capacidade de troca catiônica e cátions trocáveis (Al, Ca, Mg, K e Na) (Malik, 2015).

As florestas são, sem dúvida, uma das maneiras mais eficazes e fáceis de fornecer a função de sumidouros de carbono (Nunes 2020). Os solos florestais podem ser fontes ou sumidouros de gases de efeito estufa (GEE) dependendo dos atributos do solo que afetam a biomassa e atividade dos microrganismos do solo envolvidos nos fluxos de GEE (Tulio 2022). No entanto, é essencial e conveniente analisar o tempo de permanência deste carbono nas florestas, que depende diretamente do modelo de manejo florestal utilizado (Nunes 2020).

2.6 RESINAGEM EM *Pinus*

Um produto florestal não madeireiro com alto valor econômico é a resina de *Pinus*. A resina é provavelmente um dos produtos naturais mais antigos usados em larga escala por humanos (Rodrigues-Corrêa; Lima; Fett-Neto, 2013). Porém o primeiro conceito de extração da resina foi descrito por Gerry (1922), onde destacou que a resina consiste em compostos conhecidos como terpenos e seus derivados oxidados, tanto nos raios fusiformes estendidos horizontalmente, como expostos em uma superfície tangencial recém cortada, a extensão vertical de agregados e parênquima são expostos na seção transversal onde as gotículas de oleoresina podem ser vistas exalando.

Para produção de resina, destacam-se as espécies do gênero *Pinus* e as variedades de *Pinus caribaea*, que é uma espécie de particular interesse para a resinagem em regiões tropicais, sendo amplamente cultivada para produção de madeira e resina. A resinagem em *Pinus* representa uma atividade econômica importante na silvicultura tropical e subtropical, especialmente no Brasil e outras regiões da América Latina. Diferentes tipos de ferramentas e métodos são desenvolvidos e testados em para extração de resina, principalmente o uso de ferramentas para extração em sistema fechado, como ferramentas de perfuração, chamada *borehole* (Prasad *et al.*, 2015).

Ao contrário da maioria dos extrativos da madeira, a resina se concentra mais no alburno do que no cerne, tornando-se mais abundante à medida que aumenta a altura do fuste (Koch, 1972). resina de *Pinus* é um complexo químico natural que pode

ser separado em dois componentes principais: que são breu e terebintina, que são utilizadas pela indústria química (Freitas *et al.* 2023). A resina natural caracteriza-se em uma substância insolúvel na presença de água, de coloração amarelada e inflamável (Zas *et al.*, 2020). A goma-resina de *Pinus* é uma importante fonte de terpenos (mono e sesquiterpenos) e colofônia (diterpenos) (Lima *et al.*, 2016). A goma-resina é uma estratégia de defesa chave das gimnospermas avançadas, baseada na combinação de uma estrutura anatômica complexa de dutos resiníferos e bioquímica elaborada de terpenos (Rodrigues-Corrêa; Lima; Fett-Neto, 2013). Além de seu papel biológico, essa substância possui ampla aplicação nas indústrias química, farmacêutica, agroquímica e de biocombustíveis, o que torna essencial compreender os fatores que regulam a biossíntese de terpenos para aumentar o rendimento de oleoresina — um dos grandes desafios enfrentados pela indústria florestal (Rodrigues-Corrêa; Lima; Fett-Neto, 2013). A terebintina, componente da goma-resina, destaca-se por possuir o maior valor comercial. Com características como alta volatilidade e odor marcante, é amplamente empregada na produção de solventes, tintas, vernizes, desinfetantes, sabões, fragrâncias, medicamentos, biopesticidas, e cânfora sintética (Ulukanli *et al.*, 2014). O breu é amplamente utilizado na fabricação de tintas, vernizes, plásticos, lubrificantes, adesivos, inseticidas e germicidas, devido às suas propriedades químicas e adesivas. Uma de suas aplicações mais importantes é na produção da cola de breu, amplamente empregada na indústria de papel para melhorar a resistência e qualidade do produto final (Shimizu; Sebbenn, 2008; Brito *et al.*, 1978).

As práticas silviculturais aplicadas para esse fim incluem o uso de sementes ou mudas geneticamente melhoradas, o manejo das plantações com base na fertilização, espaçamento e controle da vegetação invasora, bem como o uso de métodos ou estimulantes na extração da resina (Freitas, 2023). A resina é extraída de árvores vivas, geralmente pelo método de estrias na casca, no qual a remoção da casca é feita periodicamente, seguida pela aplicação de pasta estimulante contendo ácido sulfúrico e outros produtos químicos na superfície exposta recentemente ferida (Lima *et al.* 2016).

Embora os principais métodos de exploração de resina atualmente empregados sejam amplamente conhecidos, há necessidade de testar novos sistemas, como o processo de extração em ambiente fechado e o desenvolvimento de composições

inovadoras de pastas estimulantes. Nesse contexto, a extração de resina em sistema fechado surge como uma alternativa promissora, permitindo maior controle sobre o processo produtivo por parte dos produtores (Freitas, 2023). Uma das inovações mais promissoras na extração de oleorresina é o uso do método de *borehole*, que tem se destacado em relação às técnicas tradicionais. A oleorresina obtida pelo método de perfuração geralmente é isenta de resíduos e partículas desnecessárias e partículas desnecessárias. A resina apresenta aparência branca, enquanto no método tradicional de perfuração é amarela escura. Observou-se também um maior teor de terebintina (32,3%), juntamente com um baixo teor de cinzas, no método de *borehole*. Este método é novo e altamente padronizado, que envolve a abertura do maior número possível de dutos de resina, portanto, uma grande produção e melhor qualidade podem ser obtidas (Meena; Akash, 2023). De modo geral, a escolha do método de exploração da goma-resina é orientada pelas vantagens econômicas e pelos impactos ambientais associados ao processo. Aqueles que levam ao menor grau de impurezas, redução de mão de obra e menor impacto na longevidade das árvores são preferidos. Dentro desses requisitos, o método de "borehole" pode apresentar algumas vantagens em relação ao sistema convencional (Aoki; Cruz, 1998). Freitas et al, 2023 ressaltam que o efeito positivo dos tratamentos químicos na extração de resina é uma estratégia importante a ser adotada no sistema de perfuração.

Para o gênero *pínus*, o melhoramento genético é aplicado para aumentar a produção de madeira e resina, de modo a atender as demandas das indústrias de papel e celulose de fibra longa, de madeira serrada e do setor resinífero, aumento da produção de breu e terebintina (Santos, 2014). Embora haja interesse e conhecimento sobre a resinagem, é necessário desenvolver e aprofundar ainda mais os diferentes fatores envolvidos (Lopez-Alvarez, 2023). Os sistemas atuais de coleta são bem conhecidos, mas são necessários mais estudos para torná-los mais eficientes e lucrativos para os produtores (Freitas, 2023).

2.7 MELHORAMENTO GENÉTICO

O avanço das pesquisas com o melhoramento genético tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento da silvicultura brasileira, especialmente no que diz respeito à produtividade, à adaptação ambiental e à viabilidade econômica do plantio de espécies florestais (Santos et al., 2024). O melhoramento genético de espécies florestais é uma ciência relativamente nova, onde a partir de 1950, foram desenvolvidos os maiores experimentos com as espécies florestais. O *Pinus* foi uma das primeiras espécies a serem melhoradas em larga escala, nos Estados Unidos (RESENDE, 1999).

O melhoramento florestal, no Brasil, apresentou maiores desenvolvimentos a partir de 1967, devido à implantação da lei dos incentivos fiscais ao reflorestamento (Ferreira, 1983), e com convênios estabelecidos entre empresas florestais e Universidades, surgiram várias cooperativas de renome na pesquisa florestal, dentre elas pode-se citar o IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – associado à Universidade de São Paulo/ESALQ), SIF (Sociedade de Investigações Florestais – associado à Universidade Federal de Viçosa/UFV) e FUPEF (Fundação de Pesquisa e Estudos Florestais – associado à Universidade Federal do Paraná/UFPR). Em 1977 a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), juntamente com o governo federal lançaram o PNPF (Programa Nacional de Pesquisa Florestal), que na atualidade é conhecido como Centro Nacional de Pesquisas de Florestas (CNPQ). Com o surgimento dessas cooperativas e instituições, abriram-se novas perspectivas ao melhoramento genético de *Pinus* no Brasil.

Os programas de melhoramento genético com *Pinus caribaea* baseiam-se na seleção entre e dentro de progênies, nesse esquema, identificam-se as melhores progênies com base nas médias das parcelas e depois as melhores árvores dentro das melhores progênies (Macedo et al., 2005).

Por isso, é fundamental a estimativa de parâmetros genéticos que descrevem os níveis de variação genética existentes entre progênies, a magnitude do controle genético dos caracteres e os ganhos esperados com a seleção. Variação genética significativa para caracteres de crescimento, forma e produção de resina em testes de progênies de *P. caribaea* var. *bahamensis* é relatada por Sebbenn et al. (1994), estimativas do coeficiente de variação genética em testes de progênies vêm

detectando alto potencial genético para o melhoramento de caracteres de crescimento, forma do fuste e produção de resina (Sebbenn *et al.*, 1994); e ganhos na seleção de até 23,4% para altura, 30,6% para DAP (Zheng *et al.*, 1994), 8,26% para volume real (Sebbenn *et al.*, 1994) e 46,23% para produção de resina (Gurgel Garrido *et al.*, 1999). Esses resultados demonstram o grande potencial da espécie para o melhoramento de diversos caracteres de valor econômico para diferentes locais.

Os principais impulsos no melhoramento genético de *Pinus* no Brasil deram-se com a implantação, pelas entidades de pesquisas (IPEF, SIF, FUPEF, etc.) de estratégias de melhoramento, que consistem basicamente nos testes de procedências, visando à escolha de origens mais adequadas das sementes para estabelecimento, tanto de plantios comerciais como população base adequada para continuidade do programa de melhoramento genético das espécies (Missio, 2004).

O teste de progênie de polinização livre é o mais utilizado em espécies florestais, devido ao baixo custo de instalação e a facilidade de produzir progênie em relação aos testes de progênies que exigem polinização controlada, pois também permite obter estimativas, tanto da capacidade geral de combinação como de parâmetros genéticos. A validade deste método deve estar fundamentada na pressuposição de que todas as árvores selecionadas contribuem equitativamente com seus polens e que elas estejam igualmente receptivas à fecundação no mesmo período (Shimizu *et al.*, 1982).

O melhoramento genético do gênero *Pinus*, tem-se voltado principalmente, para papel, celulose de fibra longa, madeira serrada e para extração de resina (Resende, 1999). Uma das vantagens do melhoramento genético do *Pinus* é o aumento das taxas de ganho genético para o caráter produção volumétrica, produção de árvores com troncos mais retos, menor número de bifurcações e menor número de galhos grossos, melhorando o aproveitamento industrial da madeira. Além disso, em programas de melhoramento do gênero *Pinus*, a produção de sementes híbridas ocorre nos pomares clonais e bancos de genes formados a partir de espécies economicamente importantes, para condições edafoclimáticas específicas, sendo, de fundamental importância e inerente ao trabalho de produção de híbridos a aplicação de pólen de boa qualidade, com elevada capacidade de germinação (Kalil Filho *et al.*, 2000). Estudos conduzidos por diversos autores que abordam a estimativa de parâmetros genéticos relacionados a características silviculturais de crescimento e

produção de resina em diferentes espécies do gênero *Pinus* estão disponíveis na literatura científica (Tabelas 1 e 2). Em relação ao programa de conservação e melhoramento genético de *Pinus*, que caracteriza o Banco Ativo de Germoplasma de *Pinus* ssp. na FEIS/UNESP (Figura 1) cuja etapas foram realizadas neste trabalho.

Tabela 1. Estimativas de parâmetros genéticos para caracteres de crescimento obtidas em realização de trabalhos com espécies de *Pinus*.

Espécie	Idade (anos)	Caráter	$\hat{m}$	$\hat{h}_m^2$	CV_{gp}	CV_e %	Fonte
<i>P.caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	14	ALT (m)	18,85	0.48	22	5.84	MISSIO (2004)
		DAP (cm)	20,63	0.73	40	12,13	
<i>P. caribaea</i> var. <i>caribaea</i> 2	27	ALT (m)	26.62	0.40	3,1	6.73	ZULIAN (2017)
		DAP (cm)	30.48	0.48	2,76	3.27	
<i>P.caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	3	ALT (m)	-	-	-	-	ISHIBASHI (2022)
		DAP (cm)	13,81	-	6,61	-	
<i>P.caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	27	ALT (m)	30.22	0.37	4,14	7,30	SOUZA <i>et al.</i> (2017)
		DAP (cm)	30.62	0.59	4,59	9,0	
<i>P.caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	5	ALT (m)	8,81	-	4,40	9.27	SANTOS <i>et al.</i> (2014)
		DAP (cm)	13,72	-	2,80	6.62	
<i>P.caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	12	ALT (m)	19,32	0.31	7,60	7,81	MORAES <i>et al.</i> (2007)
		DAP (cm)	22,21	0.15	8,30	7,68	
<i>P.caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	21	ALT (m)	21,4	0,30	18,4	10,90	MACEDO <i>et al.</i> (2015)
		DAP (cm)	28,70	0,02	9,20	17,50	

Tabela 1 (Cont...)

<i>P. caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	14	ALT (m)	19,47	0,02	0,51	7,16	SILVA <i>et al.</i> (2005)
		DAP (cm)	23,75	0,07	1,13	7,15	
<i>P. caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	15	ALT (m)	20,27	0,01	0,71	2,04	SILVA <i>et al.</i> (2005)
		DAP (cm)	25,09	0,42	5,15	0,46	
<i>P. caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	16	ALT (m)	20,77	0,15	0,43	1,72	SILVA <i>et al.</i> (2005)
		DAP (cm)	26,11	0,01	2,14	0,45	
<i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	13	ALT (m)	21,91	0,53	3,17	2,35	MORAES (2001)
		DAP (cm)	24,50	0,49	0,52	3,91	
<i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	14	ALT (m)	23,20	0,50	3,81	2,72	MORAES (2001)
		DAP (cm)	25,04	0,50	3,75	4,05	
<i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	27	ALT (m)	30,22	0,37	4,14	9,27	SANTOS <i>et al.</i> (2017)
		DAP (cm)	30,60	0,59	4,59	6,62	

$\hat{h}_m^2$: herdabilidade da média de progênies; CV_{gp} : coeficiente de variação genotípica entre progênies; CV_e % : coeficiente de variação experimental; $\bar{m}$: média. Fonte: Própria autora.

Tabela 2. Estimativas de parâmetros genéticos para resina obtidas em realização de trabalhos com espécies de *Pinus*.

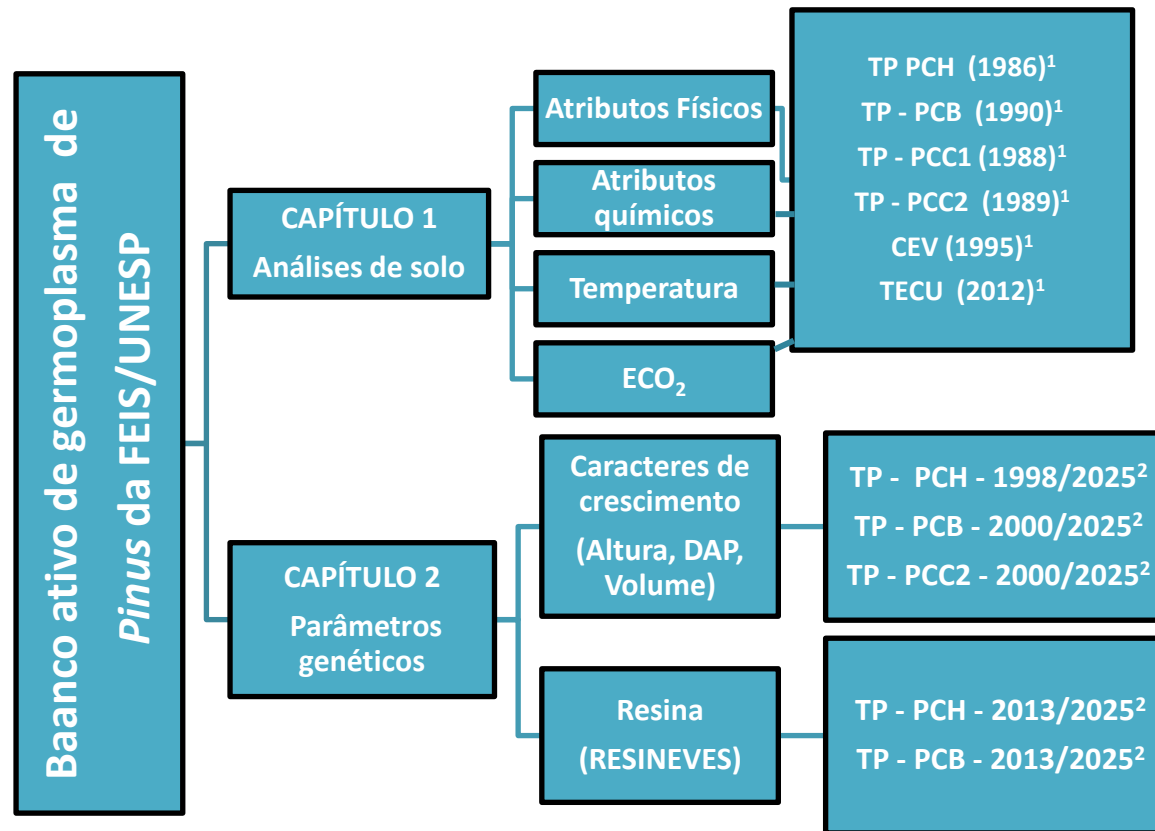
Espécie	Idade (anos)	Caráter	$\hat{m}$ (g)	$\hat{h}_m^2$	CV_{gp} %	CV_e %	Fonte
<i>P. elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	4	RESINA	18,9	0,15	3,8	25,5	ROMANELLI e SEBBENN (2004)
<i>P. elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	4	RESINA	16,2	0,15	5,5	30,6	ROMANELLI e SEBBENN (2004)
<i>P. elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	4	RESINA	21,1	0,36	4,0	22,6	ROMANELLI e SEBBENN (2004)
<i>P. elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	4	RESINA	-	0,38	3,7	25,8	ROMANELLI e SEBBENN (2004)
<i>P. elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	12	RESINA	3,21	0,07	2,4	93,2	ROMANELLI e SEBBENN (2004)
<i>P. elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	12	RESINA	3,34	0,42	3,7	90,3	ROMANELLI e SEBBENN (2004)
<i>P. elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	12	RESINA	2,80	0,70	3,8	96,5	ROMANELLI e SEBBENN (2004)
Tabela 2 (Cont...)						s	

<i>P. elliotii</i> var. <i>elliotii</i>	12	RESINA	19,47	0,46	2,6	93,3	ROMANELLI e SEBBENN (2004)
<i>P. elliotii</i> var. <i>elliotii</i>	11	RESINA	17,7	0,55	-	31,87	SHIMIZU e SPIR (1999)
<i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	26	RESINA	0,79	0,65	12,80	16,14	SANTOS (2014)

$\hat{h}_m^2$: herdabilidade da média de progênies; CV_{gp} coeficiente de variação genotípica entre progênies; CV_e % : coeficiente de variação experimental; $\bar{m}$: média.

Fonte: Própria autora.

Figura 1. Estrutura do Banco Ativo de Germoplasma de *Pinus* da FEIS/UNESP (BAG-*Pinus* spp.): componentes edáficos, climáticos e genéticos avaliados neste trabalho.



Nota: ¹Data da instalação do experimento; ²Data da coleta de dados utilizados neste trabalho; TP = Teste de progênies; PCH = *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; PCB = *Pinus caribaea* var. *bahamensis*; PCC1 = *Pinus caribaea* var. *caribaea* 1; PCC2 = *Pinus caribaea* var. *caribaea* 2; CEV = Competição de espécies e variedades; TECU = *Pinus tecunumanii*. Fonte: Própria autora.

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO-RODRÍGUEZ, P.; STRONG, M. T. **Catalogue of seed plants of the West Indies**. Washington: Smithsonian Institution, 2012. v. 98, 1192 p.
- ANORUO, A.; BERLYN, G. P. Caribbean Pine in Sustainable Tropical Forestry. **Journal of Sustainable Forestry**, New York, v. 1, p. 1-23, 1992.
- AOKI, H.; CRUZ, S.F. Novas alternativas de resinagem de *Pinus*. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 10, p. 123-126, 1998.
- ASSIS, T. F.; RESENDE, M. D. V. Genetic improvement of forest tree species. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, MG, v. 11, p.44–49, jun. 2011.
- BELDINI, T.P.; MCNABB, K.; LOCKABY, B.G.; SANCHEZ, F.G.; NAVEGANTES-CÂNCIO, O.; OLIVEIRA, R.C. The effect of plantation silviculture on soil organic matter and particle-size fractions in Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1593-1602, 2009.
- BOGGIANO, A. G. T.; GURAU, L.; POROJAN, M.; STANCIU, M. D. Identification of the juvenile wood transition age and of some growth characteristics in plantation vs. native populations of Cuban *Pinus caribaea* M. var. *caribaea* B&G. **Bioresources**, Ottawa, v. 20, n. 3, p. 6242–6266, 2025.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; TREVISAN, J. F. Condições climáticas e suas influências sobre a produção de resinas de pinheiros tropicais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 16, p. 37-45, 1978.
- CAMACHO, V. R.; BARBOLLA, L. J.; MORILLO, I. R.; VÁZQUEZ-LOBO, A.; PIÑERO, D.; DELGADO, P. Genetic variation and dispersal patterns in three varieties of *Pinus caribaea* (Pinaceae) in the Caribbean Basin. **Plant Ecology And Evolution**, Liège, v. 151, n. 1, p. 61–76, 2018.
- CAMCORE. **Relatório Anual CAMCORE 2003–2004**. Universidade Estadual da Carolina do Norte, 2004.
- CAMCORE Cooperative. Raleigh, NC: NC State University, 2000e. p. 188-209. Dvorak, WS, *et al.* Resultados de cinco anos de testes de progênie de primeira geração de pinheiros tropicais. **Ciência Florestal**, México, v. 46, n. 2, p. 192-203, 2000.
- COUTINHO, A. S.; PALUDZYSZYN FILHO, E.; RESENDE, M. D. V. Viabilidade da seleção precoce de *Pinus taeda* L. em diâmetro a altura do peito em programa de melhoramento genético. **Revista Científica Floresta**, Piracicaba, v. 45, n. 113, p. 205-219, mar. 2017.
- DELGADO, J. Industrialization and landscape: gum resin pinewoods of France, Spain and United States in the 19th and 20th centuries. **Estudios Rurales**, Buenos Aires, v. 6, n. 11, 2022.

DVORAK, W. S.; G. R. HODGE, E. A.; GUTIÉRREZ, L. F.; OSORIO, F. S. MALAN; T. K. STANGER. 2000. *Pinus tecunumanii*. In: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Species by the CAMCORE Cooperative. **College of Natural Resources**, NCSU. Raleigh, NC. USA. p. 188-209.

EQUILUZ, P. T.; PERRY JUNIOR, J. P. *Pinus tecunumanii* una especie nueva de Guatemala. **Ciencia Forestal**, México, n. 41, p. 3-22, 1983.

FERREIRA, M. Melhoramento florestal e silvicultura intensiva com Eucalipto. **Silvicultura**, São Paulo, v. 31, p. 5-11. 1983.

FREITAS, J. A.; FREIRE NETO, A.; BUCCI, L. A.; RANZINI, M.; AGUIAR, A. V.; LIMA, I. L.; LONGUI, E. L. Evaluation of different compositions of stimulating paste in a closed resin system in 10-year-old *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Research, Society And Development**, Itabira, v. 12, n. 8, 2023.

GERRY, E.B. **Oleoresin production: A Microscopic Study Of The Effects Produced On The Woody Tissues Of Southern Pines By Different Methods Of Turpentineing**. 1064. ed. Washington: Washington Government Printing Office, 1922. 46 p.

GERRY, E.B.; HALL, J.A. BIOCHEMICAL PHASES OF OLEORESIN PRODUCTION. **Plant Physiology**, Rockville, v. 10, n. 3, p. 537-43, 1935.

GONZÁLEZ, R. Crescimento e produtividade de povoamentos nativos de *Pinus tecunumanii* na Guatemala. **Bosque**, Valdivia, v. 23, n. 1, p. 43-51, 2002.

GURGEL GARRIDO, L.M.A.; OLIVEIRA GARRIDO, M.A.; PIRES, C.L.S.; PALOMO, M. Variação genética em progênies e procedências de *Pinus caribaea* Mor. var. *bahamensis*. Barr. et Golf. para produção de resina e características de crescimento. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v.11, n.2, p.105-121, 1999.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual IBA 2020**. São Paulo: IBÁ, 2020. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 14 ago 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual IBA 2024**. São Paulo: IBÁ, 2024. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2025.

ISHIBASHI, V.; FLÔRES JUNIOR, P.C.; MARTINEZ, D.T.; ALEXANDRE COELHO, S.G.; HIGA, A.R. Estratégias de seleção genética para silvicultura clonal em *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 50, e.3858, 2022.

IUCN. 2020. *Pinus tecunumanii*: avaliação. Glândula: IUCN, 2020.

KALIL FILHO, A. N.; GRAÇA, M. E. C.; MEDEIROS, A. C. S. Efeito da concentração de sacarose na germinação de pólen de sete espécies de Pinus. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 41, p. 37-45, 2000.

KOCH, P. **Utilization of the Southern Pines**, USDA. Forest Service. Southern Forest Experiment Station. v.1. 1972. 734p. (Agriculture Handbook, 420).

KOSKELA, J.; VINCETI, B.; DVORAK, W.; BUSH, D.; DAWSON, I. K.; LOO, J.; KJAER, E. D.; NAVARRO, C.; PADOLINA, C.; BORDÁCS, S.; JAMNADASS, R.; GRAUDAL, L.; RAMAMONJISOA, L. Utilization and transfer of forest genetic resources: A global review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 333, p. 22–34, 2014.

KRONKA, F. J.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do *Pinus* no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005, 160 p.

LA SCALA JÚNIOR N.; MARQUES JÚNIOR J.; PEREIRA G.T.; CORÁ J.E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, p. 1469–1473, 2000.

LIMA, J. C. D.; COSTA, F. D.; FLLER, T. N.; RODRIGUES-CORRÊA, K. C. S.; KERBER, M. R.; LIMA, M. S.; FETT, J. P.; FETT-NETO, A. G. Genes de referência para análise de qpcr em pinheiro-bravo adulto submetido à extração de resina como ferramenta para abordar a base molecular da resinose comercial. **Frontiers In Plant Science**, Lausanne, v. 7, n. 849, 2016.

LOPEZ-ALVAREZ, S.; ZAS, R.; PEREZ, M. F. M. Resin tapping: a review of the main factors modulating pine resin yield. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 202, n. 117105, 2023.

MACEDO, H. R.; FREITAS, M. L. M.; BOAS, O. V.; SEBBENN, A. M. Variabilidade genética em progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* aos 21 anos de idade. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 31–39, 2015.

MALIK, M. N. A.; ABDU, A.; KARAM, D. S.; JUSOP, S.; ABDUL-HAMID, H.; JAMALUDDIN, A. S.; BASRI, M. H. A.; PATEK MOHD, N. The fertility status of soils at rehabilitated degraded land in Universiti Putra Malaysia planted with *Pinus caribaea* and *Swietenia macrophylla*. **American Journal of Applied Sciences**, Dubai, v. 12 n.10, p. 752–758, 2015.

MEENA, D.S.; AKASH. Production and cost of chir-pine resin tapping by bore-hole method in Narendranagar Forest Division. **World Journal of Environmental Biosciences**, Kolhapur, v. 12, n. 4, p. 40-45, 2023.

MISSIO, R. F.; CAMBUIM, J.; MORAES, M. L. T.; PAULA, R. C. Seleção simultânea de caracteres em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 66, p. 161–166, 2004.

MOURA, V. P. G.; VALE, A. T. Variabilidade genética na densidade básica da madeira de *Pinus tecunumanii* procedente do México e da América Central no cerrado. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 1, n. 62, p. 104-113, 2002.

MORAES, M. L. T. **Variação genética e aplicação de análise multivariada em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret e Golfari.** 2001. 124 f. Tese (Livre-docência) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2001.

NUNES, L. J. R.; MEIRELES, C. I. R.; GOMES, C. J. P.; RIBEIRO, N. M. C. A. Forest contribution to climate change mitigation: Management oriented to carbon capture and storage. **Climate**, New Zealand, v. 8, n. 21, p. 3-20, 2020.

ORTIZ, A.C.; MUSARELLA C.M.; CARMONA, E.C. Biogeographical Areas of Hispaniola (Dominican Republic, Republic of Haiti). **Plant Ecology - Traditional Approaches to Recent Trends**. Dordrecht InTech; 2017.

PAYN, T.; CARNUS, J. M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLEY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; ORAZIO, C.; RODRIGUEZ, L.; SILVA, L. N.; WINGFIELD, M. J. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 352, p. 57–67, 2015.

PRASAD, N.; SHARMA, S.C.; PANDEY, S.; KAR, A. Effect of Freshening Tools and Freshening Intervals on Resin Yield from *Pinus caribaea* using Bore Hole Method of Resin Tapping. **Journal of Non Timber Forest Products**, Dehra Dun, v. 22, n. 1, p. 1-6, 2015.

RAMANANANTOANDRO, T.; REYNOLDS, T.P.; ANDRIANAHARINJAKA, F.A.; KOERA, R.A.; RAMANITRARIVO, L.C.; RAOBIMANDRANTO, N.A.; RANDRIAMBININTSOA, T.; RANDRIANOROSOA, A.; RATSIRARSON, J.; RAKOTONIRINA, M.T.; CHAIX, G. **International Conference on Tropical Wood (ICTW 2024) Advancing the sustainable use of tropical Forests**. Bois e forets des tropiques, 2024.

RESENDE, M.D.V. Melhoramento de essências florestais. *In*: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: UFV, p.589-647, 1999.

RODRIGUES-CORRÊA, K. C. S.; DE LIMA, J. C.; FETT-NETO, A. G. Oleoresins from Pine. **Production and Industrial Uses. Natural Products**, Dehra Dun, p.4037- 4060, 2013.

ROMANELLI, R. C.; SEBBENN, A. M. Parâmetros genéticos e ganhos na seleção para produção de resina em *Pinus elliottii* var. *elliottii*, no sul do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 11-23, 2004.

SANTOS, A.; IKEDA, A.; ALCANTARA, G.B. Sobrevivência e Produtividade de Mini-cepas de *Pinus taeda* L. Cultivadas em Minijardim Clonal em Ambiente Controlado. **Agrariae Liber**, v. 6, n. 1, p. 10-21, 2024.

SANTOS, W. **Variação genética e desempenho de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de madeira e resina.** 2014. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Sistemas de Produção) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2014.

SANTOS, W.; SOUZA, D. C. L.; MORAES, M. L. T. de; AGUIAR, A. V. de. Genetic variation of wood and resin production in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barret & Golfari. **Silvae Genetica**, Warsaw, v. 1, p. 1-7, 2017.

SEBBENN, A.M., PIRES, C.L.S.; STORCK, L.; CUSTODIO FILHO, A.; ROSA, P.R.F. Variação genética em progênies de meios-irmãos de *Pinus caribaea* Mor.var. *bahamensis* Bar.et Gol. na região de Bebedouro, SP. **Revista do Instituto Florestal**. São Paulo, v. 6, p. 63-73, 1994.

SEBBENN, A. M.; VILAS-BÔAS, O. V.; MAX, V.C.M. Variação genética, herdabilidades e ganhos na seleção para caracteres de crescimento em teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* aos 20 anos de idade em Assis-SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 103–115, 2008.

SILVA, J. M.; AGUIAR, A. V.; MORI, E. S.; MORAES, M. L. T. Variação genética e ganho esperado na seleção de progênies de *Pinus caribaea* var. *caribaea* em Selvíria, MS. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 241-252, jun. 2011.

SILVA, J. M. **Análises genéticas em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* por caracteres quantitativos e marcadores moleculares**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2005.

SILVA, L. B.; NOVAIS, J. W. Z.; SANCHES, L.; MACHADO, N. G.; AQUINO, A. M.; SALLO, F. S. Serrapilheira e efluxo de CO₂ do solo em floresta sazonalmente alagável no Pantanal Brasileiro. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 21, n. 3, p. 178–182, 2017.

SHIMIZU, J.Y.; KAGEYAMA, P.Y.; HIGA, A.R. **Procedimentos e comendações para estudos de progênies de essências florestais**. Curitiba: EMBRAPA-URPFCS, 1982. 33p. (EMBRAPA-URPFCS. Documento n.11).

SHIMIZU, J. Y.; MEDRADO, M. J. S. Cultivo do *Pinus*. **SISTEMAS DE PRODUÇÃO, Embrapa Florestas**, n. 5, p. 1-18, 2005.

SHIMIZU, J. Y.; SEBBENN, A. M. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. Colombo: Embrapa Florestas, p. 49–74, 2008.

SHIMIZU, J. Y.; SPIR, I. H. Z. Seleção de *Pinus elliottii* pelo valor genético para alta produção de resina. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 38, p. 103-117, 1999.

SHIMIZU, J. Y. ***Pinus* na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

SOUZA, T. S.; SANTOS, W.; DENIZ, L. D.; ALVES, A. P. de O.; SHIMIZU, J. Y.; SOUSA, V. A. de; AGUIAR, A. V. V. Variação genética em caracteres quantitativos em *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 113, p. 177-185, mar. 2017.

STYLES, B. T.; HUGHES, C. E. **Variabilidad de los *Pinus* centroamericanos: taxonomía y nomenclatura de los *Pinus* y otras gimnospermas.** Honduras: Escuela Nacional de Ciências Forestales, Centro Nacional de Investigación Forestal Aplicada, 1988. 20 p.

TULIO, R.H., RACHWAL, M.F., ZANATTA, J.A., DA SILVA, K., & KASCHUK, G. Physical, chemical and microbiological soil attributes influence soil greenhouse gases fluxes in Atlantic Forest and pine (*Pinus taeda*) plantations in Brazil. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 39, p.183 –197, (2022).

ULUKANLI, Z.; KARABÖRKLÜ, S.; BOZOK, F.; ATES, B.; ERDOGAN, S.; CENET, M.; KARAASLAN, M. G. Chemical composition, antimicrobial, insecticidal, phytotoxic and antioxidant activities of Mediterranean *Pinus brutia* and *Pinus pinea* resin essential oils. **Chinese Journal of Natural Medicines**, Beijing, v. 12, n. 12, p. 901-10, 2014.

PÉREZ-DEL VALLE, L.; GEADA-LÓPEZ, G.; SOTOLONGO-SOSPEDRA, R. Anatomía foliar comparada de *Pinus caribaea* var. *caribaea* y *P. tropicalis* (Pinaceae) en asociación simpátrica – Comparative leaf anatomy of *Pinus caribaea* var. *caribaea* and *P. tropicalis* (Pinaceae) in sympatric association. **Revista Del Jardín Botánico Nacional**, v. 41, p. 163-174, 2020.

WANG, H.; MALCOLM, D. C.; FLETCHER, A. M. *Pinus caribaea* in China: introduction, genetic resources and future prospects. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 117, n. 1/3, p. 1-15, 1999.

ZAS, R.; QUIROGA, R.; TOUZA, R.; VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, C.; SAMPEDRO, L.; LEMA, M. Resin tapping potential of Atlantic maritime pine forests depends on tree age and timing of tapping. **Industrial Crops And Products**, Amsterdam, v. 157, 2020.

ZHENG, Y.; ENNOS, R.; WANG, H. Provenance variation and genetic parameters in a trial of *Pinus caribaea* var. *bahamensis* Barr. and Golf. **Forest Genetics**, Zvolen, v.1, n.3, p.167-174, 1994.

ZOBEL, B.; VAN W.Y.K, G. Variabilidade da madeira em pinheiros tropicais. **Revista de Produtos Florestais**, Lisbon, v. 48, n. 10, p.64-70, 1998.

ZULIAN, D. F. **Métodos de seleção para otimizar o ganho e a diversidade genética em pomares de sementes por muda de *Pinus caribaea* var. *caribaea*.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2017.

3 CAPÍTULO 2 - Seleção de Genótipos de *Pinus caribaea* Morelet Var. *bahamensis* e *Pinus caribaea* Morelet Var. *hondurensis* Barret E Golfari para Produção de Resina e Madeira comparado em Dois Sistemas de Resinagem

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo verificar o desempenho genético e produtivo de genótipos de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus caribaea* var. *caribaea*, com foco na produção de madeira e resina, sob diferentes sistemas de resinagem (tradicional e *borehole*), visando subsidiar programas de melhoramento genético e manejo florestal sustentável.

A equação volumétrica de Meyer foi a mais adequada para estimar o volume do fuste, apresentando os maiores coeficientes de determinação (R^2 entre 0,92 e 0,98) nas três variedades analisadas. Para a produção de resina, foi ajustado um modelo de regressão linear múltipla baseado em DAP, altura e volume, com $R^2 = 0,36$. No que se refere aos parâmetros genéticos, a variedade *P. caribaea* var. *bahamensis* apresentou excelente desempenho aos 35 anos, com herdabilidade individual de 0,75 para volume, coeficiente de variação genética de 68,04% e acurácia de 0,9661, demonstrando grande potencial para seleção. A mortalidade, no entanto, foi significativa nessa variedade, reduzindo o tamanho efetivo populacional (N_e) de 439 para apenas 84, o que acende um alerta para resgate e conservação genética. A variedade *P. caribaea* var. *caribaea* apresentou menor herdabilidade e estabilidade genética, sendo mais sensível às influências ambientais. Por outro lado, *P. caribaea* var. *hondurensis* manteve herdabilidades moderadas a altas para volume (0,47 aos 39 anos), com variabilidade genética elevada ($CV_{gi} = 25,74\%$) e boa acurácia seletiva (0,8381), evidenciando seu valor como base de melhoramento. Conclui-se que o caráter volume é o mais responsivo à seleção, especialmente em idades avançadas e após o desbaste seletivo, e pode ser priorizado em programas de melhoramento. O uso do sistema *borehole* mostra-se promissor como alternativa de resinagem sustentável. Recomenda-se ações urgentes de conservação para *P. caribaea* var. *bahamensis*, enquanto *hondurensis* e *caribaea* possuem base genética ainda viável para seleção e clonagem.

Palavras-chave: melhoramento genético; volume; resina; herdabilidade; *borehole*, variabilidade genética.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the genetic and productive performance of *Pinus caribaea* var. *bahamensis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* genotypes (*Pinus caribaea* var. *caribaea*), focusing on wood and resin production under different resin extraction systems (traditional and *borehole*), aiming to support genetic improvement and sustainable forest management programs. Meyer's volumetric equation was the most appropriate for estimating stem volume, presenting the highest coefficients of determination (R^2 between 0.92 and 0.98) in the three varieties analyzed. For resin production, a multiple linear regression model based on DBH, height, and volume was

adjusted, with $R^2 = 0.1321$. Regarding genetic parameters, the variety *P. caribaea* var. *bahamensis* showed excellent performance at 35 years of age, with an individual heritability of 0.75 for volume, a coefficient of genetic variation of 68.04%, and an accuracy of 0.9661, demonstrating great potential for selection. Mortality, however, was significant in this variety, reducing the effective population size (E_p) from 439 to only 84, which raises an alert for genetic rescue and conservation. The variety *P. caribaea* var. *caribaea*, on the other hand, showed lower heritability and genetic stability, being more sensitive to environmental influences. On the other hand, *P. caribaea* var. *hondurensis* maintained moderate to high heritabilities for volume (0.47 at 39 years of age), with high genetic variability ($CV_{gi} = 25.74\%$) and good selective accuracy (0.8381), demonstrating its value as a breeding basis. It is concluded that the volume trait is the most responsive to selection, especially at older ages and after selective thinning, and can be prioritized in breeding programs. The use of the borehole system shows promise as an alternative for sustainable resin extraction. Urgent conservation actions are recommended for *P. caribaea* var. *bahamensis*, while *hondurensis* and *caribaea* have a genetic base that is still viable for selection and cloning.

Keywords: genetic improvement; volume; resin; heritability; borehole; genetic variability.

3.1 INTRODUÇÃO

Área com reflorestamento comercial no Brasil cresceu nos últimos anos, batendo recorde em 2024, ultrapassando pela primeira vez 10 milhões de hectares plantados. Desse total 19% ou 1,9 milhão de hectares são de áreas plantadas com *Pinus* (Ibá, 2024). As plantações florestais globais têm experimentado um crescimento significativo, passando de 167,5 milhões de hectares em 1990 para 277,9 milhões de hectares em 2015, representando um aumento de 4,06% para 6,95% (Payn *et al.*, 2015). Este crescimento reflete a crescente demanda por produtos florestais e a necessidade de alternativas sustentáveis para o suprimento de madeira e fibra.

O gênero *Pinus* compreende espécies e variedades de expressiva relevância econômica mundial, entre as quais se destacam os chamados *Pinus* tropicais. *P. caribaea* tem sua distribuição natural abrangendo as regiões caribenhas, particularmente a ilha de Hispaniola que faz parte do grupo das Grandes Antilhas na região do Caribe (Ortiz; Musarella; Carmona, 2017). O *P. caribaea* possui diversas utilidades que justificam sua importância econômica global. Essas diversas características tornam a madeira tropical altamente versátil, oferecendo inúmeras aplicações em construção, produtos químicos, e muito mais (Ramanantoandro *et al.*, 2024).

Esse gênero centenas de espécies, sendo o *Pinus caribaea* uma das principais no cenário tropical, com três variedades economicamente relevantes: *caribaea*, *hondurensis* e *bahamensis*. Dentre essas, a *P. caribaea hondurensis* é a mais cultivada no

mundo devido ao seu rápido crescimento e boa forma, enquanto a *P. caribaea* var. *bahamensis* tem se destacado pela elevada produtividade de resina em baixas altitudes e desempenho promissor na produção de madeira em regiões tropicais brasileiras (Shimizu, 2008).

Ao longo dos últimos dois séculos, o uso de recursos genéticos florestais tem impulsionado a disseminação global desta espécie. Nos últimos 200 anos, os recursos genéticos de árvores florestais vêm sendo amplamente movimentados, tanto dentro quanto fora de suas áreas nativas de ocorrência, com o objetivo de apoiar a pesquisa e o desenvolvimento florestal (Koskela, 2014). Essa movimentação de germoplasma possibilitou o estabelecimento de *Pinus caribaea* em diversas regiões tropicais e subtropicais do planeta, onde a espécie demonstrou notável capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas.

O setor florestal brasileiro, considerado um dos mais desenvolvidos do mundo e de base para importantes segmentos industriais que utilizam madeira como matéria-prima, tem no melhoramento genético arbóreo um papel fundamental no aumento da competitividade das empresas de base florestal, especialmente pelos seus reflexos positivos no incremento de adaptação, produtividade e qualidade (Assis; Resende, 2011).

A exploração da resinagem configura-se como uma das utilizações mais tradicionais e economicamente significativas do *P. caribaea*. A elucidação dos mecanismos bioquímicos subjacentes à biossíntese e secreção da goma-resina é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que visem à maximização do rendimento e à sustentabilidade dessa atividade no contexto do manejo florestal (Gerry; Hall, 1935). Nos últimos dois séculos, a demanda por seus principais subprodutos, obreu e a terebentina cresceu exponencialmente, enquanto as indústrias químicas, como tintas, adesivos, colas, borrachas sintéticas, ceras depilatórias e vernizes etc., aumentaram a produção (Delgado, 2022).

A adoção de boas práticas de manejo, aliada ao melhoramento genético e às condições edafoclimáticas favoráveis do Brasil, tem permitido ao país alcançar os mais altos índices de produtividade em plantações de *Pinus*, seja para produção de madeira, celulose ou resina (Ibá, 2020). A sustentabilidade a longo prazo destes sistemas está provavelmente em parte ligada à manutenção da matéria orgânica do solo e à

boa estrutura e agregação do solo, especialmente em áreas com solos de baixa fertilidade (Beldini, *et al.*, 2009).

A estimação de parâmetros genéticos a partir de testes de progênie é essencial para muitas decisões importantes no melhoramento genético florestal, incluindo estimativas de herdabilidade, correlações genéticas entre características, e interações genótipo por ambiente (GxE) (Alan *et al.*, 2013). A produtividade de resina pode ser aumentada significativamente pelos programas de melhoramento genético demonstrando a importância da integração entre conhecimentos genéticos e práticas de manejo para otimização da produção resinosa (Nugrahanto, *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, este estudo visa analisar variabilidade genética e a produtividade de genótipos de *Pinus* provenientes do CCGMPT, levando em consideração os diferentes sistemas de extração de resina e os caracteres relacionados a produção de madeira e resina. O objetivo é gerar subsídios técnicos e científicos que apoiem programas de melhoramento genético e práticas de manejo sustentável, promovendo o uso eficiente dos recursos naturais e a ampliação da base produtiva do setor florestal tropical brasileiro.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em três testes de progênes de primeira geração, conduzidos na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), vinculada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), situada no município de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul (Figura 2). Um dos testes envolve a variedade *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PCH), cujas 96 progênes avaliadas originam-se de um pomar clonal de sementes mantido pelo Centro de Conservação Genética e Melhoramento de Pinheiros Tropicais (CCGMPT), localizado em Aracruz – ES (19°49’S, 40°16’W), a uma altitude de 50 metros (Martini; Engel, 1985).

As sementes utilizadas neste teste foram cedidas pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), em colaboração com a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), situada em Piracicaba – SP. Adicionalmente, foram incluídas quatro testemunhas comerciais provenientes de árvores matrizes da empresa Duratex, coletadas no município de Agudos – SP (22°22’S, 48°52’W), a uma altitude de 550 metros. O segundo teste abrange a

variedade *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, também originada do CCGMPT e viabilizada por meio da parceria com o IPEF/ESALQ/USP. Este experimento é composto por 119 progênies, além de duas testemunhas comerciais fornecidas pela mesma empresa (Duratex). Este teste de progênies *Pinus caribaea* var. *bahamensis* (PCB) foi subdividido em duas condições, sendo que uma parte recebeu adubação (denominada PCB 2) e a outra não (denominada PCB 1). Ambos os ensaios foram instalados nos dias 20 e 21 de março de 1990, utilizando espaçamento de 3,0 x 3,0 metros. O delineamento experimental adotado foi o quadrado latino 11 x 11 triplo, parcialmente balanceado, com parcelas contendo 6 plantas cada (Figura 3).

Figura 2. Imagem de satélite com a localização das áreas experimentais de *Pinus caribaea* var. *caribaea* (PCC 2), *Pinus caribaea* var. *bahamensis* (PCB) e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PCH) na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP, Selvíria-MS



Fonte: Imagem Google Earth (2025).

Figura 3 – Registro aéreo com drone da área experimental de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* (PCB), evidenciando a mortalidade das árvores do teste de progênes



Fonte: Própria autora.

O teste com *Pinus caribaea* var. *caribaea* 2 (PCC 2) foi instalado nos dias 20, 21 e 22 de fevereiro de 1989, também com espaçamento de 3,0 x 3,0 metros. O delineamento utilizado foi o quadrado latino 10 x 10 triplo em parcelas subdivididas, contendo 10 plantas por parcela (Figura 4).

Figura 4 – Imagens aéreas do teste de progênes *Pinus caribaea* var. *caribaea* 2 (PCC2)



Fonte: Própria autora.

O teste de progênes *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PCH) foi o mais antigo entre os instalados, tendo sido implantado em junho de 1986. Também utilizou espaçamento de 3,0 x 3,0 metros, com delineamento experimental em quadrado latino 10 x 10 triplo, parcialmente balanceado, e parcelas compostas por 10 plantas (Figura 5).

Figura 5 – Imagens aéreas do teste de progênes *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PCH).



Fonte: Própria autora.

3.2.1. Coleta de dados

As análises genéticas e silviculturais conduzidas foram realizadas em diferentes momentos, contemplando avaliações antes e após os desbastes aplicados nos testes de progênes, bem como no ano atual das medições. Essa abordagem possibilitou compreender de forma mais ampla o comportamento das progênes de *P. caribaea*

bahamensis, *P. caribaea caribaea* e *P. caribaea hondurensis*, considerando a dinâmica populacional ao longo do tempo. Esse processo envolveu a recuperação, digitação e organização sistemática de planilhas físicas e registros de campo antigos, permitindo a consolidação de uma base de dados.

Foram resgatadas informações referentes aos caracteres altura total (ALT), diâmetro à altura do peito (DAP), volume (VOL) e sobrevivência (SOB), referentes a duas fases anteriores dos experimentos: uma anterior à aplicação do desbaste seletivo e outra após a realização do desbaste. Esses dados foram integrados aos valores obtidos na reavaliação de campo conduzida no ano de 2025, de modo a possibilitar uma análise mais ampla e consistente da performance das progênies ao longo do tempo.

O resgate desses dados é de grande relevância, pois permite a análise da estabilidade genética, da resposta das progênies ao manejo silvicultural (como o desbaste seletivo), bem como o acompanhamento da expressão fenotípica sob diferentes densidades populacionais (antes e após o desbaste) e estágios de crescimento. Além disso, amplia a acurácia das estimativas genéticas ao aumentar a quantidade de informações disponíveis por indivíduo e por progênie.

A avaliação da sobrevivência (SOB) foi realizada mediante contagem direta do número de plantas vivas em cada parcela no momento da medição, sendo expressa como a porcentagem de sobreviventes em relação ao número de mudas originalmente implantadas. Esta variável foi considerada no modelo de análise para estimar a adaptabilidade e rusticidade das progênies em diferentes ambientes e ao longo do tempo.

O DAP foi mensurado utilizando uma suta florestal, à altura de 1,30 m do solo. A altura total das árvores foi obtida com o auxílio de um hipsômetro digital de precisão (Vertex).

Também foram abatidas árvores representantes de cada parcela e seccionadas para medições de diâmetro e comprimento por seção, permitindo o ajuste e aplicação das equações de volume para as demais árvores, não abatidas, do experimento.

Com base nos dados de DAP e ALT, o volume individual (VOL) do fuste foi determinado por meio de cubagem rigorosa, utilizando-se modelos volumétricos específicos previamente ajustados para a espécie e condição silvicultural, assim, o

volume total de madeira foi estimado a partir de equações de regressão de acordo com Moraes Neto (2009).

$$\text{Hohenadl-kren: } VOL_1 = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2$$

$$\text{Spurr (Equação 1): } VOL_2 = \beta_1(d^2h)$$

$$\text{Spurr (Equação 2): } VOL_3 = \beta_0 + \beta_1(d^2h)$$

$$\text{Spurr (Equação 3): } \ln VOL_4 = \beta_0 + \beta_1 \ln(d^2h)$$

$$\text{Stoate: } VOL_5 = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 d^2 + \beta_3(d^2h)$$

$$\text{Meyer: } VOL_6 = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 h + \beta_3 d^2 + \beta_4(d^2h) + \beta_5(dh)$$

$$\text{Berkhout: } \ln VOL_7 = \beta_0 d^{\beta_1}$$

$$\text{Husch: } \ln VOL_8 = \beta_0 + \beta_1 \ln d$$

$$\text{Schumacker-Hall linear: } \ln VOL_9 = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h$$

Com desses dados, foram realizadas análises estatísticas, realizadas via modelos lineares mistos pelo o método REML/BLUP, possibilitando a estimativa de parâmetros genéticos.

3.2.2. Instalação do sistema de resinagem fechado (*borehole*) e modelagem da produção de resina por *borehole* (2025)

No dia 06 de fevereiro de 2025, foi instalado um sistema de resinagem fechado do tipo *borehole* nas árvores previamente selecionadas para essa finalidade. A instalação foi realizada pela empresa RESINEVES, especializada em tecnologias de extração sustentável de resina. O sistema *borehole* (Figura 6) caracteriza-se pela perfuração de um orifício profundo no tronco da árvore, geralmente com diâmetro e profundidade padronizados conforme a espécie. O objetivo é promover a coleta interna da resina sem exposição direta ao ambiente externo. Essa metodologia visa minimizar a evaporação de voláteis e a contaminação da resina por agentes externos, além de reduzir impactos fisiológicos na árvore, se comparada a métodos tradicionais de sangria aberta. O sistema fechado contribui para maior eficiência na coleta, conservação das propriedades físico-químicas da resina e prolongamento do período produtivo do vegetal. O procedimento de instalação seguiu protocolos técnicos de segurança e calibragem, garantindo a uniformidade dos orifícios e a correta vedação com tubos e reservatórios apropriados para coleta hermética.

Figura 6. Em sequência, o processo de instalação do sistema fechado de extração de resina tipo *borehole*.



Nota: (a) demarcação e identificação das árvores no talhão experimental; (b) inserção do tubo coletor e vedação da abertura com saco plástico; (c) perfuração do tronco com broca helicoidal acoplada a motor mecanizado (sistema *borehole*); (d) acúmulo da resina coletada no reservatório hermético.

Fonte: Própria autora.

Para estimar a produção de resina em indivíduos de *P. caribaea* var. *bahamensis* por meio do método de perfuração (*borehole*), foi ajustado um modelo de regressão linear múltipla com base nas características dendrométricas dos indivíduos avaliados no ano de 2025 com base na equação de Brito *et al.* (1982). A variável dependente (Y) corresponde à produção de resina (em gramas) obtida por árvore, enquanto as variáveis independentes utilizadas foram a altura total (ALT, em metros), o diâmetro à altura do peito (DAP, em centímetros) e o volume individual estimado de madeira (VOL, em metros cúbicos (m³)).

A equação geral do modelo utilizado foi:

$$Y = \beta_0 + \beta_1.ALT + \beta_2.DAP + \beta_3.VOL$$

onde:

- Y = produção de resina por árvore (g);
- β_0 = intercepto da regressão;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = coeficientes estimados para ALT, DAP e VOL, respectivamente;
- ALT = altura total da árvore (m);
- DAP = diâmetro à altura do peito (cm);
- VOL = volume individual de madeira (dm³).

O modelo foi ajustado por regressão linear ordinária (método dos mínimos quadrados), utilizando os dados coletados em campo. A inclusão das variáveis ALT, DAP e VOL foi fundamentada na hipótese de que o crescimento em altura e diâmetro, assim como o volume total da árvore, estão diretamente relacionados à capacidade fisiológica de produção e acúmulo de resina. A escolha dessas variáveis também permite integrar a análise da produção de resina com os dados de desempenho silvicultural, visando estratégias de seleção genotípica mais eficientes e com potencial para melhor aproveitamento econômico das árvores.

3.2.3. Análises estatísticas e componentes de variância

Para se obter as estimativas de componentes de variância e predição dos parâmetros genéticos foi utilizado o modelo linear misto, adotando-se o procedimento REML/BLUP (máxima verossimilhança restrita / melhor predição linear não viciada), empregando-se o *software* genético-estatístico SELEGENREML/BLUP, desenvolvido por Resende (2007b, 2016). O procedimento REML do componente da estimativa de variância foi desenvolvido por Patterson & Thompson (1971) e Thompson (1973). Os detalhes a respeito deste método são apresentados por Searle *et al.* (1992), Resende (2002) e Resende (2007a).

As análises individuais dos dois experimentos, foram feitas com base no “Modelo 93” do SELEGEN, cujo modelo matemático é expresso por:

$$y = Xr + Za + Wp + e$$

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 componentes de variância e parâmetros genéticos estimados foram: variância genética aditiva ($\hat{\sigma}_a^2$); variância ambiental entre parcelas ($\hat{\sigma}_c^2$); variância residual (ambiental+não aditiva) ($\hat{\sigma}_e^2$); variância fenotípica individual ($\hat{\sigma}_f^2$); herdabilidade individual dos efeitos aditivos ($\hat{h}_a^2$); herdabilidade individual ajustada para os efeitos de parcela ($\hat{h}_{aj}^2$); coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas ($\hat{C}_p^2$); herdabilidade de médias 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_{gi}); coeficiente de variação genotípica entre progênies (CV_{gp}); coeficiente de variação experimental (CV_e); coeficiente de variação relativa (CV_r); média geral ($\hat{m}$); Teste da razão de verossimilhança (LRT); qui-quadrado da deviance (χ^2).

As distribuições e estruturas da média e variâncias são:

$$y|b, V \sim N(Xb, V)$$

$$a|A, \sigma_a^2 \sim N(0, A\hat{\sigma}_a^2)$$

$$c|\sigma_c^2 \sim N(0, I\hat{\sigma}_c^2)$$

$$e|\sigma_e^2 \sim N(0, I\hat{\sigma}_e^2)$$

$\text{COV}(a, c') = 0$; $\text{COV}(a, e') = 0$; $\text{COV}(c, e') = 0$, ou seja, as covariâncias entre todos os efeitos aleatórios do modelo são consideradas nulas. Assim:

$$E \begin{bmatrix} y \\ a \\ c \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xb \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad e \quad \text{var} \begin{bmatrix} y \\ a \\ c \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V & ZG & WC & R \\ GZ' & G & 0 & 0 \\ CW' & 0 & C & 0 \\ R & 0 & 0 & R \end{bmatrix}, \text{ em que:}$$

$$G = A \hat{\sigma}_a^2$$

$$R = I \hat{\sigma}_c^2$$

$$C = I \hat{\sigma}_e^2$$

$$V = ZA \hat{\sigma}_a^2 Z' + WI \hat{\sigma}_c^2 W' + I \hat{\sigma}_e^2 = ZGZ' + WCW' + R.$$

As equações de modelo misto são:

$$\begin{bmatrix} X'X & X'Z & X'W \\ Z'X & Z'Z + A^{-1}\lambda_1 & Z'W \\ W'X & W'Z & W'W + I\lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{a} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'y \\ Z'y \\ W'y \end{bmatrix}, \text{ em que:}$$

$$\lambda_1 = \frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_a^2} = \frac{1 - \hat{h}^2 - \hat{c}^2}{\hat{h}^2}; \quad \lambda_2 = \frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_c^2} = \frac{1 - \hat{h}^2 - \hat{c}^2}{\hat{c}^2};$$

$$\hat{h}_2 = \frac{\hat{\sigma}_a^2}{\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2 + \hat{\sigma}_c^2} : \text{herdabilidade individual no sentido restrito, no bloco.}$$

$$\hat{c}_2 = \frac{\hat{\sigma}_c^2}{\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_c^2 + \hat{\sigma}_e^2} : \text{correlação devida ao ambiente comum da parcela.}$$

$\hat{\sigma}_a^2$: variância genética aditiva.

$\hat{\sigma}_c^2$: variância entre parcelas;

$\hat{\sigma}_e^2$: variância residual (ambiental dentro de parcelas + não aditiva).

A: matriz de correlação genética aditiva entre os indivíduos em avaliação.

Demais estimativas de variâncias e parâmetros genéticos processados pelo programa:

a) Variância genética aditiva ($\hat{\sigma}_a^2$):

$$\hat{\sigma}_a^2 = [\hat{a}'A^{-1}\hat{a} + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr}(A^{-1}C^{22})]/q;$$

b) Variância ambiental entre parcelas ($\hat{\sigma}_c^2$):

$$\hat{\sigma}_c^2 = [\hat{c}'\hat{c} + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr} C^{33}]/s_1;$$

c) Variância residual (ambiental + não aditiva) ($\hat{\sigma}_e^2$):

$$\hat{\sigma}_e^2 = [y'y - \hat{r}'X'y - \hat{a}'Z'y - \hat{c}'W'y]/[N - r(x)];$$

Em que: C^{22} e C^{33} vem da inversa de C; C: matriz dos coeficientes das equações de modelo misto; tr : operador traço matricial; $r(x)$: posto da matriz X; N, q, s: números de dados, de indivíduos e de parcelas, respectivamente.

d) Variância fenotípica individual ($\hat{\sigma}_f^2$):

$$\hat{\sigma}_f^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_c^2 + \hat{\sigma}_e^2;$$

e) Herdabilidade individual no sentido restrito, ou seja, dos efeitos aditivos:

$$\hat{h}_a^2 = \frac{\hat{\sigma}_a^2}{\hat{\sigma}_f^2};$$

f) Herdabilidade em nível de média de progênies:

$$\hat{h}_m^2 = \frac{(1/4)\hat{\sigma}_a^2}{(1/4)\hat{\sigma}_a^2 + \frac{\hat{\sigma}_c^2}{r} + \frac{(0,75\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2)}{n.r}};$$

g) Herdabilidade aditiva dentro de parcela:

$$\hat{h}_{ad}^2 = \frac{0,75\hat{\sigma}_a^2}{0,75\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2};$$

h) Coeficiente de variação genética aditiva individual:

$$CV_{gi}(\%) = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}_a^2}}{\hat{m}} 100;$$

i) Coeficiente de variação genotípica entre progênieis:

$$CV_{gp}(\%) = \frac{\sqrt{0,25\hat{\sigma}_a^2}}{\hat{m}} 100;$$

j) Coeficiente de variação experimental:

$$CV_e(\%) = \frac{\sqrt{s}}{\bar{x}}$$

k) Coeficiente de variação relativa:

$$CV_r = \frac{CV_{gp}}{CV_e};$$

l) Acurácia da seleção de progênieis, assumindo sobrevivência completa:

$$r_{aa} = \sqrt{\hat{h}_m^2}$$

3.2.4. Tamanho efetivo populacional calculado no decorrer do tempo

O tamanho efetivo populacional (N_e) foi obtido com base em Resende (2002):

$$Ne = (4 \cdot Nf \cdot kf) / [kf + 3 + (\sigma^2_{kf})]$$

Em que:

Nf: número de progênies selecionadas;

kf: número médio de indivíduos selecionados por progênie;

σ^2_{kf} : estimativa da variância do número de indivíduos selecionados por progênie.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Definição da equação para estimativa de volume

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, observa-se que, entre as diferentes equações avaliadas para estimativa de volume nos ensaios PCB, PCC2 e PCH, a equação de Meyer destacou-se de forma consistente, apresentando os maiores coeficientes de determinação (R^2) em todos os casos.

No caso do PCB (Tabela 3), a equação de Meyer apresentou um R^2 de 0,92, indicando um excelente ajuste aos dados observados. Esse valor expressivamente alto evidencia que a equação é capaz de explicar praticamente toda a variabilidade do volume real das árvores, superando as demais equações testadas. As equações de Spurr (Equação 2) e a de Stoate, também apresentaram R^2 de 0,92, com diferenças nas casas decimais, sendo a equação de Meyer superior. Para o PCC2 (Tabela 4), a equação de Meyer novamente apresentou desempenho superior, com R^2 de 0,98, superando ligeiramente a equação de Stoate ($R^2 = 0,97$) e as variações da equação de Spurr ($R^2 = 0,96$). Esse resultado reforça a robustez da equação de Meyer para diferentes condições de morfologia de fuste, consolidando sua aplicação como ferramenta precisa de estimativa volumétrica. Já para o PCH (Tabela 5), a equação de Meyer obteve um R^2 de 0,97, empatando com a equação de Stoate e superando as demais, como Spurr (Equação 2) e Schumacker-Hall, ambas com $R^2 = 0,95$ e $0,96$, respectivamente. Embora o desempenho de algumas equações tenha sido semelhante neste caso, a equação de Meyer se manteve entre as mais precisas, demonstrando consistência entre os diferentes tipos de fuste avaliados.

Além dos altos coeficientes de determinação, vale destacar que a equação de Meyer apresenta maior complexidade, incorporando mais variáveis em sua estrutura (até cinco coeficientes, dependendo do modelo). Essa complexidade pode contribuir

para uma representação mais acurada do comportamento volumétrico das árvores, principalmente em plantios com variações significativas na forma do fuste.

Assim, com base na análise dos dados apresentados, é evidente que a equação de Meyer demonstrou melhor desempenho geral para estimativa de volume, sendo a mais indicada para aplicações práticas nos diferentes ensaios, devido à sua alta acurácia, precisão e estabilidade entre os diferentes perfis de árvores testados. Esses resultados justificam plenamente sua escolha como modelo padrão de estimativa volumétrica neste estudo.

Tabela 3. Coeficientes para obtenção do Volume considerando diversas equações, para o PCB.

Equação	Coeficientes	R²
Hohenadl-kren	$\beta_0: -0,7538; \beta_1: 5,2501; \beta_2: 1,4099$	0,86
Spurr (Equação 1)	$\beta_1: 0,4370$	0,91
Spurr (Equação 2)	$\beta_0: 0,0546; \beta_1: 0,4178$	0,92
Spurr (Equação 3)	$\beta_0: 2,0783; \beta_1: 0,1950$	0,47
Stoate	$\beta_0: -0,2104; \beta_1: 0,0141; \beta_2: 2,6354; \beta_3: 0,2830$	0,92
Meyer	$\beta_0: 0,4123; \beta_1: -5,4569; \beta_2: -0,0071; \beta_3: -0,0910; \beta_4: -0,2009$	0,92
Berkhout	$\beta_0: 22,0711; \beta_1: 1,7153$	0,83
Husch	$\beta_0: 3,0943; \beta_1: 1,7153,$	0,83
Schumacker-Hall	$\beta_0: 2,8407; \beta_1: 1,6758; \beta_2: 0,0674$	0,83

Fonte: Própria autora.

Tabela 4. Coeficientes para obtenção do Volume do PCC2 considerando diversas equações, para o PCC2.

Equação	Coeficientes	R²
Hohenadl-kren	$\beta_0: 0,2727; \beta_1: -4,8598; \beta_2: 22,9544$	0,92
Spurr (Equação 1)	$\beta_1: 0,3813$	0,96
Spurr (Equação 2)	$\beta_0: -0,0515; \beta_1: 0,4061$	0,96
Spurr (Equação 3)	$\beta_0: -0,0300; \beta_1: 1,0566$	0,96
Stoate	$\beta_0: 0,0671; \beta_1: 0,0010; \beta_2: -6,0375; \beta_3: 0,5774$	0,97
Meyer	$\beta_0: 3,4591; \beta_1: -25,1165; \beta_2: -0,2517; \beta_3: 39,2835; \beta_4: -2,7952; \beta_5: 1,1863$	0,98
Berkhout	$\beta_0: 48,8248; \beta_1: 3,3491$	0,92
Husch	$\beta_0: 3,8882; \beta_1: 3,3491,$	0,92
Schumacker-Hall	$\beta_0: -1,2161; \beta_1: 2,0651; \beta_2: 1,0960$	0,96

Fonte: Própria autora.

Tabela 5. Coeficientes para obtenção do Volume do PCH considerando diversas equações, para o PCH.

Equação	Coeficientes	R ²
Hohenadl-kren	$\beta_0: -0,7538; \beta_1: 5,2501; \beta_2: 1,4099$	0,95
Spurr (Equação 1)	$\beta_1: 0,4370$	0,94
Spurr (Equação 2)	$\beta_0: 0,0546; \beta_1: 0,4178$	0,95
Spurr (Equação 3)	$\beta_0: 2,0783; \beta_1: 0,1950$	0,93
Stoate	$\beta_0: -0,2104; \beta_1: 0,0141; \beta_2: 2,6354; \beta_3: 0,2830$	0,97
Meyer	$\beta_0: 0,4123; \beta_1: -5,4569; \beta_2: -0,0071; \beta_3: -0,0910; \beta_4: -0,2009$	0,97
Berkhout	$\beta_0: 22,0711; \beta_1: 1,7153$	0,94
Husch	$\beta_0: 3,0943; \beta_1: 1,7153,$	0,94
Schumacker-Hall	$\beta_0: 2,8407; \beta_1: 1,6758; \beta_2: 0,0674$	0,96

Fonte: Própria autora.

3.3.2. Definição da equação para estimativa da resina

A equação ajustada para estimativa da produção de resina em indivíduos de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, com base nos dados obtidos por meio do método de perfuração em 2025, resultou no seguinte modelo de regressão linear múltipla:

$$Y = -1,23709 + 0,10253 \cdot ALT + 0,04831 \cdot dap - 0,98344 \cdot vol$$

O modelo apresentou um coeficiente de determinação (R²) de 0,321, indicando que aproximadamente 13,2% da variação observada na produção de resina foi explicada conjuntamente pelas variáveis ALT, DAP e VOL. Embora o valor de R² seja considerado baixo, o modelo fornece indícios de que características dendrométricas básicas podem ter influência na produção resinífera de *P. caribaea* var. *bahamensis*, especialmente a altura e o diâmetro, cujos coeficientes foram positivos.

3.3.3. Parâmetros Genéticos *Pinus caribaea* var. *bahamensis*

A Tabela 6 apresenta os parâmetros genéticos dos caracteres ALT, DAP, VOL e SOB, avaliados aos 11 anos (antes e após desbaste) e aos 35 anos de idade, do teste de progênies PCB. Aos 11 anos (antes do desbaste), a média de sobrevivência foi de 77%, com teste LRT = 0,34, indicando ausência de diferença significativa entre as

progênies nesse estágio (Tabela 6). Após o desbaste, ainda aos 11 anos, a sobrevivência aumentou para 95%, reforçando o bom desempenho das plantas após o desbaste seletivo. O LRT foi não significativo (0,15) confirmando que a variação entre progênies continuou não significativa. Aos 35 anos, observou-se uma redução acentuada na sobrevivência para 5%, reflexo da mortalidade acumulada ao longo do tempo. Nessa fase, o teste LRT = foi significativo (5,75) a 5%, revelando diferenças genéticas entre as progênies sobreviventes, possivelmente associadas à rusticidade e resistência a longo prazo.

A $\hat{h}_a^2$ aos 11 anos antes do desbaste foi relativamente baixa para ALT (0,06), moderada para DAP (0,19) e VOL (0,20), indicando influência significativa do ambiente sobre o fenótipo, especialmente para altura. Contudo, após o desbaste, observa-se um aumento em todas as herdabilidades: ALT (0,16), DAP (0,35) e VOL (0,35), sugerindo que a redução da competição entre plantas favoreceu a expressão do componente genético aditivo. E aos 35 anos, os valores são ainda mais expressivos: ALT (0,61), DAP (0,74) e VOL (0,75).

Missio *et al.* (2004a) realizaram estudos genéticos com *P. caribaea* var. *bahamensis* revelam parâmetros genéticos moderados a altos para características silviculturais importantes. As estimativas de herdabilidade ($\hat{h}_a^2$) foram de 0,12, 0,20 e 0,21 para ALT, DAP e VOL, respectivamente.

O CV_{gi} para VOL aumenta consideravelmente ao longo do tempo: 21,49% (11 anos), 23,51% (11-D), e atinge 68,04% aos 35 anos. Isso indica que há ampla variabilidade genética disponível na população para esse caráter. O coeficiente de variação experimental (CV_e), por outro lado, permanece em níveis aceitáveis, sendo 19,83% aos 11 anos, 17,73% após o desbaste e 22,26% aos 35 anos), conferindo confiabilidade aos dados.

O coeficiente de variação relativa (CV_r), que relaciona CV_{gi} e CV_e , mostra-se baixa para todos os caracteres e idades, com exceção do DAP e VOL, aos 35 anos, que foi 2,09 e 1,52 respectivamente. Segundo Resende (2002), valores de CV_r superiores a 1,0 indicam bom potencial de seleção.

A acurácia dos valores genéticos preditos (r_{aa}) foi alta para DAP e VOL nos três anos de avaliação, para o DAP aos 11 foi 0,7923, aumentou para 0,8515 após o desbaste, e atingiu 0,9814 para DAP aos 35 anos. Segundo Resende e Barbosa

(2005), acurácias superiores a 0,70 são desejáveis para decisões de seleção em programas de melhoramento florestal.

Os testes LRT revelam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) na maioria dos caracteres, especialmente DAP e VOL, tanto aos 11 anos como aos 35 anos.

Com base nesses parâmetros, o volume é o caráter com maior potencial para seleção, principalmente aos 35 anos, com herdabilidade alta (0,75), elevado CVgi (68,04%) e acurácia próxima de 1. Isso sugere que a seleção baseada nesse caráter poderá gerar respostas superiores ao longo das gerações, sendo prioritário em programas de melhoramento visando tanto madeira quanto resina, uma vez que o volume também está correlacionado positivamente com a capacidade de produção de resina (Santos *et al.*, 2016). Além disso, os altos valores de herdabilidade da média de progênies ($\hat{h}_m^2$) 0,9196 para ALT, 0,9814 para DAP e 0,9661 para VOL aos 35 anos indicam que é possível realizar seleção entre famílias com grande precisão, possibilitando a formação de pomares de sementes e base para clonagem.

Sebbenn *et al.* (2008) afirmam que *P. caribaea* Mor. var. *bahamensis* representa uma importante variedade tropical do complexo *Pinus caribaea*. com significativo potencial silvicultural para plantios comerciais. Esta variedade endêmica das Bahamas tem sido objeto de estudos genéticos extensivos para compreender seus parâmetros genéticos e otimização de estratégias de melhoramento florestal. A análise dos parâmetros genéticos e estatísticos demonstra que *Pinus caribaea* var. *bahamensis* apresenta excelente variabilidade genética, especialmente para VOL e DAP, reforçando o potencial da população para compor futuros ciclos de seleção. A adoção de avaliações aos 35 anos, associada ao uso de modelos mistos (REML/BLUP), permite maior acurácia e eficácia na seleção de genótipos superiores, conforme os princípios estabelecidos por Resende (2002). Portanto, recomenda-se priorizar o caráter volume nas estratégias de seleção, utilizando-se preferencialmente os dados após o desbaste e em idades mais avançadas.

Tabela 6. 'Estimativas de parâmetros estatísticos e genéticos para os caracteres: altura total das plantas (ALT), diâmetro a altura do peito (DAP) e volume (VOL) em um teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, em Selvíria-MS, aos 11, 11 com desbaste e 35 anos.

Estimativas	ALT 11 (m)	DAP 11 (m)	VOL 11 (m³arv⁻¹)	SOB 11 (%)	ALT 11-D (m)	DAP 11-D (m)	VOL 11-D (m³arv⁻¹)	SOB 11-D (%)	ALT 35 (m)	DAP 35 (m)	VOL 35 (m³arv⁻¹)	SOB 35 (%)
$\hat{\sigma}_g^2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51,25	0,45	-
$\hat{\sigma}_a^2$	0,1833	3,2442	0,0039	-	0,2086	5,0525	0,0065	-	7,5840	-	-	-
$\hat{\sigma}_c^2$	0,2369	0,3296	0,0004	-	0,3106	0,8550	0,0011	-	0,7699	2,9184	0,1382	-
$\hat{\sigma}_e^2$	2,5047	14,2730	0,0150	-	0,8017	8,3146	0,0106	-	3,9250	52,78	0,3459	-
$\hat{\sigma}_f^2$	2,9250	18,1496	0,0193	-	1,3210	14,2222	0,0184	-	12,2790	106,9658	0,9414	-
$\hat{h}_a^2$	0,06±0,02	0,19±0,04	0,20±0,04	-	0,16±0,04	0,35±0,07	0,35±0,07	-	0,61±0,42	0,74±0,29	0,75±0,29	-
$\hat{h}_{aj}^2$	0,07	0,20	0,20	-	0,20	0,37	0,38	-	0,65	-	-	-
$\hat{C}_p^2$	0,0809	0,0181	0,0181	-	0,2351	0,0601	0,0621	-	0,0627	0,0272	0,1468	-
$\hat{h}_m^2$	0,28	0,6278	0,6379	-	0,3995	0,7251	0,7249	-	0,8274	0,9633	0,9333	-
r_{aa}	0,5373	0,7923	0,7987	-	0,6321	0,8515	0,8514	-	0,9096	0,9814	0,9661	-
$\hat{h}_{ad}^2$	0,05	0,16	0,1640	-	0,1633	0,3130	0,3162	-	0,5916	0,5461	0,7435	-
CV_{gi} (%)	2,50	9,37	21,49	-	2,56	10,34	23,51	-	8,83	37,89	68,04	-
CV_{gp} (%)	1,25	4,68	10,74	-	1,28	5,17	11,75	-	4,41	18,94	34,02	-
CV_e (%)	4,80	8,44	19,83	-	3,85	7,79	17,73	-	4,94	9,05	22,26	-
CV_r	0,26	0,53	0,54	-	0,33	0,66	0,66	-	0,89	2,09	1,52	-
$\hat{m}$	17,12	20,07	0,29	77,5	17,81	21,73	0,34	95,0	31,15	37,78	1,98	5,0
LRT(χ^2)	4,2*	41,62**	43,49**	0,34 ^{ns}	8,12**	48,89**	49,24**	0,15 ^{ns}	1,04 ^{ns}	7,26**	6,33*	5,75*

Nota: *significativo a 5%, com 1 grau de liberdade; **significativo a 1%, com 1 grau de liberdade; ^{ns}não significativo; $\hat{\sigma}_a^2$ variância genética aditiva; $\hat{\sigma}_c^2$ variância ambiental entre parcelas; $\hat{\sigma}_e^2$ variância residual (ambiental+não aditiva); $\hat{\sigma}_f^2$ variância fenotípica individual; $\hat{h}_a^2$ herdabilidade individual dos efeitos aditivos; $\hat{h}_{aj}^2$ herdabilidade individual ajustada para os efeitos de parcela; $\hat{C}_p^2$ coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas; $\hat{h}_m^2$ herdabilidade da média de progênies; r_{aa} acurácia; $\hat{h}_{ad}^2$ herdabilidade aditiva dentro de parcela; CV_{gi} coeficiente de variação genética aditiva individual; CV_{gp} coeficiente de variação genotípica entre progênies; CV_e coeficiente de variação experimental; CV_r coeficiente de variação relativa; $\hat{m}$ média geral; LRT: Teste da razão de verossimilhança; χ^2 qui-quadrado da deviance. Fonte: Própria autora.

3.3.4. Parâmetros Genéticos Silviculturais *Pinus caribaea* var. *caribaea*

O teste de progênies de PCC2 também foi avaliado em três diferentes momentos: aos 11 anos, aos 11 anos com desbaste, e aos 36 anos. Aos 11 anos (antes do desbaste), a taxa de sobrevivência foi de 77%, com LRT = 23,10. Após o desbaste, ainda aos 11 anos, a sobrevivência atingiu 96%, representando o segundo maior índices de sobrevivência observados entre todos os experimentos. O LRT foi significativo (72,76), reforçando a hipótese de diferenças potenciais entre progênies. Aos 36 anos, a sobrevivência foi de 70%, indicando boa resistência ao longo do tempo. O LRT = 8,95 foi significativo a 5%, confirmando existência de variabilidade genética entre as progênies remanescentes quanto à capacidade de sobrevivência em longo prazo (Tabela 7).

As herdabilidades individuais dos efeitos aditivos ($\hat{h}_a^2$), aos 11 anos foram baixas para ALT (0,06) e DAP (0,02), e moderada para VOL (0,07). Após o desbaste, houve aumento apenas para DAP (0,09), sugerindo que a redução da competição entre árvores contribui para maior expressão do componente genético de caractere Tabela 13. A $\hat{h}_m^2$ apresentou comportamento distinto e mais otimista, atingindo 0,31 para DAP e VOL aos 36 anos, porém o DAP foi que apresentou maior $\hat{h}_m^2$ em todos os anos de avaliação. Esse resultado sugere maior estabilidade e consistência na expressão genética desses caracteres ao longo do tempo, especialmente para o DAP, que obteve os maiores valores de $\hat{h}_m^2$ em todas as avaliações. Esses dados indicam que, em nível de média progênies, a variabilidade genética aditiva está mais claramente expressa, sobretudo em idades mais avançadas. Tambarussi *et al.* (2010) obteve as estimativas de coeficientes de herdabilidade em nível individual relativamente altas (0,28 para DAP e 0,44 para ALT), com coeficiente de herdabilidade considerando a média de famílias também altas, variando entre 0,50 e 0,58.

O coeficiente de variação genética aditiva individual (CV_{gi}) para VOL aumentou com a idade: de 3,45% (11 anos) para 9,99% (36 anos), indicando maior expressão da variabilidade genética ao longo do tempo. O CV_e para VOL, por sua vez, diminuiu de 17,02% aos 11 anos para 12,70% aos 36 anos (o que é uma redução positiva), sugerindo maior estabilidade experimental e uma boa precisão da avaliação dos dados na avaliação tardia. Já o CV_r , manteve-se abaixo de 1,0 para todos os

caracteres e idades (máximo de 0,39 para VOL aos 36 anos), o que indica baixa precisão relativa e uma variabilidade ambiental maior.

A r_{aa} variou de baixa (0,1039 ALT-D) a moderada (0,5633). O teste da razão de verossimilhança (LRT) apresentou significância para todos os caracteres em todos os anos, indicando presença de variabilidade genética entre progênies, com exceção do VOL em 2025, que não apresentou diferença estatística entre progênies (1,95).

As médias gerais de DAP e VOL aumentaram significativamente com o tempo, com DAP passando de 21,94 cm (11 anos) para 34,46 cm (36 anos), e volume de 0,33 m³.arv⁻¹ para 1,52 m³.arv⁻¹, indicando um ótimo crescimento contínuo das árvores, apresentando aumento mesmo após o desbaste. Esse crescimento é esperado, mas não se refletiu em aumento proporcional da herdabilidade, o que reforça que a expressão fenotípica aos 36 anos está mais sujeita à influência de competição.

Os resultados da Tabela 7 indicam que o teste de progênies de *P. caribaea* var. *caribaea* apresenta potencial genético limitado sob as condições de Selvíria-MS, com baixa herdabilidade individual e acurácia. No entanto, o manejo com desbaste aos 11 anos permitiu melhor expressão genética, especialmente para o DAP, e aumentou a variabilidade detectável entre progênies. Para o melhoramento, a seleção entre famílias, em vez da individual, é mais indicada, sobretudo com foco no caráter volume, que demonstrou maior estabilidade genética ao longo do tempo.

Tabela 7. Estimativas de parâmetros estatísticos e genéticos para os caracteres: altura total das plantas (ALT), diâmetro a altura do peito (DAP) e volume (VOL) em um teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, em Selvíria-MS, aos 11, 11 com desbaste e 36 anos.

Estimativas	ALT 12 (m)	DAP 12 (m)	VOL 12 (m³arv⁻¹)	SOB12 (%)	ALT 12-D (m)	DAP 12-D (m)	VOL 12-D (m³arv⁻¹)	SOB12-D (%)	ALT 36 (m)	DAP 36 (m)	VOL 36 (m³arv⁻¹)	SOB36 (%)
$\hat{\sigma}_g^2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\hat{\sigma}_a^2$	0,027	0,4843	0,0001	-	0,0214	1,2301	0,0003	-	0,1001	3,8011	0,0231	-
$\hat{\sigma}_c^2$	1,1543	0,8704	0,0014	-	1,2734	1,3848	0,0024	-	2,9289	3,0079	0,0118	-
$\hat{\sigma}_e^2$	3,5826	16,2766	0,0184	-	1,9963	10,3888	0,0148	-	12,2344	28,3909	0,2381	-
$\hat{\sigma}_f^2$	4,7644	17,6314	0,0200	-	3,2912	13,003	0,0176	-	15,2636	35,2000	0,2732	-
$\hat{h}_a^2$	0,06±0,	0,02±0,02	0,07±0,01	-	0,07±0,01	0,09±0,04	0,01±0,02	-	0,01±0,01	0,10±0,05	0,08±0,05	-
$\hat{h}_{aj}^2$	0,007	0,02	0,06	-	0,01	0,10	0,02	-	0,01	0,11	0,08	-
$\hat{C}_p^2$	0,2422	0,0493	0,0724	-	0,3869	0,1064	0,1401	-	0,1918	0,08	0,04	-
$\hat{h}_m^2$	0,01	0,12	0,02	-	0,01	0,26	0,05	-	0,01	0,31	0,31	-
r_{aa}	0,1156	0,3540	0,1731	-	0,1039	0,5179	0,2352	-	0,1332	0,5633	0,5629	-
$\hat{h}_{ad}^2$	0,06	0,02	0,06	-	0,01	0,08	0,01	-	0,01	0,09	0,06	-
CV_{gi} (%)	0,99	0,31	3,45	-	0,85	4,82	0,47	-	1,11	5,65	9,99	-
CV_{gp} (%)	0,49	1,58	1,72	-	0,42	2,41	2,38	-	0,55	2,82	4,99	-
CV_e (%)	0,74	7,25	17,02	-	7,10	6,90	17,03	-	7,16	7,18	12,70	-
CV_r	0,06	0,21	0,10	-	0,06	0,34	0,13	-	0,07	0,39	0,39	-
$\hat{m}$	16,64	21,94	0,33	70,0	17,08	22,98	0,37	96,0	28,48	34,46	1,52	70,0
LRT(χ^2)	191,62**	10**	22,53**	23,1	248,15**	19,66**	32,75**	72,76	41,11**	7,89**	1,95 ^{ns}	8,95**

Nota: *significativo a 5%, com 1 grau de liberdade; **significativo a 1%, com 1 grau de liberdade; ^{ns}não significativo; $\hat{\sigma}_a^2$ variância genética aditiva; $\hat{\sigma}_c^2$ variância ambiental entre parcelas; $\hat{\sigma}_e^2$ variância residual (ambiental+não aditiva); $\hat{\sigma}_f^2$ variância fenotípica individual; $\hat{h}_a^2$ herdabilidade individual dos efeitos aditivos; $\hat{h}_{aj}^2$ herdabilidade individual ajustada para os efeitos de parcela; $\hat{C}_p^2$ coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas; $\hat{h}_m^2$ herdabilidade da média de progênies; r_{aa} acurácia; $\hat{h}_{ad}^2$ herdabilidade aditiva dentro de parcela; CV_{gi} coeficiente de variação genética aditiva individual; CV_{gp} coeficiente de variação genotípica entre progênies; CV_e coeficiente de variação experimental; CV_r coeficiente de variação relativa; $\hat{m}$ média geral; LRT: Teste da razão de verossimilhança; χ^2 qui-quadrado da deviance. Fonte: Própria autora.

3.3.5. Parâmetros Genéticos Silviculturais *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

A avaliação do *P. caribaea* var. *hondurensis* foi realizada também em três situações, aos 11 anos, aos 11 anos com desbaste, e aos 39 anos. Aos 12 anos (antes do desbaste), a média de sobrevivência foi de 91%, com $LRT = 2,05$, indicando homogeneidade entre progênies quanto à sobrevivência nesse estágio. Após o desbaste, ainda aos 12 anos, a sobrevivência aumentou para 98%, a mais alta observada entre todos os experimentos. O $LRT = 0,20$ reforça que não houve diferenças significativas entre as progênies nesse momento. Aos 39 anos, houve redução da sobrevivência para 29%, ainda assim maior que a observada para *bahamensis*. O $LRT = 8,03$ foi significativo, sugerindo variabilidade genética associada à longevidade e resistência das progênies.

Após o desbaste, a herdabilidade de VOL aumentou para 0,25, (Tabela 8) indicando maior expressão genética do caráter em função da redução da competição. Aos 39 anos, os valores de herdabilidade individual diminuiu para ALT (0,02), mas aumentaram para DAP (0,31) e VOL (0,47), revelando maior controle genético destes dois últimos caracteres em idades tardias. Esse comportamento sugere que o volume é o caráter com maior estabilidade genética ao longo do tempo, sendo o mais indicado para seleção indireta de produtividade.

A $\hat{h}_m^2$ permaneceu alta, apresentou valores próximos aos 12 anos e 12 anos após o desbaste, indicando elevada precisão na seleção entre famílias, e maiores valores aos 39 anos, especialmente volume que apresentou 0,70 (Tabela 8). O CV_{gi} apresentou os maiores valores para VOL em todas as idades (9,91% aos 12 anos, 9,13% com desbaste, e 12,87% aos 39 anos), reforçando a alta variabilidade genética disponível para este caráter. Já o CV_e para VOL permaneceu relativamente alto, mas estável, indicando um bom controle experimental, com valores entre 14,51% (39 anos) e 19,23% (11 anos). Missio *et al.* (2004a) encontraram herdabilidades para VOL e DAP entre de 0,12 a 0,21, refletindo um potencial genético suficiente para a obtenção de ganhos significativos na seleção e aumento da eficiência genética dos programas. Por sua vez, Tambarussi *et al.* 2010 estudos mais abrangentes com progênies encontraram herdabilidades médias para caracteres de crescimento entre 0,25 e 0,44, demonstrando que a seleção pode ser realizada com sucesso a partir dessas bases

genéticas, especialmente utilizando métodos estatísticos sólidos para reduzir o impacto ambiental (TAMBARUSSI *et al.* 2010).

O CV_r atingiu seu maior valor para VOL aos 39 anos (0,88), valor considerado excelente, conforme critérios de Resende (2002), que define $CV_r > 1$ como altamente desejável, mas aceita CV_r entre 0,5 e 1 como indicativo de boa precisão experimental. Porém o CV_r para VOL evoluiu positivamente com o tempo: 0,51 (12 anos), 0,50 (12 anos com desbaste) até chegar em 0,88 (34 anos).

Os LRT confirmaram a existência de variabilidade genética significativa entre as progênies, especialmente aos 12 anos, quando apresentou valores significativos a 1% com 1 grau de liberdade, para todos os caracteres silviculturais. Embora os valores tenham diminuído aos 34 anos, que não foi significativo para altura (0,02).

Os resultados obtidos no teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* destacam o caráter volume como o principal alvo para seleção. A elevada herdabilidade das médias de progênies valores consideráveis de acurácia reforçam o potencial do material genético avaliado para compor bases de melhoramento.

Tabela 8. Estimativas de parâmetros estatísticos e genéticos para os caracteres: altura total das plantas (ALT), diâmetro a altura do peito (DAP) e volume (VOL) em um teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, em Selvíria-MS, aos 12, 12 com desbaste e 39 anos.

Estimativas	ALT 12 (m)	DAP 12 (m)	VOL 12 (m ³ arv ⁻¹)	SOB12 (%)	ALT 12-D (m)	DAP 12-D (m)	VOL 12-D (m ³ arv ⁻¹)	SOB 12-D (%)	ALT 39 (m)	DAP 39 (m)	VOL 39 (m ³ arv ⁻¹)	SOB39 (%)
$\hat{\sigma}_g^2$	-	-	-	-	0,4712	-	-	-	-	-	-	-
$\hat{\sigma}_a^2$	2,0845	3,3844	0,0072	-	-	2,3977	0,0080	-	0,5013	11,87	0,21	-
$\hat{\sigma}_c^2$	1,7482	0,8559	0,0033	-	2,1830	1,4162	0,0054	-	7,5417	2,98	0,03	-
$\hat{\sigma}_e^2$	4,7538	17,3738	0,02891	-	2,2879	10,0056	0,0187	-	13,66	22,56	0,20	-
$\hat{\sigma}_f^2$	8,5865	21,61	0,0394	-	4,9412	13,8196	0,0322	-	21,70	37,41	0,45	-
$\hat{h}_a^2$	0,24±0,05	0,15±0,04	0,18±0,04	-	0,13±0,03	0,17±0,05	0,25±0,06	-	0,02±0,03	0,31±0,14	0,47±0,17	-
$\hat{h}_{aj}^2$	0,30	0,16	0,19	-	-	0,19	0,30	-	0,03	0,34	0,51	-
$\hat{C}_p^2$	0,2036	0,0396	0,0845	-	0,4418	0,1024	0,1689	-	0,3474	0,0796	0,0071	-
$\hat{h}_m^2$	0,39	0,47	0,44	-	0,36	0,40	0,43	-	0,52	0,59	0,70	-
r_{aa}	0,6296	0,6865	0,6662	-	0,6074	0,6396	0,6579	-	0,2008	0,7696	0,8381	-
$\hat{h}_{ad}^2$	0,24	0,12	0,15	-	0,09	0,15	0,24	-	0,02	0,28	0,44	-
CV_{gi} (%)	7,06	8,29	19,83	-	6,40	6,53	18,26	-	2,08	9,77	25,74	-
CV_{gp} (%)	3,53	4,14	9,91	-	3,20	3,26	9,13	-	1,04	4,88	12,87	-
CV_e (%)	7,55	7,60	19,23	-	7,26	6,79	18,11	-	8,80	7,02	14,51	-
CV_r	0,46	0,54	0,51	-	0,44	0,48	0,50	-	0,11	0,69	0,88	-
$\hat{m}$	20,42	22,18	0,42	91,0	21,38	23,71	0,49	98,0	33,96	35,24	1,81	29,0
LRT(χ^2)	207,04**	13,03**	11,12**	2,05 ^{ns}	207,04**	5,96*	7,89*	0,2 ^{ns}	0,02 ^{ns}	3,94*	7,6**	8,03

Nota: *significativo a 5%, com 1 grau de liberdade; **significativo a 1%, com 1 grau de liberdade; ^{ns}não significativo; $\hat{\sigma}_a^2$ variância genética aditiva; $\hat{\sigma}_c^2$ variância ambiental entre parcelas; $\hat{\sigma}_e^2$ variância residual (ambiental+não aditiva); $\hat{\sigma}_f^2$ variância fenotípica individual; $\hat{h}_a^2$ herdabilidade individual dos efeitos aditivos; $\hat{h}_{aj}^2$ herdabilidade individual ajustada para os efeitos de parcela; $\hat{C}_p^2$ coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas; $\hat{h}_m^2$ herdabilidade da média de progênies; r_{aa} acurácia; $\hat{h}_{ad}^2$ herdabilidade aditiva dentro de parcela; CV_{gi} coeficiente de variação genética aditiva individual; CV_{gp} coeficiente de variação genotípica entre progênies; CV_e coeficiente de variação experimental; CV_r coeficiente de variação relativa; $\hat{m}$ média geral; LRT: Teste da razão de verossimilhança; χ^2 qui-quadrado da deviance. Fonte: Própria autora.

3.3.4 Tamanho efetivo das populações

O teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* (TP-PCB) foi instalado com 121 tratamentos, mas com 119 progênies, seis repetições e seis plantas por parcela, o que dá um total de plantas no TP-PCB de 4284 (Tabela 9), no momento da instalação. O tamanho efetivo (N_e) da população de *P. caribaea* var. *bahamensis* em quatro momentos distintos são: instalação (1990), antes do desbaste (2000), após o desbaste (2000) e em 2025. Inicialmente, a população apresentava 4284 indivíduos (TPtp), com média de 36 plantas por família (Kfm) e variância nula ($VAR_{kfm} = 0$), refletindo uma estrutura altamente balanceada. Nesse contexto, o N_e inicial foi de 439, valor considerado alto e satisfatório tanto para fins de conservação quanto para melhoramento.

Contudo, ao longo do tempo, observa-se uma redução progressiva de N_e , onde aos 10 anos após o plantio o TP-PCB estava com 3302 plantas (o que dá uma perda de 23%), ou seja, caindo para 429 antes do desbaste e 403 após o desbaste. Essa redução é acompanhada de um aumento na variância do número de indivíduos por família ($VAR_{kfm} = 11,85$), revelando desequilíbrio entre as contribuições familiares, o que reduz a diversidade genética efetiva ($D = 0,98-0,99$). Do décimo ano aos dias atuais (2025) o TP-PCB ficou com 110 plantas, o que corresponde a uma perda de 97,4% em relação ao que foi instalado, e o N_e despenca para 84. O mesmo raciocínio vale para o número médio de plantas por parcela (NMpp), número médio do número de plantas por progênies (Kfm) e ao número de famílias (Nfam).

No entanto, com o passar dos anos o N_e está em 68 e a divergência genética ($D = 0,42$), o que indica que foi perdida 58% em relação a inicial ($D = 1$). Desse modo, pode ser considerado uma conservação genética em médio prazo, considerando que N_e de 50 é de curto prazo, de 50 a 150 de médio prazo e maior que 150 de longo prazo (Sebbenn, 2002, 2003). A redução de N_e de 119 para apenas 50 famílias confirma esse quadro. Segundo Sebbenn (2002), o desequilíbrio na contribuição entre famílias e a redução do número efetivo de famílias levam à diminuição do N_e , aumentando a endogamia e a deriva genética.

Tabela 9. Tamanho efetivo *Pinus caribaea* var. *bahamensis* em quatro momentos.

Parâmetro	Instalação (1990)	Antes do Desbaste (2000)	Após o Desbaste (2000)	Atual (2025)
TP_{tp}	4284	3302	2043	110
NM_{pp}	6	4,78	2,95	1,08
K_{fm}	36	27,74	17,16	1,62
$VAR_{K_{fm}}$	0	11,85	1,51	0,96
Nf_{am}	119	119	119	68
Ne	439	429	403	84
Nfo	119	119	119	119
$(\sum K_f)^2$	18352656	10903204	4173849	12100
$\sum K_f^2$	154224	93022	35253	242
N_{ef}	119	117,21	118,39	50,00
D	1	0,98	0,99	0,42

Nota: TP_{tp} : total de plantas no teste de progênies por ocasião de plantio desconsiderando as testemunhas; NM_{pp} : número médio de plantas por parcela; K_{fm} : número médio do número de plantas por família (progênie); $VAR_{K_{fm}}$: variância do número médio de plantas por família (progênie); Nf_{am} : número atual de famílias; Ne : tamanho efetivo ou status number; Nfo : número original de famílias; $(\sum K_f)^2$: quadrado da somatória do número de indivíduos por família; $\sum K_f^2$: somatória do quadrado do número de indivíduos por família; N_{ef} : número efetivo de famílias selecionadas ou existentes atual; D : diversidade genética. Fonte: Própria autora.

A trajetória do Ne da população de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, instalada em 1986 é de Ne de 349, com 2880 indivíduos e uma média de 30 plantas por família (K_{fm}). Assim, o Ne sai de 349 para um $D = 1,0$ em 1986 e chega em 2025, 39 anos após a sua instalação, com um Ne de 84 (Tabela 10), com uma perda da diversidade genética inicial, diminuindo de 1 para 0,42 podendo a base genética atual ser considerada como de longo prazo. Essa redução pode ser explicada tanto pela diminuição da quantidade de indivíduos quanto pela perda de equilíbrio entre as famílias. A baixa representatividade familiar é evidenciada pelo número efetivo de famílias (N_{ef}), que caiu de 96 para 50.

Tabela 10. Tamanho efetivo *Pinus caribaea* var. *hondurensis* em quatro momentos.

Parâmetro	Instalação (1986)	Antes do Desbaste (1998)	Após o Desbaste (1998)	Atual (2025)
TP_{tp}	2880	2643	1699	504
NM_{pp}	10	9,2	5,9	1,8
K_{fm}	30	27,5	17,7	5,3
$VAR_{K_{fm}}$	0	3,48	0,49	8,00
Nf_{am}	96	96	96	96
Ne	349	345	328	206
N_{fo}	96	96	96	96
$(\sum K_f)^2$	8294400	6985449	2886601	254016
$\sum K_f^2$	86400	73091	30115	3406
N_{ef}	96	95,6	95,9	74,6
D	1	0,996	0,998	0,777

Nota: TP_{tp} : total de plantas no teste de progênies por ocasião de plantio desconsiderando as testemunhas; NM_{pp} : número médio de plantas por parcela; K_{fm} : número médio do número de plantas por família (progênie); $VAR_{K_{fm}}$: variância do número médio de plantas por família (progênie); Nf_{am} : número atual de famílias; Ne : tamanho efetivo ou status number; N_{fo} : número original de famílias; $(\sum K_f)^2$: quadrado da somatória do número de indivíduos por família; $\sum K_f^2$: somatória do quadrado do número de indivíduos por família; N_{ef} : número efetivo de famílias selecionadas ou existentes atual; D : diversidade genética. Fonte: Própria autora.

No teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *caribaea* 2 (TP-PCC2) a tendência foi a semelhante aos anteriores. A população de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, instalada em 1990 com 3000 indivíduos e 100 famílias, apresentou um Ne inicial de 364, valor similar ao das demais variedades. No entanto, diferentemente de *bahamensis* e *hondurensis*, o Ne manteve-se relativamente estável ao longo do tempo: 345 antes do desbaste, 330 após e 300 em 2025 (Tabela 11). Portanto, a queda para o Ne foi de 17,6% e a diversidade de apenas 19%. Dessa forma, a conservação genética existente pode ser considerada de longo prazo.

Mesmo com reduções no número total de plantas (TP_{tp} = 1065 em 2025), o Ne manteve-se alto, assim como o número efetivo de famílias (N_{ef} = 96,68) e a diversidade genética (D = 0,81). Isso pode ser atribuído à menor variância entre famílias ($VAR_{K_{fm}}$ = 3,92) e à preservação do equilíbrio amostral. O *Pinus caribaea* var. *caribaea* demonstra maior estabilidade genética, robustez estrutural e menor

impacto do desbaste sobre os parâmetros populacionais, o que a diferencia positivamente das outras duas variedades.

Tabela 11. Tamanho efetivo *Pinus caribaea* var. *caribaea* 2 em quatro momentos.

Parâmetro	Instalação (1990)	Antes do Desbaste (2000)	Após o Desbaste (2000)	Atual (2025)
$TPtp$	3000	2125	1452	1065
$NMpp$	10	6,56	4,74	3,44
K_{fm}	30	21,2500	14.2857	10.6500
$VAR_{K_{fm}}$	0	8,3914	1.2381	3.9268
Nf_{am}	100	100	100	100
N_e	364	345	330	300
N_{fo}	100	100	100	100
$(\sum K_f)^2$	9000000	4515625	2108304	1134225
$\sum K_f^2$	90000	45987	21188	11731
N_{ef}	100	98,19	99,50	96,68
D	1	0,82	0,83	0,81

Nota: $TPtp$: total de plantas no teste de progênies por ocasião de plantio desconsiderando as testemunhas; $NMpp$: número médio de plantas por parcela; K_{fm} : número médio do número de plantas por família (progênie); $VAR_{K_{fm}}$: variância do número médio de plantas por família (progênie); Nf_{am} : número atual de famílias; N_e : tamanho efetivo ou status number; N_{fo} : número original de famílias; $(\sum K_f)^2$: quadrado da somatória do número de indivíduos por família; $\sum K_f^2$: somatória do quadrado do número de indivíduos por família; N_{ef} : número efetivo de famílias selecionadas ou existentes atual; D : diversidade genética. Fonte: Própria autora.

A situação atual dos três teste de *Pinus* tropicais instalados em Selvíria-MS, que o TP-PCC2 e TP-PCH tem uma base genética que se permite trabalhar em longo prazo. No entanto, a situação do TP-PCB é preocupante, pois está próxima de uma conservação genética em curto prazo, o que se recomenda um resgate imediato no TP-PCB para a formação de um Pomar de Sementes Clonal.

3.3.6 Parâmetros Genéticos Volume e Resina em Testes de Progênes de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *bahamensis*.

A herdabilidade individual dos efeitos aditivos ($\hat{h}_a^2$) foi moderada para o volume ($0,39 \pm 0,09$), e relativamente baixa para a resina ($0,27 \pm 0,07$), sugerindo que, no caso da produção de resina, o controle genético é mais influenciado por fatores não aditivos ou ambientais.

A acurácia seletiva (r_{aa}) teve valores bastante satisfatórios: 0,7891 para volume e 0,7952 para resina (Tabela 12). Esses índices indicam boa precisão nas estimativas dos valores genéticos dos indivíduos, o que respalda decisões de seleção baseadas nesses dados. A herdabilidade da média de progênes ($\hat{h}_m^2$), que é relevante em programas de melhoramento que atuam na seleção entre famílias, foi elevada tanto para volume (0,62) quanto para resina (0,63), sugerindo que a seleção entre progênes pode ser eficiente.

Os coeficientes de variação genética individual (CVgi) e entre progênes (CVgp) reforçam o bom potencial de resposta à seleção para ambas as características. O CVgi foi de 28,28% para volume e 25,17% para resina, enquanto o CVgp foi de 14,14% e 12,58%, respectivamente. Além disso, o teste LRT revelou significância estatística para os efeitos genéticos aditivos nos dois caracteres, com $\chi^2 = 19,11$ (volume) e 16,3 (resina), ambos significativos a 1% e 5%, respectivamente. Esses resultados reforçam a existência de variabilidade genética significativa, condição essencial para o sucesso do melhoramento.

Na análise do ranqueamento das árvores mais produtivas, para o volume, destacam-se as famílias 51, 58 e 86, ocupando as três primeiras posições. Já para a produção de resina, a família 7 obteve o melhor desempenho seguida pelas famílias 8 e 42. Chama a atenção o fato de algumas famílias apresentarem bom desempenho em ambos os caracteres, como a família 8, que aparece em 7º lugar em volume e 2º em resina, e a família 73, que figura em 6º lugar em volume e 10º em resina, e 84 que ocupa o 9º lugar para volume e 7º em resina. Essa coincidência de destaque em diferentes características sugere potencial de uso dessas famílias em programas de seleção combinada, visando produtividade e conservação do material genético.

Em síntese, os resultados de 2013 para *hondurensis* revelam um cenário promissor para o melhoramento genético, com herdabilidades moderadas a altas, boa acurácia, ampla variabilidade genética e famílias com desempenho consistente em

múltiplos caracteres. O caráter volume, no entanto, se destaca como mais responsivo à seleção, o que pode direcionar estratégias de melhoramento baseadas em produtividade primária de madeira. Isso sugere que essas famílias apresentam estabilidade fenotípica e genotípica, sendo candidatas ideais para a condução de um programa de seleção recorrente ou mesmo para compor populações de base para futuros cruzamentos, como um pomar de sementes clonal (PSM).

Tabela 12. Volume e Produção de Resina extraída em painel com ranqueamento das 10 árvores mais produtivas avaliadas em um teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* em 2013.

Estimativas	VOL (m ³ ha ⁻¹ arv ⁻¹)	RES (Kg)	VOL	FAM	a	RES	FAM	a
$\hat{\sigma}_g^2$	-	-	1	51	0,9540	1	7	2,3881
$\hat{\sigma}_a^2$	0,1761	1,4844	2	58	0,6829	2	8	1,7803
$\hat{\sigma}_c^2$	0,0447	0,1557	3	86	0,5508	3	42	1,7087
$\hat{\sigma}_e^2$	0,2206	3,7815	4	39	0,5489	4	80	1,5506
$\hat{\sigma}_f^2$	0,4415	5,4236	5	91	0,5251	5	94	1,5497
$\hat{h}_a^2$	0,39±0,09	0,27±0,07	6	73	0,4082	6	43	1,2659
$\hat{h}_{aj}^2$	0,44	0,28	7	8	0,3896	7	84	1,1414
$\hat{C}_p^2$	0,1013	0,0290	8	24	0,3803	8	30	1,0959
$\hat{h}_m^2$	0,62	0,63	9	84	0,3790	9	91	1,0394
r_{aa}	0,7891	0,7952	10	70	0,3653	10	73	0,9826
$\hat{h}_{ad}^2$	0,37	0,22	$r_5 = 0,26$					
CV_{gi} (%)	28,28	25,17						
CV_{gp} (%)	14,14	12,58						
CV_e (%)	19,06	16,62						
CV_r	0,74	0,75						
$\hat{m}$	1,48	4,84						
LRT(χ^2)	19,11**	16,3*						

Nota: *significativo a 5%, com 1 grau de liberdade; **significativo a 1%, com 1 grau de liberdade; ns não significativo; $\hat{\sigma}_a^2$ variância genética aditiva; $\hat{\sigma}_c^2$ variância ambiental entre parcelas; $\hat{\sigma}_e^2$ variância residual (ambiental+não aditiva); $\hat{\sigma}_f^2$ variância fenotípica individual; $\hat{h}_a^2$ herdabilidade individual dos efeitos aditivos; $\hat{h}_{aj}^2$ herdabilidade individual ajustada para os efeitos de parcela; $\hat{C}_p^2$ coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas; $\hat{h}_m^2$ herdabilidade da média de progênies; r_{aa} acurácia; $\hat{h}_{ad}^2$ herdabilidade aditiva dentro de parcela; CV_{gi} coeficiente de variação genética aditiva individual; CV_{gp} coeficiente de variação genotípica entre progênies; CV_e coeficiente de variação experimental; CV_r coeficiente de variação relativa; $\hat{m}$ média geral; LRT: Teste da razão de verossimilhança; χ^2 qui-quadrado da deviance. Fonte: Própria autora.

A herdabilidade individual dos efeitos aditivos ($\hat{h}_a^2$) foi de $0,47 \pm 0,17$ para o volume e $0,31 \pm 0,14$ para a resina. Isso representa um aumento em relação aos valores de 2013 (0,39 e 0,27, respectivamente), sinalizando um ambiente mais favorável à expressão genética e maior precisão nas estimativas fenotípicas. A acurácia seletiva (r_{aa}) também apresentou valores elevados: 0,8381 para volume e 0,7720 para resina (tabela 19), ambos superiores aos valores observados em 2013, confirmando maior segurança nas seleções individuais.

Outro ponto de destaque é a herdabilidade da média de progênies ($\hat{h}_m^2$), que atingiu 0,70 para o volume — um valor considerado excelente — e 0,60 para a resina (Tabela 13). Ambos os índices indicam forte controle genético nas médias familiares, favorecendo a seleção entre progênies e o uso dessas famílias como base para populações elite.

Os coeficientes de variação genética aditiva individual (CVgi) foram de 25,74% para o volume e apenas 11,26% para a resina. Embora o volume continue demonstrando variabilidade genética robusta, a resina apresenta um valor mais modesto, o que limita o potencial de resposta à seleção direta para esse caráter. Já os coeficientes de variação genotípica entre progênies (CVgp) reforçam essa leitura, com valores de 12,87% para o volume e 5,63% para a resina. Vale notar que o coeficiente de variação experimental (CVe%) também foi menor em 2025 para ambas as características (14,51% para volume e 8,03% para resina), indicando maior homogeneidade e precisão no experimento.

A significância estatística observada pelo teste da razão de verossimilhança (LRT) foi mantida para o volume ($\chi^2 = 7,6$; significativo a 1%), enquanto a produção de resina não apresentou significância estatística em 2025 ($\chi^2 = 3,82$).

A análise do ranqueamento das árvores revela dados notavelmente consistentes com os de 2013, evidenciando estabilidade genética ao longo do tempo. A família 51, por exemplo, ocupa o 1º lugar tanto em volume quanto em resina em 2025, e já figurava no topo da lista de volume em 2013. A família 73, igualmente destacada, aparece em 2º lugar nas duas características, também mantendo desempenho excelente ao longo dos anos. Essa coincidência de ranqueamento sugere elevada correlação genética entre os caracteres e estabilidade genotípica, tornando essas famílias candidatas prioritárias à seleção.

Outras famílias que demonstraram bom desempenho incluem a 39, 86 e 24. A família 86, por exemplo, manteve-se entre as cinco melhores para volume nos dois anos, reforçando sua importância como material genético de alto valor.

Em resumo, os resultados de 2025 para a variedade *hondurensis* consolidam o volume como o caráter de maior consistência genética e resposta à seleção, com alta herdabilidade, acurácia e repetição de famílias de destaque.

Tabela 13. Estimativas de volume e produção de resina em painel, com ranqueamento das 10 árvores mais produtivas avaliadas em um teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para 2025.

Estimativas	VOL (m ³ ha ⁻¹ arv ⁻¹)	RES (Kg)	VOL	FAM	a	RES	FAM	a
$\hat{\sigma}_g^2$	-	-	1	51	0,8360	1	51	0,9104
$\hat{\sigma}_a^2$	0,2183	0,4731	2	73	0,7646	2	73	0,9075
$\hat{\sigma}_c^2$	0,0324	0,1140	3	39	0,5110	3	70	0,7695
$\hat{\sigma}_e^2$	0,2056	0,9093	4	1	0,5090	4	10	0,6427
$\hat{\sigma}_f^2$	0,4564	1,4965	5	86	0,4877	5	24	0,6107
$\hat{h}_a^2$	0,47±0,17	0,31±0,14	6	70	0,4796	6	39	0,5411
$\hat{h}_{aj}^2$	0,51	0,34	7	58	0,4721	7	34	0,5281
$\hat{C}_p^2$	0,0710	0,0762	8	88	0,3826	8	1	0,4986
$\hat{h}_m^2$	0,70	0,60	9	24	0,3735	9	86	0,4897
r_{aa}	0,8381	0,7720	10	44	0,3543	10	40	0,3570
$\hat{h}_{ad}^2$	0,44	0,28	$r_5 = 0,85$					
CV_{gi} (%)	25,74	11,26						
CV_{gp} (%)	12,87	5,63						
CV_e (%)	14,51	8,03						
CV_r	0,88	0,70						
$\hat{m}$	1,81	6,10						
LRT(χ^2)	7,6**	3,82 ^{ns}						

Nota: *significativo a 5%, com 1 grau de liberdade; **significativo a 1%, com 1 grau de liberdade; ^{ns}não significativo; $\hat{\sigma}_a^2$ variância genética aditiva; $\hat{\sigma}_c^2$ variância ambiental entre parcelas; $\hat{\sigma}_e^2$ variância residual (ambiental+não aditiva); $\hat{\sigma}_f^2$ variância fenotípica individual; $\hat{h}_a^2$ herdabilidade individual dos efeitos aditivos; $\hat{h}_{aj}^2$ herdabilidade individual ajustada para os efeitos de parcela; $\hat{C}_p^2$ coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas; $\hat{h}_m^2$ herdabilidade da média de progênies; r_{aa} acurácia; $\hat{h}_{ad}^2$ herdabilidade aditiva dentro de parcela; CV_{gi} coeficiente de variação genética aditiva individual; CV_{gp} coeficiente de variação genotípica entre progênies; CV_e coeficiente de variação experimental; CV_r coeficiente de variação relativa; $\hat{m}$ média geral ; LRT: Teste da razão de verossimilhança; χ^2 qui-quadrado da deviance. Fonte: Própria autora.

A herdabilidade individual dos efeitos aditivos foi relativamente baixa, ($\hat{h}_a^2$) foi de $0,29 \pm 0,13$ para o volume e apenas $0,13 \pm 0,08$ para a resina. Estes valores indicam uma capacidade moderada de seleção para volume, mas um controle genético bastante limitado para a produção de resina.

A herdabilidade ajustada à parcela ($\hat{h}_{aj}^2$) seguiu a mesma tendência, com 0,30 para o volume e 0,14 para a resina. Por outro lado, a herdabilidade da média de progênies ($\hat{h}_m^2$) apresentou valores medianos: 0,45 para o volume e 0,28 para a resina. Esses índices apontam que, embora a seleção entre famílias seja viável para volume, o mesmo não se aplica com segurança à resina neste estágio. A acurácia seletiva (r_{aa}) foi de 0,6735 para volume e 0,5318 para resina (Tabela 14). Apesar de inferiores aos valores observados em *hondurensis*, principalmente para volume, ainda são aceitáveis.

Os coeficientes de variação genética aditiva individual (CVgi) foram de 17,71% para o volume e 14,84% para a resina, indicando uma amplitude genética satisfatória para ambos os caracteres, embora inferior ao observado para *hondurensis*. O coeficiente de variação genotípica entre progênies (CVgp) seguiu padrão semelhante: 8,85% (volume) e 7,42% (resina). O coeficiente de variação experimental foi de 13,74% para volume e 16,71%.

O teste de LRT não detectou efeito genético significativo para nenhum dos caracteres em 2013, com valores de $\chi^2 = 2,37$ para volume e 0,96 para resina (ambos não significativos).

O ranqueamento das dez árvores mais produtivas em 2013 fornece informações valiosas para seleção individual e identificação de famílias promissoras. Para o volume, a árvore de maior desempenho foi da família 47 ($a = 0,7920$), seguida pelas famílias 70 (0,6790) e 26 (0,5300). No caso da produção de resina, o destaque absoluto foi a família 26, com valor genético de 0,7432, seguida pelas famílias 106 e 15.

A análise conjunta dos dados permite identificar algumas famílias com desempenho superior em mais de um caráter. A família 26, por exemplo, aparece em 3º lugar para volume e lidera o ranqueamento de resina, sendo a mais versátil e promissora entre todas.

De modo geral, os dados de 2013 para *Pinus caribaea* var. *bahamensis* revelam uma base genética promissora para seleção em volume de madeira, e resina.

Mesmo algumas famílias liderando o topo do ranking, temos as 10 famílias mais produtivas tanto para volume quanto para resina, que oferecem uma base estratégica para programas de seleção multipropósito, reforçando a importância da seleção combinada e da avaliação longitudinal dos indivíduos.

Tabela 14. Volume e produção de resina extraída em painel com ranqueamento das 10 Árvores Mais Produtivas Avaliadas em um teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* em 2013.

Estimativas	VOL (m ³ ha ⁻¹ arv ⁻¹)	RES (Kg)	VOL	FAM	a	RES	FAM	a
$\hat{\sigma}_g^2$	-	-	1	47	0,7920	1	26	0,7432
$\hat{\sigma}_a^2$	0,2414	0,4275	2	70	0,6790	2	106	0,6138
$\hat{\sigma}_c^2$	0,0251	0,0470	3	26	0,5300	3	15	0,5579
$\hat{\sigma}_e^2$	0,5402	2,6498	4	58	0,4886	4	65	0,4799
$\hat{\sigma}_f^2$	0,8068	3,1244	5	69	0,4609	5	92	0,3878
$\hat{h}_a^2$	0,29±0,13	0,13±0,08	6	98	0,4600	6	39	0,3876
$\hat{h}_{aj}^2$	0,30	0,14	7	77	0,4368	7	100	0,3836
$\hat{C}_p^2$	0,0311	0,0150	8	96	0,3993	8	90	0,3623
$\hat{h}_m^2$	0,45	0,28	9	42	0,3760	9	14	0,3509
r_{aa}	0,6735	0,5318	10	112	0,3527	10	105	0,3143
$\hat{h}_{ad}^2$	0,25	0,1079	$r_5 = 0,28$					
CV_{gi} (%)	17,71	14,84						
CV_{gp} (%)	8,85	7,42						
CV_e (%)	13,74	16,71						
CV_r	0,64	0,44						
$\hat{m}$	2,77	4,44						
LRT(χ^2)	2,37 ^{ns}	0,96 ^{ns}						

Nota: *significativo a 5%, com 1 grau de liberdade; **significativo a 1%, com 1 grau de liberdade; ^{ns}não significativo; $\hat{\sigma}_a^2$ variância genética aditiva; $\hat{\sigma}_c^2$ variância ambiental entre parcelas; $\hat{\sigma}_e^2$ variância residual (ambiental+não aditiva); $\hat{\sigma}_f^2$ variância fenotípica individual; $\hat{h}_a^2$ herdabilidade individual dos efeitos aditivos; $\hat{h}_{aj}^2$ herdabilidade individual ajustada para os efeitos de parcela; $\hat{C}_p^2$ coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas; $\hat{h}_m^2$ herdabilidade da média de progênies; r_{aa} acurácia; $\hat{h}_{ad}^2$ herdabilidade aditiva dentro de parcela; CV_{gi} coeficiente de variação genética aditiva individual; CV_{gp} coeficiente de variação genotípica entre progênies; CV_e coeficiente de variação experimental; CV_r coeficiente de variação relativa; $\hat{m}$ média geral; LRT: Teste da razão de verossimilhança; χ^2 qui-quadrado da deviance. Fonte: Própria autora.

Em 2025, a herdabilidade individual dos efeitos aditivos ($\hat{h}_a^2$) para o volume foi de $1,94 \pm 0,75$. No caso da resina, a herdabilidade foi estimada em $0,66 \pm 0,43$, um valor elevado e superior ao de 2013. A herdabilidade da média de progênies ($\hat{h}_m^2$) também foi alta: 0,93 para volume e 0,86 (Tabela 15) para resina, sugerindo uma base excelente para seleção entre famílias. A acurácia seletiva (r_{aa}) reforça essa leitura, apresentando valores altos: 0,9661 para volume e 0,9319 para resina. Esses valores indicam elevada confiabilidade na estimativa dos valores genéticos preditos, sobretudo para volume.

Os coeficientes de variação genética aditiva individual (CVgi) foram de 68,04% para volume e 12,12% para resina, o que demonstra uma impressionante amplitude genética disponível para a madeira, com boa margem de ganho genético por seleção. O CVgp foi de 34,02% para volume e 6,06% para resina — ambos expressivos. O coeficiente de variação experimental foi inferior a 25% para ambos os caracteres (22,26% para volume e 5,78% para resina), sinalizando boa qualidade experimental. Contudo, é essencial destacar que o teste LRT foi significativo apenas para o volume ($\chi^2 = 6,33^*$), e não significativo para a produção de resina ($\chi^2 = 0,47_{ns}$). A variedade *bahamensis* apresentou comportamento genético diferenciado ao longo do tempo. Na avaliação de 2013, as herdabilidades foram mais baixas: 0,29 (volume) e 0,13 (resina), com valores modestos de acurácia ($r_{aa} = 0,67$ e $0,53$, respectivamente).

Das 10 árvores mais produtivas para o volume, a família 46 foi a mais produtiva, seguida pelas famílias 111 (3,1904), 1 (1,6054), 108 (1,4420) e 109 (1,3631). Estes valores são significativamente superiores aos registrados em 2013, o que sugere um ganho genético expressivo ao longo do tempo e possivelmente resultado da seleção anterior ou efeito da maturação fisiológica das árvores. Para a produção de resina, o desempenho foi mais modesto. A família 30 lidera o ranking ($a = 0,1551$), seguida pelas famílias 45, 53, 5 e 43.

Tabela 15. Estimativas de volume de madeira e produção de resina em *borehole*, com ranqueamento das 10 Árvores Mais Produtivas Avaliadas em um teste de progênie de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* para 2025.

Estimativas	VOL (m ³ ha ⁻¹ arv ⁻¹)	RES (Kg)	VOL	FAM	a	RES	FAM	a
$\hat{\sigma}_g^2$	-	-	1	46	3,4304	1	30	0,1551
$\hat{\sigma}_a^2$	1,8289	0,0433	2	111	3,1904	2	45	0,1434
$\hat{\sigma}_c^2$	0,1382	0,0009	3	1	1,6054	3	53	0,1379
$\hat{\sigma}_e^2$	-1,0258	0,0209	4	108	1,4420	4	5	0,1343
$\hat{\sigma}_f^2$	0,9414	0,0653	5	109	1,3631	5	43	0,1317
$\hat{h}_a^2$	1,94±0,75	0,66±0,43	6	70	1,3602	6	11	0,1196
$\hat{h}_{aj}^2$	2,27	0,67	7	49	1,2447	7	100	0,1122
$\hat{C}_p^2$	0,1468	0,0143	8	24	1,1582	8	66	0,1111
$\hat{h}_m^2$	0,93	0,86	9	8	1,1168	9	94	0,0924
r_{aa}	0,9661	0,9319	10	98	1,1145	10	87	0,0902
$\hat{h}_{ad}^2$	3,96	0,60	$r_5 = -0,60$					
CV_{gi} (%)	68,04	12,12						
CV_{gp} (%)	34,02	6,06						
CV_e (%)	22,26	5,78						
CV_r	1,52	1,04						
$\hat{m}$	1,98	1,71						
LRT(χ^2)	6,33*	0,47 ^{ns}						

Nota: *significativo a 5%, com 1 grau de liberdade; **significativo a 1%, com 1 grau de liberdade; ^{ns}não significativo; $\hat{\sigma}_a^2$ variância genética aditiva; $\hat{\sigma}_c^2$ variância ambiental entre parcelas; $\hat{\sigma}_e^2$ variância residual (ambiental+não aditiva); $\hat{\sigma}_f^2$ variância fenotípica individual; $\hat{h}_a^2$ herdabilidade individual dos efeitos aditivos; $\hat{h}_{aj}^2$ herdabilidade individual ajustada para os efeitos de parcela; $\hat{C}_p^2$ coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas; $\hat{h}_m^2$ herdabilidade da média de progênie; r_{aa} acurácia; $\hat{h}_{ad}^2$ herdabilidade aditiva dentro de parcela; CV_{gi} coeficiente de variação genética aditiva individual; CV_{gp} coeficiente de variação genotípica entre progênie; CV_e coeficiente de variação experimental; CV_r coeficiente de variação relativa; $\hat{m}$ média geral ; LRT: Teste da razão de verossimilhança; χ^2 qui-quadrado da deviance. Fonte: Própria autora.

O desempenho absoluto das árvores em 2025 foi inferior ao observado em 2013 para resina, com a árvore mais produtiva (família 30) alcançando apenas 0,1551 kg — o que representa apenas 20% da líder de 2013. Este declínio pode ser consequência de diferenças no método de extração, idade da árvore, condições climáticas ou até mesmo efeitos genótipo × ambiente, com impacto negativo sobre a expressão da característica. A presença da família 100 em ambas as listas sugere algum nível de estabilidade, embora com valores absolutos mais baixos em 2025.

A análise do ranqueamento das árvores mais produtivas evidencia ganhos genéticos relevantes para volume entre 2013 e 2025, refletindo sucesso do melhoramento e da expressão tardia do crescimento. Já para a resina, observa-se maior variabilidade temporal, com queda nos valores absolutos e inversão na correlação com volume. Famílias como 26, 70, 98 e 100 despontam como promissoras, sendo candidatas estratégicas para manutenção em bancos clonais e uso em cruzamentos controlados com foco em seleção equilibrada de múltiplos caracteres. O ranqueamento das árvores mais produtivas para volume e produção de resina, conforme apresentado nas tabelas de 2013 e 2025, representa um importante recurso complementar à análise dos parâmetros genéticos, pois permite identificar indivíduos superiores em desempenho absoluto, independentemente da média de suas famílias. Essas árvores representam os genótipos de maior interesse econômico imediato, além de fornecerem indicações sobre estabilidade genotípica ao longo do tempo.

No geral, o ranqueamento das árvores é especialmente útil para decisões práticas no campo, como a seleção de árvores matrizes, o estabelecimento de jardins clonais, ou a pomares de sementes por mudas. Indivíduos ranqueados em posições superiores, e principalmente aqueles que aparecem de forma recorrente em diferentes anos ou caracteres, são os mais indicados para compor esses lotes, pois reúnem alto desempenho produtivo e estabilidade genética.

3.3.7. Caracterização físico-química da goma-resina e composição de monoterpenos em diferentes coletas, conforme análises da empresa RESINEVES

A Tabela 22 apresenta os resultados da caracterização química da goma-resina, enviados pela empresa RESINEVES, destacando os principais monoterpenos de interesse industrial: α -pineno, β -pineno e canfeno. Esses três compostos são os principais constituintes do óleo de terebintina e a soma de suas áreas relativas compõe o parâmetro denominado “total de bicíclicos”, o qual serve como um indicador da qualidade da matéria-prima para fins industriais.

De maneira geral, observa-se que o α -pineno é o componente predominante em praticamente todas as amostras, com valores variando entre aproximadamente 58% e 91%. Essa predominância é coerente com o perfil esperado para resinas de espécies do gênero *Pinus*, em que o α -pineno exerce papel fundamental nas propriedades químicas e comerciais da terebintina.

O β -pineno apresentou maior variação entre as coletas e entre plantas, com teores que oscilaram de cerca de 3% até mais de 27%. Essa amplitude é relevante, pois o β -pineno, embora secundário em relação ao α -pineno, confere características complementares ao óleo e pode influenciar sua aplicação industrial.

O canfeno apareceu em concentrações relativamente baixas, em torno de 1,3% a 2,7% na maioria das amostras. Apesar de seu menor teor, esse composto é importante por também contribuir para a composição total dos bicíclicos e, em alguns casos, pode ser utilizado como marcador de variação genética ou ambiental entre indivíduos.

O total de bicíclicos apresentou valores expressivos, variando entre aproximadamente 65% e 96%, evidenciando que a maior parte da composição química da terebintina dessas amostras é formada pelos três principais monoterpenos de interesse. A consistência dos valores elevados de bicíclicos reforça a qualidade da goma-resina obtida, tornando-a promissora para fins comerciais.

Esses resultados, fornecidos pela RESINEVES, demonstram que há variação considerável entre indivíduos e coletas, o que pode estar associado a fatores genéticos, ambientais e até mesmo sazonais. Do ponto de vista de melhoramento genético e seleção de árvores, as informações de composição química são

fundamentais, pois permitem identificar genótipos com maior teor de α -pineno e maior estabilidade no total de bicíclicos, características desejáveis para o mercado de derivados da terebintina.

Tabela 22. Frações de Alpha, Beta Pineno e Canfeno

LINHA	PLANTA	COLETA 1	ALPHA PINENO (%)	BETA PINENO (%)	CANFENO (%)	TOTAL DE BICÍCLICOS (%)	COLETA 2	ALPHA PINENO (%)	BETA PINENO (%)	CANFENO (%)	TOTAL DE BICÍCLICOS (%)
1	2	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	81,64	5,31	1,85	88,8
1	3	X	79	5,09	1,8	85,89	X	83,54	5,85	1,47	90,86
1	4	X	N/A	N/A	N/A	N/A					
1	5						X	N/A	N/A	N/A	N/A
2	1						X	75,5	5,51	1,47	82,48
2	5	X	79,38	5,02	1,68	86,08					
3	1						X	58,74	4,12	2,5	65,36
3	3	X	78,64	6,38	1,61	86,63	X	82,91	7,88	1,67	92,46
3	6						X	N/A	N/A	N/A	N/A
4	2						X	84,59	6,82	1,48	92,89
4	3						X	83,27	4,83	1,54	89,64
4	4						X	83,91	6,36	1,66	91,93
4	5	X	84,2	6,21	1,81	92,22	X	84,93	6,29	1,68	92,9
5	2	X	68,88	5,02	1,47	75,37	X	61,77	5,09	1,41	68,27
5	4	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	85,57	5,86	1,59	93,02
5	5	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	58,9	4,21	2,43	65,54
6	2	X	83,75	6,37	1,77	91,89	X	N/A	N/A	N/A	N/A
6	5	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	N/A	N/A	N/A	N/A
7	2						X	80,14	5,8	1,59	87,53
8	2	X	77,63	8,81	1,58	88,02	X	80,67	9,75	1,37	91,79
8	3	X	76,57	13,54	1,51	91,62	X	N/A	N/A	N/A	N/A
8	4						X	78,63	13,03	1,61	93,27
9	2	X	75,64	17,13	1,35	94,12	X	N/A	N/A	N/A	N/A
10	4	X	75,58	15,48	1,33	92,39	X	77,01	15,27	1,28	93,56
10	5	X	76,48	18,11	1,49	96,08	X	N/A	N/A	N/A	N/A
10	12						X	73,06	20,86	1,35	95,27
11	3	X	73,33	19,24	1,36	93,93					
12	3						X	67,12	27,55	1,35	96,02
12	4	X	76,5	14,98	1,51	92,99	X	75,56	17,56	1,31	94,43
13	3	X	91,47	3,11	1,49	96,07	X	93,91	2,96	1,44	98,31
13	6						X	67,59	17,62	1,89	87,1
14	3						X	71,61	19,53	1,25	92,39

*N/A = NÃO SE APLICA, PELA POUCA QUANTIADE DE AMOSTRA, MÍNIMO 50g.

Fonte: Própria autora.

A Tabela 23 apresenta os resultados da caracterização da goma-resina em termos de massa da amostra, teor de água, fração de terebintina e breu, considerando

duas coletas distintas. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar a qualidade e o rendimento da resina, uma vez que a proporção entre terebintina e breu determina tanto a viabilidade industrial quanto a valorização comercial do produto.

De modo geral, observa-se que a fração de terebintina variou entre aproximadamente 7% e 21%, enquanto o breu apresentou valores mais elevados, situando-se entre 75% e 91%. Essa relação é esperada, visto que o breu (ácidos resínicos) normalmente representa a maior parte da composição da resina, conferindo rigidez e estabilidade ao produto final, enquanto a terebintina (mistura de monoterpenos voláteis) é responsável pelas propriedades químicas de maior interesse industrial, especialmente para solventes e derivados químicos.

O teor de água variou entre 0,37% e 8,3%, revelando diferenças significativas entre indivíduos e coletas. Valores mais elevados de umidade podem impactar negativamente a eficiência do processamento industrial da resina, além de diluir os constituintes de interesse, sendo, portanto, um parâmetro importante de controle.

Entre as coletas, nota-se variação tanto no peso das amostras quanto nos teores de terebintina e breu. Em alguns casos, a segunda coleta apresentou menor rendimento em terebintina e maior proporção de breu, indicando possível efeito de condições ambientais ou fisiológicas das árvores no momento da extração.

De forma geral, os resultados fornecidos pela empresa RESINEVES confirmam a qualidade da resina avaliada, com elevado teor de breu e teores de terebintina dentro da faixa esperada para espécies de *Pinus*. Contudo, a variabilidade observada reforça a importância de estudos de seleção genética e manejo florestal direcionados à obtenção de indivíduos com maior estabilidade e maior teor de terebintina, ampliando o valor agregado do produto final.

Tabela 17 – Caracterização da goma-resina quanto ao peso da amostra, teor de água, frações de terebintina e breu em duas coletas, conforme análise realizada pela empresa RESINEVES.

LINHA	PLANTA	COLETA 1	PESO (g)	ÁGUA (%)	TEREBINTINA (%)	BREU (%)	COLETA 2	PESO (g)	ÁGUA (%)	TEREBINTINA (%)	BREU (%)
1	2	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	170	1,76	6,94	91,3
1	3	X	211	0,71	13,77	85,52	X	271	1,85	11,85	86,3
1	4	X	N/A	N/A	N/A	N/A					
1	5						X	N/A	N/A	N/A	N/A
2	1						X	238	5,46	11,67	82,87
2	5	X	260	1,15	16,69	82,16					
3	1						X	86	2,32	20,18	77,5
3	3	X	253	1,58	14,06	84,36	X	60	8,33	16,66	75,01
3	6						X	N/A	N/A	N/A	N/A
4	2						X	227	5,72	9,17	85,11
4	3						X	274	0,72	10,45	88,83
4	4						X	268	1,3	14,08	84,62
4	5	X	216	1,38	19,28	79,34	X	256	1,17	16,95	81,88
5	2	X	264	0,37	14,46	85,17	X	227	0,88	13	86,12
5	4	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	245	4,69	13,64	81,67
5	5	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	66	1,51	19,72	78,77
6	2	X	141	1,41	14,15	84,44	X	N/A	N/A	N/A	N/A
6	5	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	N/A	N/A	N/A	N/A
7	2						X	243	5,14	13,03	81,83
8	2	X	227	3,3	15,29	81,41	X	289	4,84	15,31	79,85
8	3	X	267	0,74	14,3	84,96	X	N/A	N/A	N/A	N/A
8	4						X	206	0,48	13,49	86,03
9	2	X	226	0,66	14,38	84,96	X	N/A	N/A	N/A	N/A
10	4	X	321	1,09	12,46	86,45	X	289	0,86	11,24	87,9
10	5	X	178	1,12	11,23	87,65	X	N/A	N/A	N/A	N/A
10	12						X	239	1,46	20,92	77,62
11	3	X	269	0,55	15,42	84,03					
12	3						X	288	4,16	16,31	79,53
12	4	X	271	1,47	12,91	82,62	X	279	1,07	15,94	82,99
13	3	X	336	1,04	15,17	83,79	X	298	2,68	12,91	84,41
13	6						X	125	2,4	19,2	78,4
14	3						X	350	7,42	20	72,58

*N/A = NÃO SE APLICA, PELA POUCA QUANTIADE DE AMOSTRA, MÍNIMO 50g.

Fonte: Própria autora.

3.4. CONCLUSÕES

A presente pesquisa proporciona uma análise comparativa abrangente dos parâmetros genéticos, silviculturais e produtivos das variedades *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, *hondurensis* e *caribaea*, com foco em características como sobrevivência,

altura, diâmetro, volume de madeira e produção de resina, avaliados ao longo de mais de três décadas em testes de progênies estabelecidos em Selvíria-MS.

A variedade *bahamensis* apresenta herdabilidades elevadas (h^2 até 0,75 para volume aos 35 anos), associadas a alta acurácia e coeficientes de variação genética, sugerindo grande potencial para a seleção de indivíduos superiores.

A *hondurensis* demonstra maior estabilidade genética para volume ao longo do tempo, com herdabilidade de até 0,47 aos 39 anos.

A *caribaea*, por sua vez, apresenta os menores valores de herdabilidade individual ($\leq 0,10$ em geral), embora mantenha um tamanho efetivo populacional elevado, o que a torna valiosa do ponto de vista da conservação genética de longo prazo.

O tamanho efetivo populacional (N_e) se mostra crítico para *bahamensis* e *hondurensis*, ambos atualmente com $N_e = 84$ e diversidade genética reduzida ($D = 0,42$), sinalizando risco de erosão genética.

Esta pesquisa fornece contribuições inéditas ao revelar o comportamento genético de longo prazo das três variedades tropicais de *Pinus caribaea* em condições edafo-climáticas brasileiras.

Confirma que o desbaste seletivo melhora a expressão genética e a herdabilidade, especialmente para *bahamensis* e *caribaea*, sendo uma prática recomendada para favorecer a seleção precoce.

Evidencia o potencial de algumas famílias superiores com desempenho simultâneo em volume e resina, como as famílias 8, 73 e 84 da variedade *hondurensis*, indicativas de material genético promissor para seleção múltipla.

Fundamenta tecnicamente a formação de pomares de sementes clonais ou de base para cruzamentos futuros, considerando as famílias ranqueadas e a estabilidade fenotípica.

Conduz novas avaliações clonais com as famílias mais produtivas identificadas, integrando produção de madeira e resina, para testar a viabilidade de seleção recíproca recorrente.

Ampla a coleta de dados químicos da resina (composição e qualidade), associando genética quantitativa com análises químicas, a fim de otimizar a valorização do produto além do rendimento.

Reinstalar bancos clonais ou pomares com as famílias de destaque, em especial no caso do *bahamensis*, cuja base genética está em risco devido à alta mortalidade e ao N_e reduzido.

Investiga GxE em novos locais de clima tropical brasileiro, validando a adaptabilidade dos genótipos identificados como superiores em diferentes ambientes.

A predominância do α -pineno e os elevados valores de bicíclicos confirmam o potencial da resina como matéria-prima de alto interesse químico, enquanto a relação entre tere-bintina e breu evidencia equilíbrio adequado entre frações voláteis e sólidas.

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO-RODRÍGUEZ, P.; STRONG, M. T. **Catalogue of seed plants of the West Indies**. Washington DC, USA: Smithsonian Institution, 2012. v. 98, p. 1192.
- AGUIAR, A. V.; CORREA, A. P. A.; SOUSA, V. A.; DAROS, T. L.; SHIMIZU, J. Y. Variação genética em progênies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* em Barra Velha, SC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 6., 2011, Búzios. **Anais** [...]. Búzios: SBPM, 2011.
- ALAN, M.; PAYN, K. G.; MCKEAND, S.; ISIK, F. Genetic parameter estimates from a polymix breeding population of *Pinus taeda* L. **Forest Science**, Oxford, v. 69, n. 4, p. 415–423, 2023.
- ANORUO, A.; BERLYN, G. P. Caribbean pine in sustainable tropical forestry. **Journal of Sustainable Forestry**, New York, v. 1, p. 1–23, 1992.
- ASSIS, T. F.; RESENDE, M. D. V. Genetic improvement of forest tree species. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, MG, v. S1, p. 44–49, 2011.
- BELDINI, T. P.; MCNABB, K.; LOCKABY, B. G.; SANCHEZ, F. G.; NAVEGANTES-CÂNCIO, O.; OLIVEIRA, R. C. The effect of plantation silviculture on soil organic matter and particle-size fractions in Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1593–1602, 2009.
- BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G.; COUTO, H.T.Z.; CAPITANI, L.R.; NEVES, M.A. **Método rápido para estimar a produção de resina em árvores de Pinus**. Circular técnica, IPEF, 1982.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; TREVISAN, J. F. Condições climáticas e suas influências sobre a produção de resinas de pinheiros tropicais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 16, p. 37–45, 1978.
- BOGGIANO, A. G. T.; GURAU, L.; POROJAN, M.; STANCIU, M. D. Identification of the juvenile wood transition age and of some growth characteristics in plantation vs. native populations of Cuban *Pinus caribaea* M. var. *caribaea* B&G. **BioResources**, Ottawa, v. 20, n. 3, p. 6242–6266, 2025.
- CABI. *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Caribbean pine). *CABI Compendium*, 2023. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.41573>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- CAMACHO, V. R.; BARBOLLA, L. J.; MORILLO, I. R.; VÁZQUEZ-LOBO, A.; PIÑERO, D.; DELGADO, P. Genetic variation and dispersal patterns in three varieties of *Pinus caribaea* (Pinaceae) in the Caribbean Basin. **Plant Ecology and Evolution**, Liège, v. 151, n. 1, p. 61–76, 2018.

CLAYTON, W. D.; GOVAERTS, R.; HARMAN, K. T.; WILLIAMSON, H.; VORONTSOVA, M. **World checklist of Poaceae**. Richmond, UK: Royal Botanic Gardens, Kew, 2013.

DELGADO, J. Industrialization and landscape: gum resin pinewoods of France, Spain and United States in the 19th and 20th centuries. **Estudios Rurales**, Buenos Aires, v. 6, n. 11, 2022.

FREITAS, J. A.; FREIRE NETO, A.; BUCCI, L. A.; RANZINI, M.; AGUIAR, A. V.; LIMA, I. L.; LONGUI, E. L. Evaluation of different compositions of stimulating paste in a closed resin system in 10-year-old *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 12, n. 8, 2023.

GERRY, E. B.; HALL, J. A. Biochemical phases of oleoresin production. **Plant Physiology**, Rockville, v. 10, n. 3, p. 537–543, 1935.

GOOGLE EARTH. [Imagem de Ilha Solteira, SP, mostrando a área central da cidade]. 2025. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-20.34361541,-51.40524338....> Acesso em: 10 jul. 2025.

GOMES, D.G. **Competição de espécies de *Pinus* spp. em diferentes sistemas de preparo de solo em área degradada no Cerrado**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Agronomia) - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira/UNESP. Orientador: Mario Luiz Teixeira de Moraes, 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual IBA 2020**. São Paulo: IBÁ, 2020. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2020.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual IBA 2023**. São Paulo: IBÁ, 2023. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2023.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual IBA 2024**. São Paulo: IBÁ, 2024. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2025.

JUIZO, C. G. F.; LOIOLA, P. L.; ZEN, L. R.; MARCHESAN, R.; CARVALHO, D. E.; BILA, N. F.; EGAS, A. F.; ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J. Variação radial das propriedades físicas da madeira de *Pinus patula* plantados em Moçambique. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 285–292, 2015.

KRONKA, F. J.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.

KOSKELA, J.; VINCETI, B.; DVORAK, W.; BUSH, D.; DAWSON, I. K.; LOO, J.; KJAER, E. D.; NAVARRO, C.; PADOLINA, C.; BORDÁCS, S.; JAMNADASS, R.; GRAUDAL, L.; RAMAMONJISOA, L. Utilization and transfer of forest genetic resources: a global review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 333, p. 22–34, 2014.

LIMA, J. C. D.; COSTA, F. D.; FULLER, T. N.; RODRIGUES-CORRA, K. C. S.; KERBER, M. R.; LIMA, M. S.; FETT, J. P.; FETT-NETO, A. Genes de referência para análise de qPCR em pinheiro-bravo adulto submetido à extração de resina como ferramenta para abordar a base molecular da resinose comercial. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 7, n. 849, 2016.

LOPEZ-ALVAREZ, S.; ZAS, R.; PÉREZ, M. F. M. Resin tapping: a review of the main factors modulating pine resin yield. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 202, n. 117105, 2023.

MARTINI, S.L.; ENGEL V.L. **Relatório final de implantação: Centro de Conservação Genética e Melhoramento de Pinheiros Tropicais – CCGMPT**. Instituto De Pesquisas E Estudos Florestais. Piracicaba, 1985.

MISSIO, R. F.; ANTÔNIO, L.; DIAS, S. H. B.; MORAES, L. T. D. Selection of *Pinus caribaea* var. *bahamensis* progenies based on the predicted genetic value. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, MG, v. 4, n. 4, p. 399–407, 2004a.

MISSIO, R. F. **Variação genética em progênies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis***. 2004. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

MISSIO, R. F.; CAMBUIM, J.; MORAES, M. L. T.; PAULA, R. C. Seleção simultânea de caracteres em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 66, p. 161–166, 2004b.

MORAES, M. L. T. **Variação genética e aplicação de análise multivariada em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret e Golfari**. 2001. 124 f. Tese (Livre-docência) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

MORAES NETO, S. P. **Estimativas de volume de *Pinus tecunumanii* no Cerrado do Distrito Federal**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. 16 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 230).

MOREIRA, J.P. **VARIAÇÃO GENÉTICA E GANHO ESPERADO NA SELEÇÃO DE PROGENIES DE *Pinus elliottii* var. *elliottii* PARA PRODUÇÃO DE MADEIRA EM IDADE PRECOCE**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2012.

NUGRAHANTO, G.; NA'ITEM, M.; INDRIOKO, S.; FARIDAH, E.; WIDIYATNO, W.; ABDILLAH, E. Genetic parameters for resin production of *Pinus merkusii* progeny test collected from three landraces in Banyumas Barat Forest District, Indonesia. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, Surakarta, v. 23, n. 4, p. 2010–2016, 2022.

ORTIZ, A. C.; MUSARELLA, C. M.; CARMONA, E. C. Biogeographical areas of Hispaniola (Dominican Republic, Republic of Haiti). In: **Plant Ecology - Traditional Approaches to Recent Trends**. InTech, 2017.

PAYN, T.; CARNUS, J. M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLEY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; ORAZIO, C.; RODRIGUEZ, L.; SILVA, L. N.; WINGFIELD, M. J. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 352, p. 57–67, 2015.

PRASAD, N.; SHARMA, S. C.; PANDEY, S.; KAR, A. Effect of freshening tools and freshening intervals on resin yield from *Pinus caribaea* using bore hole method of resin tapping. **Journal of Non Timber Forest Products**, Dehra Dun, v. 22, n. 1, p. 1–6, 2015.

RAMANANANTOANDRO, T.; REYNOLDS, T. P.; ANDRIANAHARINJAKA, F. A.; KOERA, R. A.; RAMANITRARIVO, L. C.; RAOBIMANDRANTO, N. A.; RANDRIAMBININTSOA, T.; RANDRIANOROSOA, A.; RATSIRARSON, J.; RAKOTONIRINA, M. T.; CHAIX, G. *International Conference on Tropical Wood (ICTW 2024): advancing the sustainable use of tropical forests*. **Bois & Forêts des Tropiques**, 2024.

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

RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007a. 561 p.

RESENDE, M. D. V. Melhoramento de essências florestais. In: BORÉM, A. (ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: UFV, 1999. p. 589–647.

RESENDE, M. D. V. **SELEGEN-REML/BLUP: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007b. 359 p.

RESENDE, M. D. V. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, MG, v. 16, n. 4, p. 330–339, 2006.

RODRIGUES-CORRÊA, K. C.; FETT-NETO, A. G. Seasonality and chemical elicitation of defense oleoresin production in field-grown slash pine under subtropical climate. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Heidelberg, v. 25, n. 1, p. 56–61, 2013.

SANCHEZ, M. D.; INGROUILLE, M. J.; COWAN, R.; HAMILTON, M. A.; FAY, M. F. Spatial structure and genetic diversity of natural populations of the Caribbean pine, *Pinus caribaea* var. *bahamensis* (Pinaceae), in the Bahaman archipelago. **Botanical Journal of the Linnean Society**, Oxford, v. 174, p. 359–383, 2014.

SAMPAIO, P. T. B.; RESENDE, M. D. V.; ARAUJO, A. J. Estimativas de parâmetros genéticos e métodos de seleção para o melhoramento genético de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 11, p. 2243–2253, 2000.

SANTOS, W. **Variação genética e desempenho de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de madeira e resina**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Sistemas de Produção) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2014.

SANTOS, W.; SOUZA, D. C. L.; MORAES, M. L. T.; AGUIAR, A. V. Genetic variation of wood and resin production in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barret & Golfari. **Silvae Genetica**, Warsaw, v. 65, n. 1, p. 31–37, 2016.

SEBBENN, A. M.; BAS, O. V.; MAX, J. C. M.; FREITAS, M. L. D. M. Estimativa de parâmetros genéticos e ganhos na seleção para caracteres de crescimento em teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e var. *bahamensis*, em Assis-SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 103–115, 2010.

SEBBENN, A. M.; PIRES, C. L. S.; STORCK, L.; FILHO, A. C.; ROSA, P. R. F. D. Variação genética em progênies de meios-irmãos de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* Bar. et Gol. na região de Bebedouro-SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 63–73, 1994.

SEBBENN, A. M.; VILAS BOAS, O.; MAX, J. C. M. Variação genética, herdabilidades e ganhos na seleção para caracteres de crescimento em teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* aos 20 anos de idade em Assis-SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 103-115, 2025.

SILVA, J. M. **Análises genéticas em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* por caracteres quantitativos e marcadores moleculares**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2005.

SILVA, J. M.; AGUIAR, A. V.; MORAES, M. L. T.; MORI, E. Divergência genética entre progênies de *Pinus caribaea* var. *caribaea* com base em caracteres quantitativos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, p. 69–77, 2012.

SILVA, A.P.P. **Variabilidade genética em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* para caracteres de crescimento** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2024.

SHIMIZU, J. Y.; MEDRADO, M. J. S. Cultivo do *Pinus*. **Sistemas de Produção, Embrapa Florestas**, Colombo, n. 5, p. 1–18, 2005.

SHIMIZU, J. Y.; SEBBENN, A. M. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. **Embrapa Florestas**, Colombo, p. 49–74, 2008.

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

SHIMIZU, J. Y.; SPIR, I. H. Z. Seleção de *Pinus elliottii* pelo valor genético para alta produção de resina. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 38, p. 103–117, 1999.

TAMBARUSSI, E. V.; MARQUES, E. G.; ANDREJOW, G. M. P.; PERES, F. S. B.; PEREIRA, F. B. Análise dialélica na avaliação do potencial de híbridos de *Pinus elliottii* x *Pinus caribaea* para a formação de populações de melhoramento. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 119, p. 395–403, set. 2018.

TAMBARUSSI, E. V.; SEBBENN, A. M.; MORAES, M. L. T.; ZIMBACK, L.; PALOMINO, E. C.; MORI, E. S. Estimativa de parâmetros genéticos em teste de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* por caracteres quantitativos e marcadores microssatélites. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 39–47, 2010.

ULUKANLI, Z. F.; KARABÖRKLÜ, S.; BOZOK, F.; ATES, B.; ERDOGAN, S.; CENET, M.; KARAASLAN, M. G. Chemical composition, antimicrobial, insecticidal, phytotoxic and antioxidant activities of Mediterranean *Pinus brutia* and *Pinus pinea* resin essential oils. **Chinese Journal of Natural Medicines**, Beijing, v. 12, n. 12, p. 901–910, 2014.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. Área de Hidráulica e Irrigação. **Canal clima**. 2021. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br>. Acesso em: 25 de julho de 2024.

VALLE, L. P.; GEADA-LÓPEZ, G.; SOTOLONGO-SOSPEDRA, R. Anatomía foliar comparada de *Pinus caribaea* var. *caribaea* y *P. tropicalis* (Pinaceae) en asociación simpátrica, 2020.

WANG, H.; MALCOLM, D. C.; FLETCHER, A. M. *Pinus caribaea* in China: introduction, genetic resources and future prospects. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 117, n. 1–3, p. 1–15, 1999.

ZAS, R.; QUIROGA, R.; TOUZA, R.; VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, C.; SAMPEDRO, L.; LEMA, M. Resin tapping potential of Atlantic maritime pine forests depends on tree age and timing of tapping. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 157, Apr., 2020.

ZULIAN, D. F. **Métodos de seleção para otimizar o ganho e a diversidade genética em pomares de sementes por muda de *Pinus caribaea* var. *caribaea***. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2017.

4 CAPÍTULO 2 - Variabilidade Temporal da Emissão de CO₂ e Atributos Físicos e Químicos do Solo em Áreas de *Pinus* Tropicais para Base de Melhoramento Genético.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi investigar a variabilidade temporal de emissões de CO₂ e temperatura do solo e sua relação com os atributos químicos e físicos do solo, visando fornecer como base para melhoramento genético de espécies tropicais de *Pinus* para produção de resina. Os testes foram realizados em oito áreas experimentais: PCB (*Pinus caribaea* var. *bahamensis*); PCH (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*); PCC 1 (*Pinus caribaea* var. *caribaea* 1); PCC 2 (*Pinus caribaea* var. *caribaea* 2); CEV - compostos por espécies e variedades de *Pinus*; TECU (*Pinus tecunumanii*), todos instalados na Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – FEPE/FEIS/UNESP, que se localiza no município de Selvíria – MS. As análises estatísticas foram realizadas com base no teste de Teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) para contemplar o pressuposto de normalidade dos dados da ANOVA. A comparação de médias foi realizada por meio do teste de Duncan, ao nível de significância de 5% de probabilidade utilizando o *software* R. A análise de variância foi estatisticamente significativa ($p < 0,001$) para tratamento, dia e na interação dia x tratamento, o mesmo ocorreu para temperatura do solo. As médias da emissão de CO₂ do solo durante o período avaliado variaram entre 0,42 a 4,77 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), onde a menor média corresponde ao tratamento denominado PCH e a maior corresponde ao tratamento TECU. A variabilidade temporal nas emissões de CO₂ do solo mostrou maior fluxo nos tratamentos que tem uso frequente de gado para pastagem da área, que ocorreu no TECU e CEV, nas áreas com incidência de nativas, houve diminuição do fluxo de CO₂, que é o caso do PCC1 e MISTO, mostrando uma maior possibilidade de estoque de carbono. Assim, tratamentos que apresentaram maiores emissões de CO₂ do solo, foram os que apresentaram maior pH e menores taxas de macro e micronutrientes, deixando uma perspectiva para trabalhos futuros, para verificar essa relação de macro e micronutrientes na dinâmica do fluxo de CO₂ do solo em relação as florestas plantadas.

Palavras-chave: carbono no solo; espécies florestais; atributos do solo.

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the temporal variability of CO₂ emissions and soil temperature and their relationship with the chemical and physical attributes of the soil, aiming to provide a basis for genetic improvement of tropical pine species for resin production. The tests were carried out in eight experimental areas: PCB (*Pinus caribaea* var. *bahamensis*); PCH (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*); PCC 1 (*Pinus caribaea* var. *caribaea* 1); PCC 2 (*Pinus caribaea* var. *caribaea* 2); CEV - composed of species and varieties of *Pinus*; TECU (*Pinus tecunumanii*); MIXED – Composed of the following species: *Myracrodruon urundeuva*, *Astronium fraxinifolium* and *Terminalia argentea*, all installed in the Research and Extension of the Faculty of Engineering of Ilha Solteira - of the Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita

Filho” – FEPE/FEIS/UNESP, which is located in the municipality of Selvíria - MS. Statistical analyzes were performed based on the Shapiro-Wilk Test ($p > 0.05$) to contemplate the assumption of normality of the ANOVA data. Comparison of means was performed using the Duncan test, at a significance level of 5% of probability using the R software. The analysis of variance was statistically significant ($p < 0.001$) for treatment, day and in the interaction day x treatment, the same occurred for soil temperature. Soil CO₂ emission averages during the evaluated period ranged from 0.42 to 4.77 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), where the lowest average corresponds to the PCH treatment and the highest corresponds to the TECU treatment. The temporal variability in CO₂ emissions from the soil showed a greater flow in the treatments that have frequent use of cattle for grazing in the area, which occurred in the TECU and CEV, in areas with incidence of natives, there was a decrease in the CO₂ flow, which is the case of PCC1 and MISTO, showing a greater possibility of carbon stock. Area with soil degradation (CEV) had lower levels of macro and micronutrients. Thus, treatments that presented higher soil CO₂ emissions were those that presented higher pH and lower rates of macro and micronutrients, leaving a perspective for future work, to verify this relationship of macro and micronutrients in the dynamics of soil CO₂ flux in relation to planted forests.

Keywords: soil carbon; forest species; soil attributes.

4.1. INTRODUÇÃO

As gimnospermas são um grupo de plantas poucas numerosas quando se compara ao contexto da flora atual, possui 675 espécies divididas entre 63 gêneros (Marchiori, 2005), entre os quais temos o gênero *Pinus* que tem em torno de 116 a 123 espécies produtoras de resina. *Pinus* na silvicultura brasileira envolve aspectos importantes ligados à socioeconomia, controle integrado de pragas, limitações físicas do solo para o seu cultivo, melhoramento genético e produção em sistemas silvipastoris (Shimizu, 2008). Em termos socioeconômicos, o *Pinus* tem destaque no setor resinheiro, onde a produção mundial de resina de *Pinus* atingiu o montante de 1.114.000 milhões de toneladas, em 2010 (Cunningham, 2012).

A representatividade da cadeia produtiva florestal no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro foi de 0,9%. A produção florestal representou, em 2023, 4,2% do PIB agropecuário e 4% do PIB da indústria de transformação. Nos componentes da demanda brasileira, apresentou uma participação de 1,9% no consumo intermediário e de 0,5% no consumo das famílias por produtos florestais, incluindo a formação bruta de capital. (Ibá, 2024). Além da magnitude econômica, o setor florestal tem se tornado cada vez mais relevante devido a iniciativas de sustentabilidade. Um método que possui bons resultados no combate aos efeitos nocivos do aquecimento global é a

produção de biomassa vegetal em forma de florestas plantadas, as quais são grandes aliadas no sequestro de CO₂ (Guerreiro *et al.*, 2021). A quantificação do efluxo de carbono do solo diretamente no campo fornece a real emissão de CO₂ do solo da floresta e esta informação pode ser utilizada, por exemplo, para cálculos de sequestro de carbono do ecossistema (Pinto-Junior, *et al.*, 2009). Assim, o cultivo de florestas é uma alternativa para diminuir os efeitos das mudanças do clima e da degradação do ambiente em geral (Sanquetta *et al.*, 2011).

Nesse cenário, é importante destacar que a cobertura florestal é considerada uma opção promissora para sequestro adicional de carbono, considerando seu aumento em vários países (Cook *et al.*, 2020). A quantificação do carbono orgânico em plantações florestais é essencial, pois essas áreas armazenam grandes quantidades de carbono atmosférico ao longo de seu ciclo. Em função disso, as técnicas de manejo adequadas têm despertado interesse em ensaios experimentais e plantios comerciais das empresas florestais, pois permitem o planejamento da produção e o uso eficiente dos multiprodutos (Carvalho *et al.*, 2021). Em povoamentos de *Pinus*, quantidade de matéria orgânica no solo (MOS) é uma característica de extrema importância na determinação de seus parâmetros de aptidão ao uso na produção florestal, devido a concentrar uma soma considerável de propriedades desejáveis (Brun *et al.*, 2020).

Diversos atributos do solo têm sido estudados visando sua relação com CO₂ (La Scala *et al.*, 2000). Os processos físicos e químicos do solo regulam a produção e transporte de gases do interior do solo à atmosfera e, portanto, a quantidade de CO₂ emitida é um importante indicador de como as plantações de *Pinus* estão contribuindo para o ciclo global de carbono. Alguns estudos avaliaram a variação temporal da emissão de CO₂ e temperatura em áreas de florestas plantadas e nativas, como áreas de florestas inundadas no Pantanal, como as de *Pinus*, *Eucalyptus* e mata nativa. (Silva *et al.*, 2017; Vicentini *et al.*, 2019). Existem poucos (ou nenhum) trabalhos que avalie as emissões de CO₂ do solo e relacione com seus atributos químicos e físicos em diferentes espécies de *Pinus*.

Os resíduos florestais de diferentes espécies de *Pinus* liberam compostos orgânicos em diferentes níveis de decomposição (frações lábeis e recalcitrantes), que atuam diretamente na qualidade química e física do solo e, conseqüentemente, na dinâmica da ciclagem de carbono nestes ecossistemas. Portanto, o objetivo deste estudo é investigar a relação entre as emissões de CO₂ com os atributos físicos-químicos

do solo ao longo do tempo, visando elucidar sua influência sobre o crescimento e o desenvolvimento de espécies tropicais de *Pinus* utilizadas na resinagem, com ênfase em subsídios ao melhoramento genético.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Características do local de coleta das sementes dos *Pinus* tropicais

Para a instalação de quatro dos seis testes de progênies utilizados nesse trabalho, foi feita a coleta de sementes de três espécies de *Pinus* provenientes do Centro de Conservação Genética e Melhoramento de Pinheiros Tropicais - CCGMPT que se situa no Município de Aracruz, no centro-oeste do Estado do Espírito Santo, aproximadamente entre 19°48' de latitude sul e 40°17' de longitude oeste. A área de Conservação Genética pertence à empresa Aracruz Florestal S.A. O local possui uma área total de 228,0 hectares, dos quais 197 hectares correspondem a área útil. Está a 2 km da estrada que liga Aracruz às dependências da Fábrica Aracruz Celulose S.A. e a 10 km da cidade de Aracruz (Martini; Engel, 1985).

O Relevo do local é típico da região, que é característico de topografia plana, com presença de remanescentes de matas que protegem nascentes. A altitude é de 50 m. O clima da região é subtropical com chuvas periódicas. A temperatura média anual do ar é de 23°C, com médias de 25°C no verão e 21°C no inverno. A precipitação anual é de 1.300 mm e 80% de umidade relativa. Os solos da região são, de maneira geral, ácidos, de baixa fertilidade, sendo arenosos na superfície e com deposição de argila a pequena profundidade, o que lhes confere drenagem média. A área faz divisa com os Rios Marabá e Sahy. No Rio Marabá existe uma pequena represa, e ao redor, áreas de vegetação natural e plantios de eucalipto, o que confere o desejado isolamento (Martini; Engel, 1985).

A área total do projeto subdividia-se em:

Área 1 - Pomar de sementes clonal de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* 50,0 ha;

Área 2 - Pomar de sementes clonal *Pinus caribaea* var. *bahamensis* 50,0 ha;

Área 3 - Pomar de sementes clonal *Pinus caribaea* var. *caribaea* 50,0 ha.

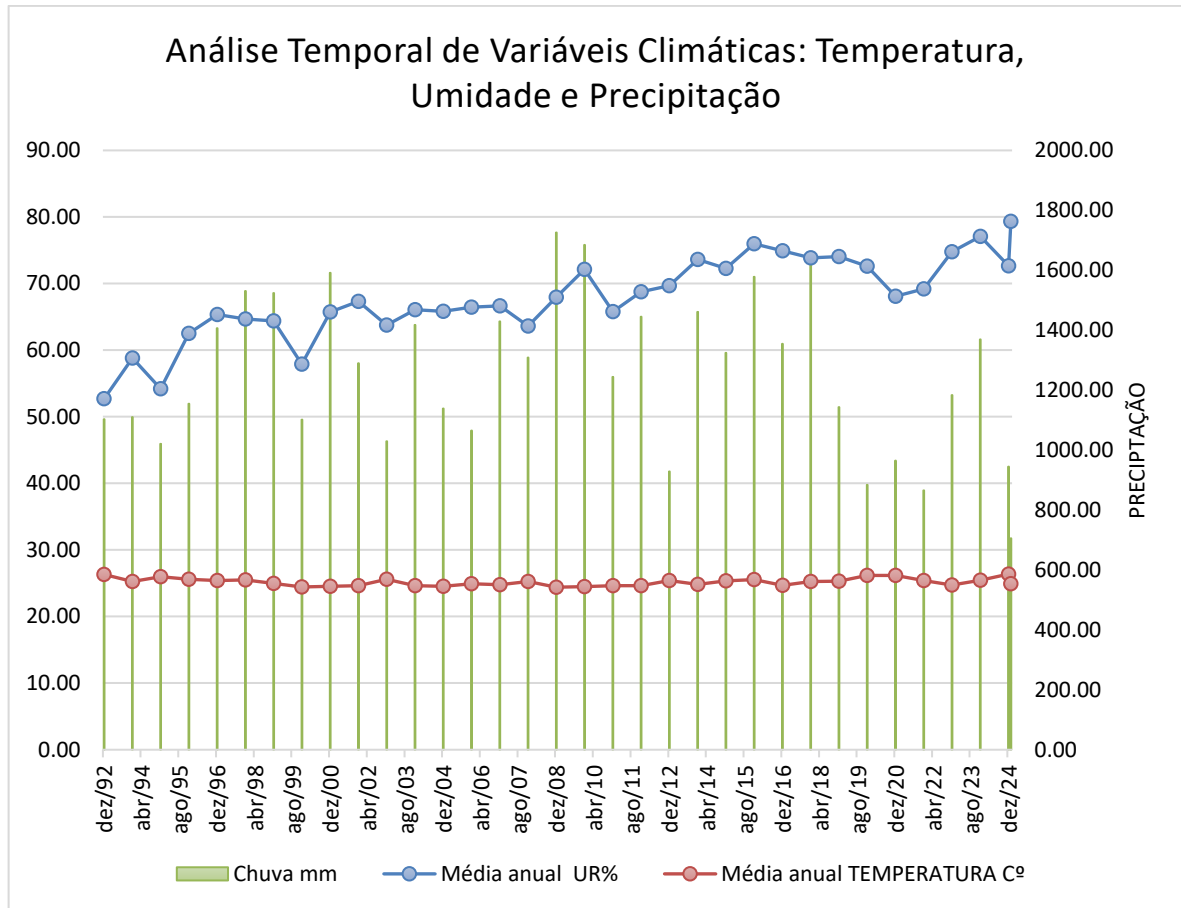
Para a instalação da outra área de estudo utilizada nesse trabalho, denominada de CEV (competição de espécies e variedades), foram adquiridas mudas provenientes da antiga Cia. Agro-Florestal de Monte Alegre (CAFMA), localizada no município de Agudos-SP (Silva, 2002).

As sementes de quarenta matrizes para instalação do *P. tecunumanii* foram coletadas em 2009 e 2010 em um pomar de sementes por mudas em Ventania, PR. As mudas das duas espécies foram produzidas no viveiro da Empresa Golden Tree, em Guarapuava, PR.

4.2.2. Características do local de plantio

Foram instalados quatro testes de progênies na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – FEPE/FEIS/UNESP, que localiza-se no município de Selvíria – MS (20°20'S e 51°23'W a uma altitude em torno de 330 metros). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Escuro, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018). O clima da região foi classificado como Aw pela classificação de Köppen; temperatura média anual de 25,1°C e precipitação média anual de 1305 mm (Figura 7) (Santos; Hernandez, 2013).

Figura 7. Evolução anual da temperatura média do ar (°C), umidade relativa média (%) e precipitação total (mm), no período de 1992 a 2024.



Fonte: Adaptado de Unesp (2025).

4.2.3. Característica dos testes de progênes

Os testes de progênes instalados foram denominados de:

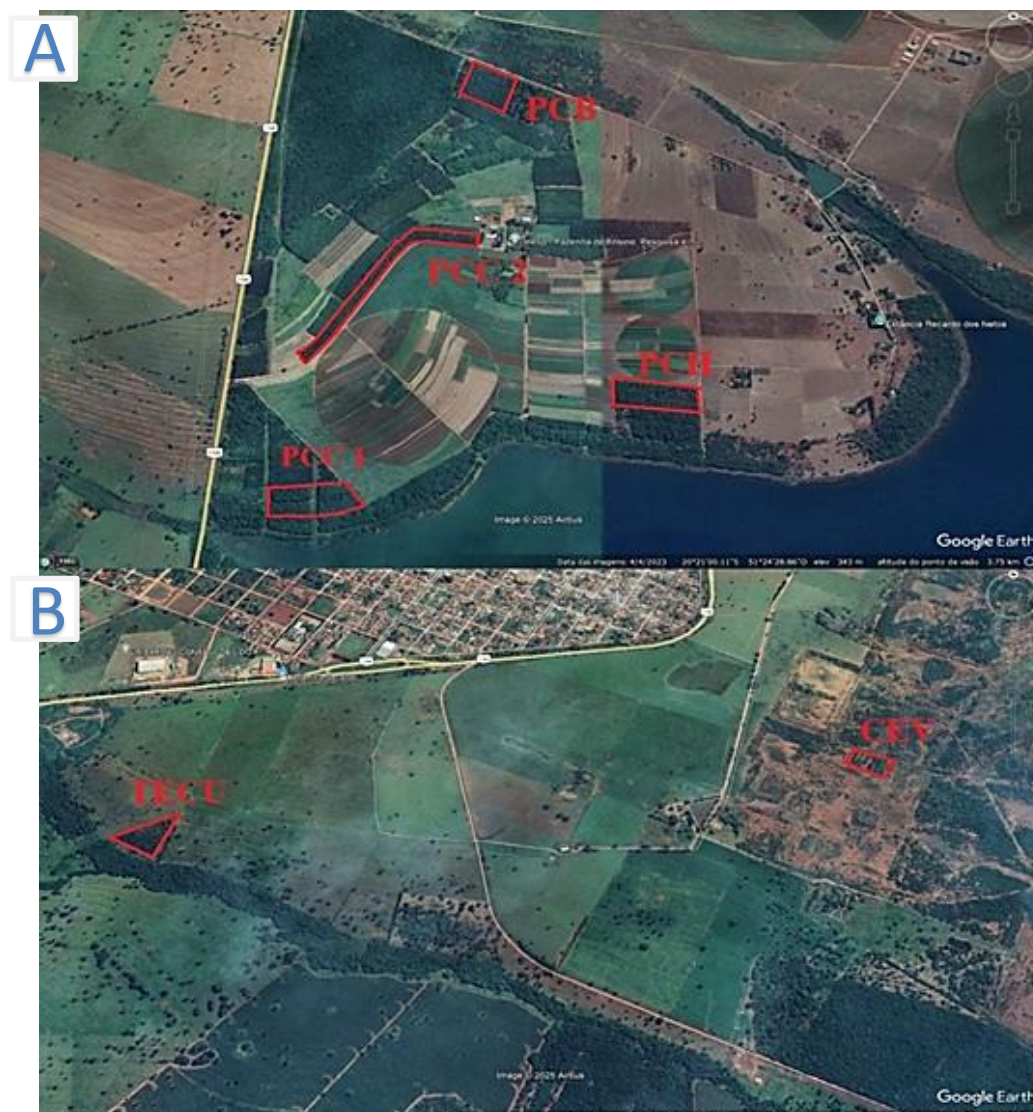
- i) CCGMPT - PCB - (*Pinus caribaea* var. *bahamensis*) - instalado nos dias 20 e 21/03/1990, com espaçamento 3,0 x 3,0 metros, no delineamento experimental látice quadrado 11 x 11 Triplo – parcialmente balanceando, com 6 plantas por parcela;
- ii) CCGMPT – PCH - (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) - instalado em 06/1986, sendo o mais velho dos experimentos, com espaçamento 3,0 x 3,0

- metros, no delineamento experimental látice quadrado 10 x 10 Triplo – parcialmente balanceando, com 10 plantas por parcela;
- iii) CCGMPT - PCC 1 - (*Pinus caribaea* var. *caribaea* 1) - instalado em 31/05/1988, com espaçamento 3,0 x 3,0 metros, no delineamento experimental de blocos casualizados 11 x 11 Triplo – parcialmente balanceando, com 4 repetições, nas repetições I e II foram 10 plantas por parcela, III foram 9 plantas por parcela e repetição IV foram 5 plantas por parcela.
 - iv) CCGMPT - PCC 2 - (*Pinus caribaea* var. *caribaea* 2) – instalado nos dias 20, 21 e 22/02/1989 espaçamento 3,0 x 3,0 metros, no delineamento experimental quadrado latino em parcelas subdivididas, 10 x 10 Triplo, com 10 plantas por parcela (5 com boro e 5 sem boro).
 - v) IPEF - CEV - compostos por espécies e variedades de *Pinus*: *Pinus caribaea* var. *bahamensis*; *Pinus caribaea* var. *caribaea*; *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; *Pinus oocarpa*; e *Pinus strobus* var. *chiapensis*. Instalado em 15/03/1995, com parcelas de 42 plantas, sendo 20 úteis, plantadas no espaçamento de 2,5 x 2,0 m. O *Pinus strobus* var. *chiapensis* não suportou as condições do local, sendo que todas as plantas morreram. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, constituindo de quatro repetições e seis tratamentos.
 - vi) EMBRAPA - TECU - (*Pinus tecunumanii*) – instalado em março de 2012, no espaçamento 3 x 3, no delineamento em blocos casualizados, 33 progênies, 40 repetições e uma planta por parcela.

Os itens i), ii), iii), iv), v) e vi) compõem banco ativo de *Pinus ssp.* instalados na FEPE, com a finalidade de fornecer fundamentos para pesquisas voltadas tanto para conservação quanto para o melhoramento genético florestal desta espécie (Figura 8).

Os itens v) e vi) foram tratamentos usados como testemunhas, pois as áreas v) e vi) não pertencem ao grupo de pinheiros do CCGMPT. A localização dos experimentos na FEPE está indicada na Figura 3 sendo A é a localização do PCB, PCC1, PCC2 e PCH, e B é a localização do CEV e TECU.

Figura 8. Localização das áreas experimentais na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP – Ilha Solteira, em Selvíria-MS, delimitadas em vermelho.



Fonte: Imagem Google Earth (2025).

4.2.4. Atributos químicos e físicos do solo

Foram coletadas amostras nas camadas 0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m (Figura 9) nas seguintes áreas de *Pinus*: PCB (*P. caribaea* var. *bahamensis*), PCH (*P. caribaea* var. *hondurensis*), PCC1 (*P. caribaea* var. *caribaea* 1), PCC2 (*P. caribaea* var. *caribaea* 2), CEV (competição de espécies e variedades), e TECU (*P. tecunumanii*).

Figura 9. Coleta de amostras indeformadas de solo em áreas cultivadas com variedades tropicais de *Pinus caribaea* (PCB, PCH, PCC1, PCC2), além das áreas de CEV (competição de espécies e variedades) e TECU (*Pinus tecunumanii*).



Fonte: Própria autora.

Em seguida foram conduzidas no Laboratório de Fertilidade de Solo da Universidade Estadual Paulista (UNESP), *Campus* de Ilha Solteira (Figura 3). Em cada área de estudo, foram escolhidos três pontos para a coleta das três camadas de solo. A imagem apresenta dois conjuntos distintos de amostras de solo, coletadas e preparadas para análises laboratoriais específicas. A parte superior da imagem (Figura 10A) mostra amostras de solo armazenadas em sacos plásticos transparentes identificados, representando o material coletado para análises químicas. Na parte inferior da imagem (Figura 10B) mostra amostras de solo acondicionadas em anéis de PVC, envoltos em papel para preservação de forma e volume, destinadas à análise física do solo. Esses anéis foram utilizados para mensurar propriedades como densidade do solo, porosidade total, macro e micro porosidade, bem como a retenção de água, parâmetros fundamentais para compreender a estrutura física do solo e sua influência sobre o desenvolvimento das plantas.

Figura 9. Amostras de solo sendo: (A) amostras destinadas às análises químicas, devidamente identificadas e armazenadas em sacos plásticos; (B) amostras indeformadas dispostas em anéis volumétricos para análises físicas, no Laboratório de Fertilidade do Solo da UNESP, campus de Ilha Solteira.



Fonte: Próprio autor (2022).

Para as análises químicas, foram analisados os seguintes atributos: Ca^{2+} (cálcio); Mg^{2+} (magnésio); K^{+} (potássio); Al^{3+} (alumínio); H^{+}Al (acidez potencial); pH (potencial hidrogeniônico) do solo; P (fósforo); C (carbono); MO (matéria orgânica); SB (soma das bases); CTC (capacidade de troca catiônica); S (enxofre); V (saturação

de bases); m (saturação de alumínio); B (boro); Cu (cobre); Fe (ferro); e Mn (manganês). As análises químicas e físicas foram realizadas com base na metodologia descrita por Raij, (2001).

Para as análises físicas, foram analisados: Macro (macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)); Micro (microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)); PT (porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)); Ds (densidade); teores de argila, areia e silte (g kg^{-1}) utilizando o método da pipeta (Raij, 2001). As análises físicas foram feitas também nos três pontos para de coleta das três camadas de solo.

4.2.5. Emissão de CO₂ e temperatura do solo

A medição da emissão de CO₂ (Figura 11) do solo foi realizada em seis áreas experimentais: PCB (*P. caribaea* var. *bahamensis*), PCH (*P. caribaea* var. *hondurensis*), PCC1 (*P. caribaea* var. *caribaea* 1), PCC2 (*P. caribaea* var. *caribaea* 2), CEV (competição de espécies e variedades), TECU (*P. tecunumanii*), no caso para comparação com os *Pinus* tropicais do CCGMPT.

Figura 11. Medição da emissão de CO₂ do solo com o uso do LI-8100 (LI-COR Biosciences), em área de cultivo de *Pinus caribaea*, no município de Selvíria-MS.



Fonte: Própria autora.

Em um período de 22 dias, entre 15/08/2022 e 05/09/2022, foram medidas a emissão de CO₂ do solo, nas segundas, quartas e sextas desse período, entre 8 as 17h, durante 22 dias, de 15 de agosto a 05 de setembro de 2022 (15, 17, 19, 22, 24, 26, 29, 31 de agosto e 2 e 5 de setembro), que corresponde aos dias julianos 227, 229, 231, 234, 236, 238, 241, 243, 245 e 248. A ordem da medição da emissão de CO₂ do solo ocorreu de forma aleatória, ou seja, cada dia uma determinada área era medida em horários diferentes.

Estas análises foram realizadas a partir de um sistema de fluxo de solo (LI-8100; LI-COR *Bioscience*, Nebraska, EUA), que possui sondas de monitorização de gases e equipamentos de medição de fluxo de CO₂ do solo (Figura 12). Estas sondas são colocadas em diferentes pontos da plantação para medir a quantidade de CO₂ liberada em tempo real.

Figura 12. Sistema LI-8100 (LI-COR *Biosciences*) em operação para medição da emissão de CO₂ do solo em ambiente florestal



Fonte: Própria autora.

Para esse estudo, foram estabelecidas seis áreas localizadas na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira que se localiza em Selvíria-MS. E em cada área foram analisados 15 pontos de amostragem usando colares de cloreto de polivinila (PVC) com diâmetro de 0,10 m e altura de 0,085 m; com os colares permanecendo fixos durante todo o experimento. O tempo de medida da emissão de CO₂ em cada ponto teve a duração de 90 segundos.

A temperatura do solo (Ts) foi determinada nos pontos estudados, com auxílio de um termômetro digital industrial (Figura 13). Foram coletado dados climatológicos (temperaturas médias (°C), precipitação (mm) e umidade relativa (%)) durante o período de estudo.

Figura 13. Termômetro a laser infravermelho utilizado para medição da temperatura do solo nos experimentos de *Pinus*.



Fonte: Própria autora.

4.2.6. Análises de dados

Todas as análises estatísticas foram realizadas no *Software R* versão 4.3.0, RStudio, Inc (R Core Team, 2023). Considerando diferenças significativas quando $p \leq 0,05$ em todos os testes estatísticos. A normalidade dos resíduos foi analisada de acordo com o teste de Shapiro Wilk e gráfico quantil-quantil e histogramas. Todas as variáveis foram analisadas por meio de análises de modelos lineares mistos, mediante

o pacote “lme4” (Bates *et al.*, 2022). O ajuste para o melhor modelo foi realizado por meio do procedimento de “*step-up*” mediante o critério de informação de Akaike (AIC) e pelo critério de informação bayesiano (BIC).

As variáveis Fe, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K, Al, pH, C, MO, SB, V%, m%, Areia e Silte, assim como emissão de CO_2 do solo e temperatura do solo, precisaram de transformação logarítmica para atender os pressupostos de normalidade, embora estejam apresentadas e descritas na escala original.

Nas análises dos atributos químicos e físicos do solo, foram considerados como efeitos fixos os tratamentos e as profundidades, assim como suas interações, no entanto os pontos de amostragem foram considerados como efeitos aleatórios. Para a análise estatística da emissão de CO_2 do solo (FCO_2) e temperatura do solo (St), foram considerados como efeitos fixos os tratamentos, dias de avaliação assim como suas interações e os pontos de amostragem como efeito aleatório. As comparações múltiplas para todas as variáveis entre as medias foram realizadas pelo teste de Tukey. Todos os dados são apresentados como a média ajustadas $\pm$ o erro padrão da média.

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Emissão de CO_2 e Temperatura do solo

Para emissão de CO_2 ocorreu um efeito significativo dos tratamentos ($F = 70,59$; $DF = 5,00$; $p < 0,01$), dias de avaliação ($F = 8,10$; $DF = 9$; $p < 0,01$) para interação entre tratamentos e dias de avaliação ($F = 2,58$; $DF = 45$; $p < 0,01$) (Figura 20). Esse padrão foi consistente, embora diferenças temporais tenham sido observadas dentro do mesmo tratamento, com reduções nos dias 6 ($2,27 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e 9 ($2,24 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), sugerindo uma possível influência das condições climáticas ou do manejo no sistema.

Da mesma forma, a temperatura do solo ocorreu um efeito significativo dos tratamentos ($F = 83,56$; $DF = 5,00$; $p < 0,01$), dias de avaliação ($F = 259,26$; $DF = 9$; $p < 0,01$) e na interação entre tratamentos e os dias avaliados ($F = 40,73$; $DF = 45$; $p < 0,01$) como apresentado na Tabela 3 e Figura 9. Por outro lado, o tratamento TECU apresentou os maiores valores de emissão em múltiplos dias de avaliação (por

exemplo, dia 2: $3,71 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; dia 5: $3,72 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), o que sugere uma maior atividade biológica no solo. Esse resultado pode estar relacionado ao uso da área como pastagem, onde a deposição de excretas animais pode ter contribuído para o aumento da emissão de CO_2 . Os tratamentos PCC1 e CEV apresentaram emissões elevadas no dia 1 do período avaliado (PCC1: $2,49 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; CEV: $2,71 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). No entanto, essas emissões reduziram nos dias subsequentes, demonstrando menor estabilidade temporal comparada ao TECU. Os tratamentos PCH, PCC2 e PCB apresentaram emissões intermediárias, com variação significativa ao longo dos dias. No caso de PCH, houve um aumento gradual nos valores, atingindo um pico no dia 6 ($1,59 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), seguido por um leve declínio.

Essa variação pode estar ligada à interação entre o material orgânico disponível e as condições ambientais. Os resultados evidenciam que os tratamentos influenciam significativamente tanto a emissão de CO_2 quanto a temperatura do solo.

O tratamento PCB apresentou a maior temperatura do solo no dia 9 ($38,3^\circ\text{C}$), mas não a maior taxa de emissão de CO_2 . Esse comportamento sugere que, além da temperatura, outros fatores, como umidade do solo, disponibilidade de substratos orgânicos e composição microbiana, possam estar modulando a resposta da respiração do solo.

Assim, o TECU se destacou como o mais ativo em termos de emissão de CO_2 , provavelmente devido à maior atividade biológica associada ao manejo da área. Esses resultados são relevantes para estratégias de manejo sustentável, pois permitem identificar sistemas que favoreçam o sequestro de carbono no solo e contribuam para a mitigação das mudanças climáticas.

Dessa forma, os resultados evidenciam a complexidade das interações entre temperatura do solo e emissão de CO_2 , sugerindo que fatores adicionais devem ser considerados para um entendimento mais abrangente do metabolismo do solo. Estudos futuros poderiam explorar a interação entre temperatura, umidade e qualidade da matéria orgânica para elucidar melhor os padrões observados.

Tabela 20. Variabilidade temporal da emissão de CO₂ e temperatura do solo nos tratamentos.

Dia	Tratamentos					
	Tratamentos Emissão de CO ₂ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$					
	PCH	PCC2	PCB	TECU	PCC1	CEV
1	0,53 Db	0,97 CDb	1,59 BCab	2,38 ABbc	2,49 ABa	2,71 Aa
2	0,96 BCa	1,93 BCab	2,28 BCa	3,71 Aa	1,63 Ca	2,66 Ba
3	1,32 Bab	1,65 Bab	1,83 Bab	3,39 Aab	1,92 Ba	2,22 Bab
4	1,52 Bab	1,59 Bab	2,18 Bab	3,17 Aabc	2,32 ABa	2,11 Bab
5	1,33 Bab	2,08 Ba	1,54 Bab	3,72 Aa	2,17 Ba	2,27 Bab
6	1,59 ABa	1,30 Bab	1,60 ABab	2,27 Ac	2,44 Aa	1,69 ABab
7	1,35 Bab	2,05 Ba	1,35 Bab	3,16 Aabc	1,88 Ba	1,60 Bb
8	1,26 Bab	1,06 Bab	1,49 Bab	3,15 Aabc	1,67 Ba	1,57 Bb
9	1,14 Bab	1,19 Bab	1,59 ABab	2,24 Ac	1,87 ABa	1,28 Bb
10	1,21 Bab	1,17 Bab	1,21 Bb	3,08 Aabc	1,69 Ba	1,45 Bb
	Temperatura do Solo °C					
1	25,6 Cc	35,5 Aa	22,9 Dde	30,5 Babc	26,4 Cab	32,6 Bab
2	20,8 ABd	22,4 Ae	20,7 ABef	17,3 Be	19,8 Bf	20,4 ABd
3	17,2 Be	21,5 Ae	17,9 Bf	18,0 Be	13,4 Cg	21,5 Ad
4	22,9 Bb	32,1 Abc	25,5 Cd	19,6 Ee	24,8 CDbcd	22,8 Dd
5	26,7 Cbc	21,9 De	23,2 Dde	30,3 Babc	24,2 CDbcd	34,6 Aa
6	27,3 BCbc	22,9 De	30,0 Ac	28,0 ABbcd	25,3 CDbc	26,7 BCc
7	27,3 Bbc	29,0 ABd	23,0 Cde	30,7 Aab	22,1 Cdef	29,9 Cb
8	25,5 Cc	20,6 De	33,8 Ab	32,7 ABa	21,4 Def	30,9 Bb
9	35,5 Ba	34,8 Bab	38,3 Aa	26,0 Dd	28,4 CDa	30,6 Cb
10	25,1 Bc	29,8 Acd	21,2 Ce	27,8 Acd	22,8 BCcde	30,1 Cb

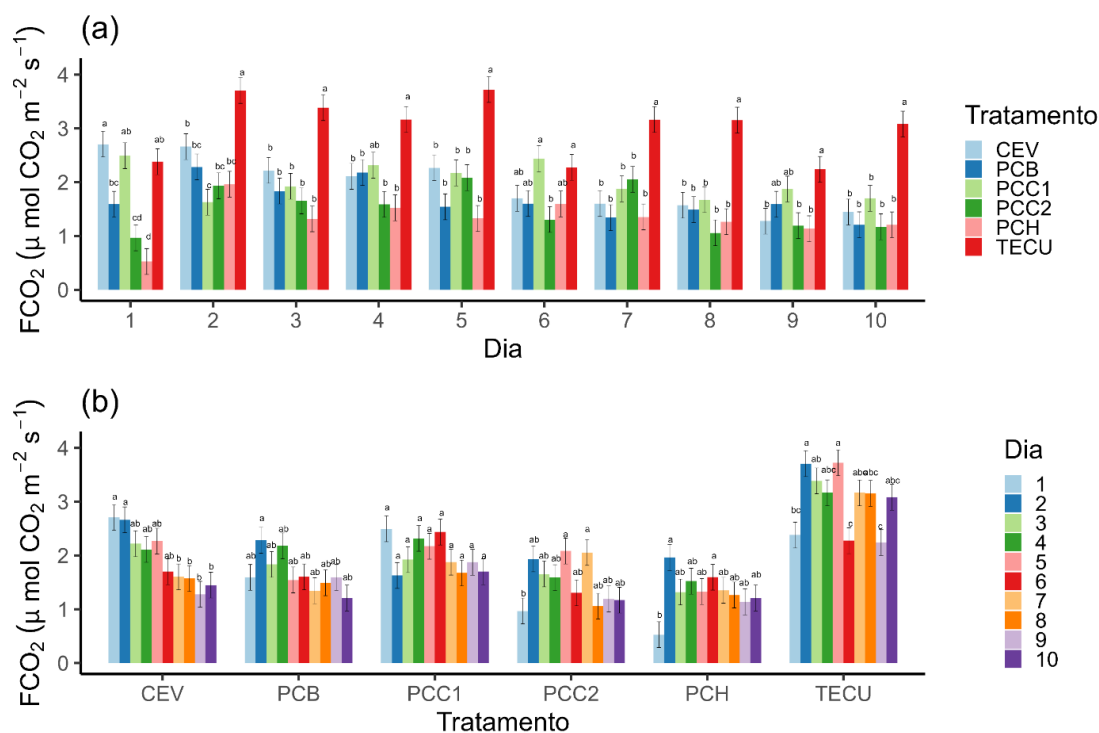
Nota: Letras maiúsculas (A-C) indicam diferenças significativas nas linhas, ou seja, diferenças entre os diferentes tratamentos por cada dia. Letras minúsculas (a-c) indicam diferenças significativas nas colunas, ou seja, diferenças de cada tratamento ao longo dos dias. Fonte: Própria autora.

Na Figura 14, é possível observar que o tratamento TECU apresentou as maiores emissões de CO_2 na maioria dos dias avaliados, com diferenças estatisticamente significativas em relação aos demais tratamentos na maioria dos dias, indicando maior taxa de respiração do solo associada a esse tratamento. O tratamento PCH, por outro lado, exibiu as menores emissões de CO_2 na maioria das avaliações, sugerindo condições menos favoráveis para os processos biológicos que levam à liberação de CO_2 do solo. Os tratamentos PCB, PCC1 e PCC2 apresentaram emissões intermediárias, com valores frequentemente similares entre si, mas inferiores ao PCH e TECU. Assim, para os tratamentos PCB, PCC1 e PCC2, observa-se uma variação mais moderada, com um padrão crescente menos acentuado, indicando uma resposta intermediária tanto ao tratamento quanto ao fator temporal.

Os resultados sugerem que os tratamentos TECU e PCH podem estar relacionados a condições que favorecem o aumento da atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica. A interação significativa entre os fatores "tratamento" e "dia de avaliação" indica que a dinâmica de emissão de CO_2 do solo é fortemente dependente tanto das condições impostas pelos tratamentos quanto da evolução temporal das avaliações. Esses achados reforçam a necessidade de investigar os mecanismos específicos associados a cada tratamento, como disponibilidade de carbono, umidade e temperatura do solo, que podem estar modulando as emissões de CO_2 .

Esses dados têm implicações importantes para a compreensão do impacto dos diferentes tratamentos sobre o ciclo de carbono no solo, sendo fundamentais para o desenvolvimento de práticas de manejo que promovam a sustentabilidade e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Figura 14. Variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) (média ± erro padrão da média). a) Efeito dos tratamentos em cada dia de avaliação. b) Efeito dos dias de avaliação para cada tratamento.

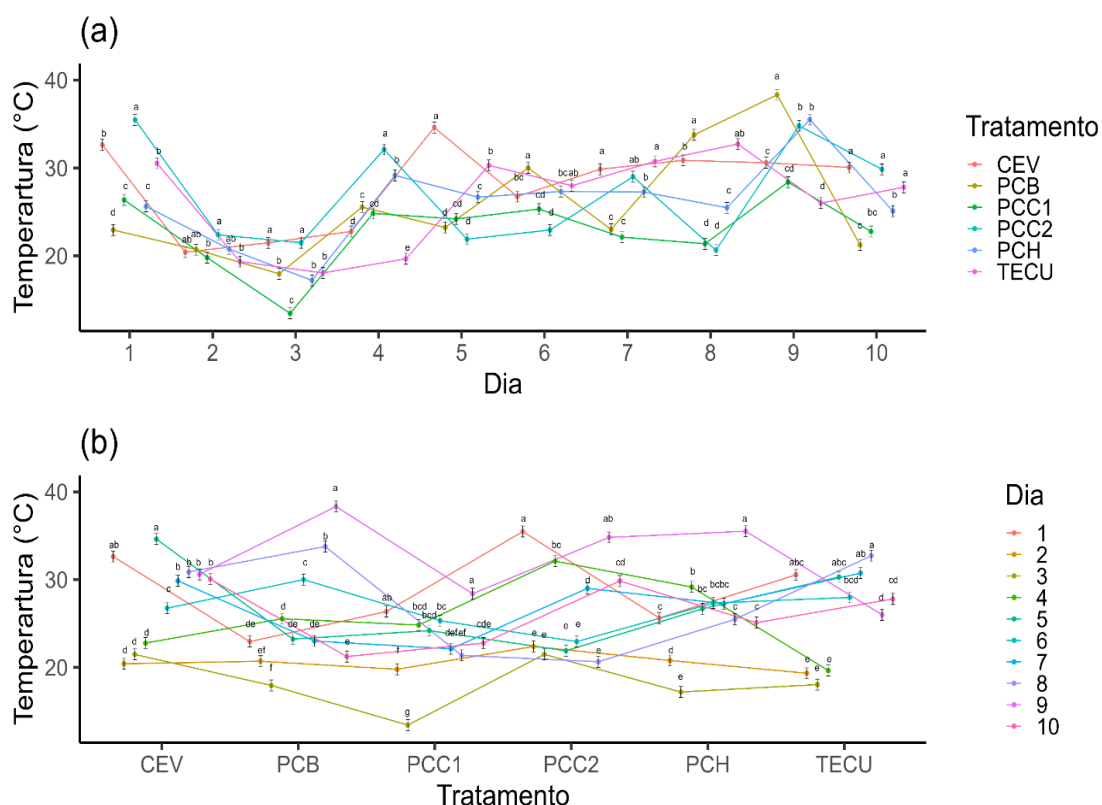


Fonte: Própria autora.

A temperatura do solo variou significativamente ao longo dos dias, com diferenças entre os tratamentos (Figura 15a). O tratamento PCC1 exibiu menores temperaturas em diversos dias, possivelmente devido a diferenças na cobertura do solo e na retenção de umidade. O tratamento TECU também apresentou variações expressivas ao longo do tempo, indicando influência das condições ambientais sobre a dinâmica térmica do solo. Também se verifica (Figura 15b) que a resposta térmica ao longo dos dias variou entre os tratamentos. O tratamento PCB manteve temperaturas elevadas na maior parte dos dias, enquanto PCC1 e PCH apresentaram maiores oscilações, sugerindo diferenças na capacidade térmica do solo associadas a fatores como textura, umidade e cobertura vegetal. O tratamento TECU demonstrou alta variação de temperatura, o que pode estar relacionado à exposição do solo e à atividade microbiana influenciada por insumos orgânicos presentes no local. Esses resultados reforçam a complexidade das interações entre temperatura do solo e

processos biogeoquímicos, destacando a importância de considerar múltiplos fatores ambientais na avaliação da respiração do solo.

Figura 15. Variabilidade temporal da Temperatura do solo (St) (média $\pm$ erro padrão da média). a) Efeito dos tratamentos em cada dia de avaliação. b) Efeito dos dias de avaliação para cada tratamento.



Fonte: Própria autora.

A Tabela 21 apresenta uma análise comparativa entre diferentes áreas experimentais — TECU, CEV, PCC1 e o grupo PCB/PCH/PCC2 — quanto à emissão de CO₂, temperatura do solo e as interpretações ecológicas.

A área TECU registrou os valores mais altos de emissão de CO₂ e de temperatura do solo, pois é um ambiente de solo altamente compactado devido à presença de gado no local, com pouca cobertura vegetal, favorecendo a mineralização da matéria orgânica e, conseqüentemente, o aumento das emissões de carbono para

a atmosfera. Essa condição reflete um solo com baixa qualidade ecológica, sujeito à degradação (Tabela 4).

Na área CEV, os níveis de emissão de CO₂ e a temperatura do solo também foram elevados, embora ligeiramente inferiores aos da TECU. Essa é uma área de subsolo, com algum grau de cobertura, porém ainda sujeito a processos de degradação, com baixa eficiência na retenção de carbono e estrutura física comprometida. Por outro lado, a área PCC1 apresentou emissão de CO₂ intermediária ou estável e temperatura do solo variável, com menor média, o que indica um ambiente mais equilibrado, com sombreamento parcial e presença de vegetação sub-bosque. Esses fatores contribuem para a manutenção da umidade e a moderação da temperatura, refletindo em uma condição ecológica mais estável.

As áreas PCB, PCH e PCC2 destacaram-se com os menores valores de emissão de CO₂ e temperatura do solo, evidenciando com maior sombreamento e cobertura orgânica (Tabela 4). Essas condições favorecem a conservação do carbono no solo, resultando em uma menor liberação de CO₂ para a atmosfera. Ecologicamente, essas áreas representam os melhores indicadores de qualidade ambiental, destacando-se como ambientes que promovem maior sustentabilidade e estabilidade dos processos do solo.

Tabela 21. Síntese dos resultados de ECO₂ e temperatura e interpretação ecológica, onde PCB – *Pinus caribaea* var. *bahamensis*; PCH – *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; PCC1 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* 1; PCC2 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* 2; CEV – Ensaio com variedades de *Pinus* do IPEF e TECU – *Pinus tecunumanii*

Aspecto	TECU	CEV	PCC1	PCB / PCH / PCC2
Emissão de CO ₂	Mais alta	Alta	Intermediária/ Estável	Baixa
Temperatura do solo	Alta	Alta	Variável/ menor média	Baixa
Interpretação ecológica	Solo compactado, exposto	Solo degradado, aquecido	Área sombreada, estável, sub-bosque	Maior conservação de carbono, sub-bosque

Fonte: Próprio autor.

4.3.2. Atributos físicos do solo

A avaliação dos atributos físicos do solo revelou diferenças significativas entre os tratamentos e profundidades, indicando que as práticas de manejo adotadas influenciam diretamente na estrutura e porosidade do solo. A densidade do solo (Ds) foi menor para o tratamento PCC1 nas três camadas de solo (1,20; 1,10; 1,00 m³ m⁻³ nas camadas 0,00-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m respectivamente), mostrando diferenças significativas desse tratamento com os demais, e revelando mais uma vez a influência positiva do sub-bosque dessa área até mesmo em camadas mais profundas solo (Tabela 22).

Os maiores valores de Ds ocorreram na camada superficial, porém, isso é algo esperado em áreas que ocorrem maior densidade e diversidade de plantas, principalmente de nativas, formando uma maior camada de serapilheira. Esse mesmo tratamento foi que menos emitiu CO₂. Devido a isso ocorreram diferenças significativas entre os outros tratamentos na maioria dos dias (Tabela 22), contribuindo para o estoque de carbono. Além disso, essa maior densidade de plantas no PCC1, levou a

diferenças significativas entre os outros tratamentos nas quantidades de macronutrientes (0,84; 1,14; 1,45 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas 0,00-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m respectivamente) e micronutrientes (4,75; 4,59; 4,70 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas 0,00-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m respectivamente), pois são nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas.

O tratamento CEV apresentou os menores valores de microporosidade em todas as profundidades (0,41; 0,32; 0,25 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas 0,00-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m respectivamente), com redução progressiva à medida que a profundidade aumentou (Tabela 22). Esse comportamento é atribuído à localização do CEV em área de solo degradado, caracterizada pela exposição do subsolo.

O tratamento PCC1 apresentou os maiores valores de Macro (0,83; 1,13; 1,44 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas) e Micro (4,78; 4,62; 4,73 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas) em todas as profundidades, indicando que este manejo favorece a estrutura do solo, proporcionando melhor aeração e infiltração de água. Este tratamento está localizado próximo a uma mata ciliar, com presença de sub-bosque, serrapilheira no solo. A presença de serrapilheira é fundamental para a manutenção da fertilidade do solo, contribuindo para a melhoria de suas propriedades físicas, como a porosidade (Holanda et. al, 2015). Além disso, as matas ciliares desempenham um papel crucial na conservação do solo e da água, influenciando positivamente a infiltração de água e a estrutura do solo.

Os atributos físicos do solo desempenham um papel fundamental na produtividade florestal, especialmente em plantações de *Pinus caribaea* e Pnheiros tropicais, cuja adaptação e desempenho dependem fortemente da qualidade do substrato onde estão cultivados. A porosidade total seguiu tendência semelhante à macroporosidade, sendo maior no tratamento PCC1 (5,58; 5,72; e 6,13 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas 0,00-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m respectivamente), confirmando sua contribuição para a estrutura do solo (Tabela 22). A densidade do solo (Ds) apresentou valores mais elevados nos tratamentos CEV (1,55; 1,95; 1,95 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas 0,00-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m), PCB (1,52, 1,35, 1,32 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas 0,00-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60m) e TECU (1,55; 1,35; 1,25 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas camadas 0,00-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m respectivamente).

Os teores de argila variaram significativamente entre os tratamentos e profundidades. Os maiores valores de argila foram observados no tratamento PCC1,

que apresentou 645 g kg^{-1} na camada de $0,0 - 0,20 \text{ m}$, 657 g kg^{-1} na camada de $0,20 - 0,40 \text{ m}$ e 662 g kg^{-1} na camada de $0,40 - 0,60 \text{ m}$ (Tabela 22). Esses resultados indicam uma maior capacidade de retenção de água e maior estabilidade estrutural, favorecendo o desenvolvimento radicular. Em contrapartida, os tratamentos CEV e PCH apresentaram os menores teores de argila, indicando solos com maior susceptibilidade à erosão e menor retenção hídrica. Segundo Lima *et al.* (2016), solos com maior teor de argila possuem maior capacidade de retenção de água, favorecendo o crescimento radicular e a disponibilidade hídrica para as plantas. Em contrapartida, o tratamento CEV apresentou os menores teores de argila, com 306 g kg^{-1} na camada de $0,0 - 0,20 \text{ m}$, 283 g kg^{-1} na camada de $0,20 - 0,40 \text{ m}$ e 273 g kg^{-1} na camada de $0,40 - 0,60 \text{ m}$, indicando solos com maior susceptibilidade à erosão e menor retenção hídrica.

De acordo com a análise de variância, os atributos físicos Macro, Micro, PT (Porosidade Total), Ds (Densidade do solo), Argila e Areia indicaram um efeito significativo da interação entre os tratamentos e as profundidades (Tabela 5). Para o atributo Silte, houve efeito significativo apenas entre tratamentos ($F = 37,83$; $p < 0,001$). Sendo que os tratamentos CEV, PCB, PCC1, PCC2, PCH e TECU, apresentaram valores de $49,1 \pm 8,43^d$; $86,2 \pm 4,97^b$; $144,3 \pm 8,43^a$; $81,5 \pm 7,08^{bc}$; $62,4 \pm 7,08^{cd}$ e $69,3 \pm 8,43^{bcd}$, respectivamente (medias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas; $p < 0,05$).

Tabela 22. Efeito da interação entre os tratamentos e as profundidades do solo para os atributos físicos do solo (Macro, Micro, PT (porosidade total), Ds (densidade do solo) Argila e Areia).

				Tratamento					
Atributos				Mean ± Sem					
Macro	CEV	PCB	PCC1	PCC2	PCH	TECU	F	P	
0.0 – 0.20	0,41 ± 0,14 Aa	0,39 ± 0,08 Ab	0,83 ± 0,14 Ab	0,48 ± 0,11 Ab	0,61 ± 0,11 Ab	0,40 ± 0,14 Ab	2,05	p=0,05	
0.20 – 0.40	0,32 ± 0,14 Ca	0,62 ± 0,08 BCab	1,13 ± 0,14 Aab	0,81 ± 0,11 ABCab	0,89 ± 0,11 ABab	0,78 ± 0,14 ABCab			
0.40 – 0.60	0,25 ± 0,14 Ca	0,86 ± 0,08 Ba	1,44 ± 0,14 Aa	1,06 ± 0,11 ABa	1,12 ± 0,11 ABa	1,13 ± 0,14 ABa			
Micro									
0.0 – 0.20	3,06 ± 0,10 Ca	3,74 ± 0,06 Bb	4,78 ± 0,10 Aa	3,82 ± 0,09 Ba	3,75 ± 0,09 Ba	3,68 ± 0,10 Ba	5,57	P<0,001	
0.20 – 0.40	2,68 ± 0,10 Cb	3,99 ± 0,06 Aa	4,62 ± 0,10 Ba	3,94 ± 0,09 Ba	4,01 ± 0,09 Ba	3,91 ± 0,10 Ba			
0.40 – 0.60	2,55 ± 0,10 Cb	4,00 ± 0,06 Aa	4,73 ± 0,10 Ba	3,91 ± 0,09 Ba	3,92 ± 0,09 Ba	3,93 ± 0,10 Ba			
PT									
0.0 – 0.20	3,44 ± 0,18 Ca	4,14 ± 0,10 Bb	5,58 ± 0,18 Aa	4,26 ± 0,15 Bb	4,31 ± 0,15 Bb	4,05 ± 0,18 ABb	4,49	P<0,001	
0.20 – 0.40	2,98 ± 0,18 Cab	4,61 ± 0,10 Ba	5,72 ± 0,18 Aa	4,71 ± 0,15 Bab	4,85 ± 0,15 Ba	4,66 ± 0,18 Bab			
0.40 – 0.60	2,77 ± 0,18 Cb	4,86 ± 0,10 Ba	6,13 ± 0,18 Aa	4,93 ± 0,15 Ba	5,00 ± 0,15 Ba	5,03 ± 0,18 Ba			
Ds									
0.0 – 0.20	1,55 ± 0,05 Ab	1,52 ± 0,03 Aa	1,20 ± 0,05 Ba	1,43 ± 0,04 Aa	1,40 ± 0,04 Aa	1,55 ± 0,05 Aa	14,75	P<0,001	
0.20 – 0.40	1,95 ± 0,05 Aa	1,35 ± 0,03 Bb	1,10 ± 0,05 Cab	1,27 ± 0,04 BCb	1,27 ± 0,04 BCb	1,35 ± 0,05 Bb			
0.40 – 0.60	1,95 ± 0,05 Aa	1,32 ± 0,03 Bb	1,00 ± 0,05 Cb	1,20 ± 0,04 Bb	1,20 ± 0,04 Bb	1,25 ± 0,05 Bb			
Argila									
0.0 – 0.20	306,00 ± 25,3 Ca	356,00 ± 14,3 BCb	645,00 ± 25,3 Aa	421,00 ± 20,5 Bb	351,00 ± 20,5 BCb	336,00 ± 25,3 BCb	2,88	P= 0,006	
0.20 – 0.40	283,00 ± 25,3 Ca	419,00 ± 14,3 Ba	657,00 ± 25,3 Aa	464,00 ± 20,5 Bab	401,00 ± 20,5 Bab	407,00 ± 25,3 Bab			
0.40 – 0.60	273,00 ± 25,3 Ca	448,00 ± 14,3 Ba	662,00 ± 25,3 Aa	492,00 ± 20,5 Ba	447,00 ± 20,5 Ba	485,00 ± 25,3 Ba			
Areia									
0.0 – 0.20	648,00 ± 26,7 Aa	561,00 ± 15,2 ABa	222,00 ± 26,7 Ca	501,00 ± 21,8 Ba	590,00 ± 21,8 Aa	599,00 ± 26,7 Aa	2,50	P=0,01	
0.20 – 0.40	660,00 ± 26,7 Aa	495,00 ± 15,2 Bb	192,00 ± 26,7 Ca	457,00 ± 21,8 Bab	529,00 ± 21,8 Bab	510,00 ± 26,7 Bb			
0.40 – 0.60	680,00 ± 26,7 Aa	462,00 ± 15,2 Bb	185,00 ± 26,7 Ca	419,00 ± 21,8 Bb	493,00 ± 21,8 Bb	451,00 ± 26,7 Bb			

Nota: Letras maiúsculas, indicam diferenças significativas entre tratamentos em cada profundidade (entre linhas) e as letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as profundidades de cada tratamento (colunas.) Fonte: Própria autora.

4.3.3. Atributos químicos do solo

Os resultados referentes aos atributos químicos do solo (Tabela 6) foram significativamente influenciados pela interação entre os tratamentos e as profundidades do solo, conforme demonstrado pelos valores de probabilidade ($p < 0,001$ para a maioria dos atributos analisados).

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) apresentou diferenças altamente significativas entre tratamentos e profundidades ($p < 0,001$). O tratamento PCC1 destacou-se com o maior valor na camada superficial (0,0 – 0,20 m: 87,5 mmolc/dm³), enquanto os tratamentos PCB, PCC2 e PCH apresentaram valores intermediários (65,5; 65,0 e 67,4 mmolc/dm³, respectivamente). O tratamento CEV demonstrou o menor valor (26,7 mmolc/dm³), indicando baixa capacidade de retenção de nutrientes. Com o aumento da profundidade, a CTC (Tabela 23) reduziu-se significativamente em todos os tratamentos, chegando a 21,8 mmolc/dm³ no tratamento CEV na camada 0,40 – 0,60 m.

O fósforo (P) também apresentou diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,001$). Na camada 0,0 – 0,20 m, o tratamento PCB apresentou a maior concentração de P (5,33 g/kg), enquanto os menores valores foram observados no tratamento TECU (0,90 g/kg) e PCH (1,29 g/kg) Na camada 0,0 – 0,20 m.

O tratamento PCC1 apresentou os maiores valores em todas as camadas, com 4,30 g kg⁻¹ na camada 0,0 – 0,20 m, 2,15 g/kg na camada 0,20 – 0,40 m e 1,55 g/kg na camada 0,40 – 0,60 m. Em contraste, o CEV apresentou os menores valores, variando de 0,35 g kg⁻¹ na camada superficial a 0,20 g/kg na camada mais profunda. A redução do Cu com a profundidade foi observada em todos os tratamentos.

Os teores de ferro (Fe) no tratamento PCB apresentaram o maior valor na superfície (35,00 g/kg), seguido de PCH (28,00 g/kg), enquanto o CEV apresentou o menor valor (9,50 g/kg) na camada superficial. Houve uma redução significativa dos teores de Fe com a profundidade, atingindo valores mínimos na camada 0,40 – 0,60 m, com CEV (2,50 g/kg) e TECU (4,00 g/kg).

O manganês (Mn) seguiu com diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos com ($p < 0,001$). O tratamento PCC1 apresentou concentração mais elevada na superfície (25,38 g/kg), reduzindo progressivamente com a profundidade. O tratamento CEV manteve valores consistentemente baixos em todas as profundidades, com mínimos de 1,18 g kg⁻¹ na camada 0,40 – 0,60 m.

Os teores de H+Al apresentou valores mais elevados observados em PCC1 na camada 0,0 – 0,20 m (80,0 g/kg). Os tratamentos PCB, PCC2 e PCH apresentaram valores intermediários (55,20; 54,0 e 60,0 g/kg, respectivamente). Os menores teores foram encontrados no CEV (20,00 g/kg). Com a profundidade, houve uma tendência geral de redução, atingindo valores entre 16,5 e 42,0 g kg⁻¹ nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-60 m.

Por fim, os teores de enxofre (S) na camada superficial, com maior valor foi encontrado em PCC1 (17,46 g kg⁻¹), enquanto os menores teores foram observados em CEV e TECU (5,96 e 1,96 g kg⁻¹, respectivamente). Na camada 0,20 – 0,40 m, houve um aumento expressivo dos teores no tratamento PCH (24,99 g kg⁻¹), evidenciando um efeito diferenciado da profundidade sobre a distribuição desse elemento (Tabela 23).

Em síntese, os resultados demonstram que a fertilidade do solo variou significativamente entre os tratamentos, sendo que PCC1 e PCB apresentaram maior disponibilidade de nutrientes na camada superficial, enquanto CEV manteve os menores teores para a maioria dos atributos. A tendência de redução dos teores com a profundidade reforça a influência dos processos de lixiviação e fixação dos elementos no solo, o que pode impactar diretamente a disponibilidade nutricional para as plantas e a produtividade das culturas.

Tabela 23. Efeito da interação entre os tratamentos e as profundidades do solo para os atributos químicos do solo (CTC, P, Cu, Fe, Mn, H+Al e S).

Tratamento							F	P	
Mean ± Sem									
Atributos	CTC	CEV	PCB	PCC1	PCC2	PCH	TECU		
0.0 – 0.20	26,7 ± 4,13 Da	65,5 ± 2,45 Ba	87,5 ± 4,13 Aa	65,0 ± 3,44 Ba	67,4 ± 3,44 Ba	50,3 ± 4,13 Ca	5,18	p< 0,001	
0.20 – 0.40	24,8 ± 4,13 Ba	47,9 ± 2,45 Ab	53,8 ± 4,13 Ab	47,6 ± 3,44 Ab	46,2 ± 3,44 Ab	41,6 ± 4,13 Aab			
0.40 – 0.60	21,8 ± 4,13 Ba	41,5 ± 2,45 Ab	45,8 ± 4,13 Ab	41,5 ± 3,44 Ab	41,5 ± 3,44 Ab	37,4 ± 4,13 Ab			
P									
0.0 – 0.20	1,90 ± 0,86 Ba	5,33 ± 0,49 Aa	2,90 ± 0,86 ABa	4,63 ± 0,69 ABa	3,96 ± 0,69 ABa	2,40 ± 0,86 Aa	2,59	p< 0,001	
0.20 – 0.40	1,40 ± 0,86 Aa	2,50 ± 0,49 Ab	1,40 ± 0,86 Aa	1,63 ± 0,69 Ab	1,29 ± 0,69 Ab	0,90 ± 0,86 Aa			
0.40 – 0.60	2,40 ± 0,86 Aa	1,17 ± 0,49 Ab	1,40± 0,86 Aa	0,96 ± 0,69 Ab	1,29 ± 0,69 Ab	1,40 ± 0,86 Aa			
Cu									
0.0 – 0.20	0,35 ± 0,16 Da	2,12 ± 0,09 Ca	4,30 ± 0,16 Aa	2,47 ± 0,13 BCa	2,50 ± 0,13 BCa	2,75 ± 0,16 Ba	14,45	p< 0,001	
0.20 – 0.40	0,30 ± 0,16 Ca	1,55 ± 0,09 Bb	2,15 ± 0,16 Ab	1,40 ± 0,13 Bb	1,40 ± 0,13 Bb	1,35 ± 0,16 Bb			
0.40 – 0.60	0,20 ± 0,16 Ba	1,15 ± 0,09 Ac	1,55 ± 0,16 Ac	0,97 ± 0,13 Ab	1,17 ± 0,13 Ab	0,95 ± 0,16 Ab			
Fe									
0.0 – 0.20	9,50 ± 4,66 Ca	35,00 ± 2,64 Aa	19,00 ± 4,66 BCa	16,67 ± 3,76 BCa	28,00 ± 3,76 ABa	14,50 ± 4,66 BCa	2,32	P= 0,02	
0.20 – 0.40	5,00 ± 4,66 Aa	13,87 ± 2,64 Ab	7,50 ± 4,66 Aa	11,00 ± 3,76 Aa	9,00 ± 3,76 Ab	6,50 ± 4,66 Aa			
0.40 – 0.60	2,50 ± 4,66 Aa	8,33 ± 2,64 Ab	5,00 ± 4,66 Aa	6,33 ± 3,76 Aa	6,67 ± 3,76 Ab	4,00 ± 4,66 Aa			
Mn									
0.0 – 0.20	2,23 ± 1,73 Ca	6,50 ± 0,98 Ca	25,38 ± 1,73 Aa	16,89 ± 1,40 Ba	20,23 ± 1,40 ABa	22,53 ± 1,73 ABa	12,65	P< 0,001	
0.20 – 0.40	1,78 ± 1,73 Ca	5,13 ± 0,98 BCa	10,08 ± 1,73 ABb	7,16 ± 1,40 BCb	6,26 ± 1,40 BCb	14,08 ± 1,73 Ab			
0.40 – 0.60	1,18 ± 1,73 Aa	3,45 ± 0,98 Aa	6,68 ± 1,73 Ab	3,99 ± 1,40 Ab	4,29 ± 1,40 Ab	7,63 ± 1,73 Ac			
H+Al									
0.0 – 0.20	20,00 ± 5,49 Ca	55,20 ± 3,11 Ba	80,0 ± 5,49 Aa	54,0 ± 4,43 Ba	60,0 ± 4,43 ABa	23,5 ± 5,49 Ca	3,24	P=0,002	
0.20 – 0.40	16,5 ± 5,49 Ca	39,8 ± 3,11 ABb	49,5 ± 5,49 Ab	36,3 ± 4,43 ABCb	39,3 ± 4,43 ABb	24,5 ± 5,49 BCa			
0.40 – 0.60	16,5 ± 5,49 Ba	33,3 ± 3,11 Ab	42,0 ± 5,49 ABb	30,0 ± 4,43 ABb	34,0 ± 4,43 ABb	24,5 ± 5,49 ABa			
S									
0.0 – 0.20	5,96 ± 3,23 ABa	3,33 ± 1,83 Ba	17,46 ± 3,23 Aa	9,66 ± 2,61 ABb	8,99 ± 2,61 ABa	1,96 ± 3,23 Ba	5,35	P< 0,001	
0.20 – 0.40	5,46 ± 3,23 Ba	9,33 ± 1,83 Ba	6,46 ± 3,23 Bb	19,33 ± 2,61 Aa	24,99 ± 2,61 Ab	1,96 ± 3,23 Ba			
0.40 – 0.60	2,46 ± 3,23 Aa	7,00 ± 1,83 Aa	4,46 ± 3,23 Ab	10,99 ± 2,61 Aab	7,66 ± 2,61 Ab	1,96 ± 3,23 Aa			

Nota: Letras maiúsculas, indicam diferenças significativas entre tratamentos em cada profundidade (entre linhas) e as letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as profundidades de cada tratamento (colunas). Fonte: Própria autora.

A análise dos atributos químicos do solo revelou que os fatores tratamentos e profundidades apresentaram efeitos significativos de forma independente para Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al, pH, C, MO, SB, V%, m% e B como é apresentado na tabela 3.

Em relação ao cálcio (Ca^{2+}), observou-se uma maior concentração para o tratamento TECU, (10,66). Quanto às profundidades, não houve diferença significativa ($p = 0,27$), evidenciando que a distribuição desse nutriente é relativamente homogênea ao longo do perfil do solo (Tabela 24).

Para o magnésio (Mg^{2+}), o tratamento TECU foi o que apresentou os maiores teores (7,33), enquanto a profundidade não impactou significativamente a concentração desse elemento ($p = 0,23$).

O potássio (K^+) apresentou maior concentração para o tratamento TECU (0,87), e observou-se uma redução nos teores à medida que a profundidade aumentou.

O alumínio (Al) apresentou um padrão de variação expressivo entre os tratamentos, com os maiores valores em PCH (11,12) e PCC1 (11,87). A profundidade também apresentou diferença entre os tratamentos com teores mais elevados na camada superficial (11,19 0, na camada 0,00 – 0,20 m), diminuindo com a profundidade. Esse comportamento pode estar relacionado à atividade biológica e à influência da matéria orgânica.

Os valores mais elevados de pH do solo ocorreram no tratamento TECU (5,14) e os menores em PCH (4,05). No entanto, a profundidade não influenciou significativamente o pH ($p = 0,11$), indicando que as diferenças observadas são atribuídas principalmente às práticas de manejo adotadas nos diferentes tratamentos.

Os teores de carbono (C) e matéria orgânica (MO) foram mais elevados em PCB, PCC1 e PCH, sugerindo que esses tratamentos promovem maior acúmulo de matéria orgânica no solo. Em relação à profundidade, observou-se uma redução significativa nos teores de C e MO em camadas mais profundas, o que reflete a decomposição e incorporação da matéria orgânica na superfície (Tabela 24).

A soma de bases (SB) foi mais elevada em TECU (20,20). Já a profundidade não teve efeito significativo sobre essa variável ($p = 0,23$). A saturação por bases (V%) teve valores mais elevados em TECU (44,2), sugerindo um solo mais fértil nesse tratamento. A profundidade, no entanto, não apresentou efeito significativo ($p = 0,91$).

A saturação por alumínio (m%) foi mais elevada nos tratamentos PCH (63,4) e PCC1 (69,3), indicando maior acidez do solo nesses tratamentos. A profundidade não afetou significativamente essa variável ($p = 0,21$).

O boro (B) apresentou maior teor no PCC1 (0,17). Dessa forma, a análise dos resultados indica que os tratamentos têm um papel fundamental na dinâmica dos atributos químicos do solo, enquanto a profundidade afeta significativamente apenas alguns desses atributos, como K^+ , Al, C e MO.

Tabela 24. Efeito dos tratamentos e das profundidades do solo para os atributos químicos do solo Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al, pH, C, MO, SB, V%, m% e B.

Tratamentos									Profundidade					
Média ± erro									Média ± erro					Tratamento x Profundidade
Atributos	CEV	PCB	PCC1	PCC2	PCH	TECU	F	p-valor	0.0 – 0.20	0.20 – 0.40	0.40 – 0.60	F	p-valor	F; p-valor
Ca^{2+}	2,66 ± 2,02b	5,22 ± 1,12ab	1,33 ± 2,02b	4,85 ± 1,63ab	2,74 ± 1,63b	10,66 ± 2,02a	5,75	P< 0,001	5,67 ± 1,33	4,39 ± 1,33	3,67 ± 1,33	1,32	P=0,27	F=0,23; p=0,99
Mg^{2+}	3,50 ± 1,09ab	3,06 ± 0,59b	3,17 ± 1,09ab	5,00 ± 0,86ab	3,11 ± 0,86b	7,33 ± 1,09b	4,88	P< 0,001	4,92 ± 0,68	4,00 ± 0,68	3,67 ± 0,68	1,51	P= 0,23	F= 1,63; p=0,20
K^+	0,53 ± 0,06b	0,61 ± 0,03b	0,63 ± 0,06ab	0,66 ± 0,04ab	0,64 ± 0,05ab	0,87 ± 0,06a	5,57	P< 0,001	0,76 ± 0,04a	0,64 ± 0,04ab	0,58 ± 0,04b	9,31	P< 0,001	F= 0,99; p=0,46
Al	3,20 ± 1,78bc	10,89 ± 0,97a	11,87 ± 1,78a	9,57 ± 1,40ab	11,12 ± 1,40a	2,53 ± 1,78c	11,24	P<0,001	11,19 ± 1,11a	7,44 ± 1,11b	5,97 ± 1,11b	11,36	P<0,001	F=1,11; p=0,38
pH	4,71 ± 0,19ab	4,23 ± 0,11bc	4,11 ± 0,19bc	4,23 ± 0,16bc	4,05 ± 0,16c	5,14 ± 0,19a	10,80	P< 0,001	4,27 ± 0,13	4,44 ± 0,13	4,52 ± 0,13	2,31	P=0,11	F=0,10; p=1,00
C	4,49 ± 0,44b	7,54 ± 0,24a	7,58 ± 0,44a	6,82 ± 0,35a	6,95 ± 0,35a	7,48 ± 0,44a	14,17	P<0,001	8,36 ± 0,28a	6,33 ± 0,28b	5,74 ± 0,28b	44,83	P<0,001	F=0,94; p=0,50
MO	7,74 ± 0,76b	13,00 ± 0,41a	13,07 ± 0,76a	11,75 ± 0,60a	11,97 ± 0,60a	12,90 ± 0,76a	14,17	P<0,001	14,42 ± 0,48a	10,92 ± 0,48b	9,89 ± 0,48b	44,83	P<0,001	F= 0,94; P=0,50
SB	8,03 ± 2,95b	8,89 ± 1,61b	6,47 ± 2,95b	11,32 ± 2,33ab	7,31 ± 2,33b	20,20 ± 2,95a	5,31	P<0,001	12,29 ± 1,83	9,97 ± 1,83	8,86 ± 1,83	1,52	P=0,23	F=0,57; p=0,82
V%	31,2 ± 5,52ab	17,4 ± 3,01b	10,30 ± 5,52b	23,6 ± 4,35b	14,7 ± 4,35b	44,2 ± 5,52a	9,47	P<0,001	22,7 ± 3,43	24,3 ± 3,43	23,7 ± 3,43	0,09	P=0,91	F=0,56; p=0,84
m%	27,0 ± 10,34bc	58,8 ± 5,97ab	69,3 ± 10,34a	47,3 ± 8,60abc	63,4 ± 8,60a	16,7 ± 10,34c	10,34	P<0,001	52,8 ± 7,2	46,3 ± 7,2	42,2 ± 7,2	1,61	P=0,21	F=0,31; p=0,97
B	0,07 ± 0,02c	0,09 ± 0,02c	0,17 ± 0,02a	0,11 ± 0,02bc	0,16 ± 0,02ab	0,10 ± 0,02bc	12,29	P<0,001	0,13 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,02	2,11	P=0,13	F=0,49; p=0,88

Nota: Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey p<0,05. Fonte: Própria autora.

Análise de média indicou diferenças significativas entre as medias dos tratamentos e as medias das temperaturas (Tabela 25). A emissão de CO₂ foi maior no tratamento TECU (3,03), seguido por PCC1 (2,01), indicando maior atividade biológica nesses tratamentos. Quanto à temperatura do solo, o tratamento CEV apresentou a maior média (28,0°C), enquanto PCC1 teve a menor (22,9°C). Essas diferenças podem estar relacionadas à cobertura vegetal e à umidade do solo, fatores que influenciam a dissipação térmica e a atividade microbiana.

Tabela 25. Análise de média da emissão de CO₂ e temperatura do solo entre os tratamentos de *Pinus* spp.

Variáveis	PCH	PCC2	PCB	TECU	PCC1	CEV
Emissão de CO ₂	1,32 e	1,50 de	1,67 cd	3,03 a	2,01 b	1,96 bc
Temperatura do solo	26,0 c	27,1b	25,7 c	26,3 bc	22,9 d	28,0 a

Nota: Letras minúsculas (a-e) indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as medias dos tratamentos para Emissão de CO₂ e temperatura do solo. Fonte: Própria autora.

4.4. DISCUSSÃO

Vicentini *et al.*, (2019) encontraram variação para FCO₂ ao longo dos 193 dias (dias julianos). No *Pinus*, a variação atingiu um valor mínimo de 2,654 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no 85º dia e um valor máximo de 5,065 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no 123º dia. Em geral, os valores médios simultaneamente variaram de 4,407 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no primeiro dia até o pico de 7,106 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no 102º dia. Livesley *et al.*, (2009) analisaram a troca de gases de efeito estufa (CO₂, N₂O e CH₄) entre solo e atmosfera em quatro sistemas de uso da terra: floresta nativa, pastagem com capim-trevo, plantação de *Pinus radiata* e plantação de *Eucalyptus globulus*. Constatou-se que o florestamento de pastagens com *P. radiata* e *E. globulus* aumentou o sequestro de carbono, reduziu as emissões de N₂O e aumentou a absorção de CH₄, evidenciando seu impacto positivo no balanço de gases de efeito estufa.

Oliveira *et al.* (2003) quantificaram o efluxo de CO₂ (ECO₂) entre o solo e a atmosfera em duas áreas no sudoeste da Amazônia — uma floresta secundária (AFS)

e um campo natural (ACN) — ao longo de um ano. Na AFS, o ECO_2 médio foi de $2,04 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na estação chuvosa e caiu para $1,61 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na seca, refletindo menor atividade microbiana devido à redução da umidade e maior compactação do solo, temperatura superficial média na AFS foi inferior à do ACN, com $25,79^\circ\text{C}$ na estação chuvosa e $26,60^\circ\text{C}$ na seca, indicando o efeito de sombreamento da vegetação densa. A temperatura do solo exerce papel crucial no desenvolvimento inicial das mudas de *Pinus*, afetando, tanto o crescimento da parte aérea quanto o das raízes. Pesquisas conduzidas em ambientes controlados indicam que mudas de *Pinus sylvestris* expostas a temperaturas do solo entre 5°C e 20°C tiveram seu crescimento vegetativo significativamente reduzido em temperaturas mais baixas, próximas a 5°C , enquanto temperaturas mais altas promoveram o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular.

Oliveira *et al.* (2023) revelaram que o efluxo de CO_2 do solo em uma pastagem recentemente arborizada foi de $0,37 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, representando uma redução de 56% em relação à pastagem nativa antes do reflorestamento. Isso indica que o reflorestamento com eucalipto pode reduzir as taxas de respiração do solo nos primeiros anos após a conversão. Ramos (2018) avaliou cinco sistemas de uso da terra e identificou que a floresta de eucalipto teve as maiores emissões de CO_2 ($4,55 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), enquanto a floresta de pinheiros apresentou as menores ($2,98 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), evidenciando o impacto das práticas agrícolas nas emissões. Quanto ao estoque de carbono no solo, o sistema silvipastoril ocorreu o maior valor (17 Mg ha^{-1}), enquanto na floresta de pinheiros ocorreu o menor ($11,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), ressaltando a influência do uso da terra na retenção de carbono.

A movimentação de oxigênio no solo ocorre predominantemente por difusão, um processo influenciado por propriedades físicas do solo, como textura, estrutura, porosidade e teor de umidade (Neira *et al.*, 2015).

Xiao *et al.* (2019) relataram que a presença de serrapilheira de coníferas reduziu a taxa de decomposição, devido à menor concentração de nitrogênio em sua composição. Além disso, os autores demonstraram que essa menor disponibilidade de nitrogênio pode impactar negativamente a atividade dos microrganismos decompositores.

Barret e Golfari (1962) concluíram que o pH ideal para o crescimento do *Pinus caribaea* var. *caribaea* situa-se entre 4,5 e 6,0; para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*,

entre 4,0 e 6,5; e para o *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, entre 7,5 e 8,5. Barbosa *et al.*, (2011) pH do solo foi destacado como um indicador importante da qualidade química do solo, influenciando positivamente a produtividade de madeira em plantios comerciais, conforme demonstrado em estudos no cerrado brasileiro.

4.5. CONCLUSÕES

As análises evidenciam que os tratamentos influenciam significativamente tanto a emissão de CO₂ quanto a temperatura do solo. O tratamento TECU se destacou como o mais ativo em termos de emissão de CO₂, provavelmente devido à maior atividade biológica associada à cobertura vegetal.

A disponibilidade de nutrientes essenciais, como Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, varia de acordo com os tratamentos, que também alteram os níveis de acidez (pH e Al³⁺) e o teor de matéria orgânica do solo. A profundidade do solo interfere em alguns atributos específicos, como K⁺, Al³⁺, C e MO, mas não apresenta interação significativa com os tratamentos.

A temperatura do solo varia entre os tratamentos. CEV apresenta os valores mais elevados, enquanto o PCC1 registra as menores temperaturas. Isso confirma que diferentes práticas de manejo e condições ambientais modificam diretamente as trocas gasosas do solo e sua temperatura.

Os diferentes testes de *Pinus* mostram que o manejo influencia a dinâmica do solo, influenciando sua fertilidade, acidez e processos biológicos. Compreender essas interações permite desenvolver estratégias sustentáveis de manejo, que mantêm a qualidade do solo e favorecem a produtividade florestal.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, C. E. M.; FERRARI, S.; CARVALHO, M. P.; PICOLI, P. R. F.; CAVALLINI, M. C.; BENETT, C. G. S.; SANTOS, D. M. Inter-relação da produtividade de madeira do *Pinus* com atributos físico-químicos de um Latossolo do Cerrado brasileiro. **Revista árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 25–35, 2012.
- BARRET, W.; GOLFARI, L. H. Descripción de dos nuevas variedades del “Pino del Caribe” (*Pinus caribaea* Morelet.). **Caribb for**, v. 23, n. 2, p. 59–71, 1962.
- BATES, D.; MAECHLER, B.; BOLKER, B.; WALKER, S. Linear mixed-effects models using ‘Eigen’ and S4. R package lme4. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/lme4.pdf>
- BRUN, E. J.; BRUN, F. G. K.; MEYER, E. A.; TRUEBY, P.; SCHUMACHER, M. V. **Qualidade do solo de *Pinus* no Sul do Brasil**. Curitiba: Apris, 2020. 151 p.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BARICHELLO, L. R.; VOGEL, H. L. Determinação de carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* de Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista acad ciênc agrár ambient**, v. 1, n. 2, p. 47–54, 2003.
- CARVALHO, R. R.; TRAUTENMÜLLER, J. W.; COSTA JUNIOR, S.; SILVA, D. A.; CORTE, A. P. D.; FIGUEIREDO FILHO, A. Carbono de um plantio misto de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm. **Silvic Manejo Florest**, v. 1, p. 72–84, 2021.
- CORRÊA, R. S.; BELLOTE, A. F. J. Soil attributes and biomass yield from *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 181–187, 2011.
- CUNNIGHAN, A. Pine resin: biology, chemistry and applications. In: FETT NETO, A. G.; RODRIGUES-CORREA, K. C. S. (ed.). **Pine tapping recent advances**. Boston: PCA, 2012. p. 1–8.
- COOK-PATTON, S. C.; LEAVITT, S. M.; GIBBS, D.; HARRIS, N. L.; LISTER, K.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J. Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth. **Nature**, London, v. 585, p. 545–565, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2686-x>
- GUERREIRO, S. F.; SARTORI, A. A. C.; BARBOSA, F. T.; KASPARY, R. M.; MARTINS, M. S.; MARCHIORI, L. M. Estimativa de biomassa e carbono em floresta plantada adotando o modelo de Schumacher & Hall: estudo de caso. **Revista Agronegócio Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. 1–9, 2021.
- HOLANDA, A. C.; FELICIANO, A. L. P.; MARANGON, L. C.; FREIRE, F. J.; HOLANDA, E. M. Decomposição da serapilheira foliar e respiração edáfica em um remanescente de Caatinga na Paraíba. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 2, p. 245–254, 2015.
- IBÁ. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ**. Brasília: IBÁ, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>

LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, p. 1469–1473, 2000.

LIVESLEY, S. J.; PETER, K. R.; MIEHLE, P.; WESTON, C. J.; BUTTERBACH-BAHL, K.; ARNDT, S. K. Soil–atmosphere exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture, and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. **Global Change Biology**, Chichester, v. 15, n. 2, p. 425–440, 2009.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das gimnospermas**. Santa Maria: UFSM, 2005. 158 p.

MARTINI, S.L.; ENGEL V.L. **Relatório final de implantação: Centro de Conservação Genética e Melhoramento de Pinheiros Tropicais – CCGMPT**. Instituto De Pesquisas E Estudos Florestais. Piracicaba, 1985.

NEIRA, J.; ORTIZ, M.; MORALES-SALINAS, L.; ACEVEDO, E. Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Chillan, v. 75, n. 3, p. 35-44, 2015.

PEIXOTO, K. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MARIMON, B. S.; ELIAS, F.; FARIAS, J.; FREITAG, R.; MEWS, H. A.; NEVES, E. C.; PRESTES, N. C. C. S.; MALHI, Y. Unravelling ecosystem functions at the Amazonia-Cerrado transition: II. Carbon stocks and CO₂ soil efflux in cerradão forest undergoing ecological succession. **Acta Oecol**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 82, p. 23–31, 2017.

PINTO-JUNIOR, O. B.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A. C.; NOGUEIRA, J. S. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia-Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 4, p. 813–922, 2009.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação de fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100).

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

RAMOS, J. C. A. **Emissão de CO₂, quantidade e qualidade do carbono do solo em sistemas agrícolas na região do Cerrado do Mato Grosso do Sul**. 2018. Dissertação (Mestrado). [S.l.: s.n.], 2018.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BEHLING, A.; CORTEZ, L. S. R.; ZILIOTI, G. J.; MAAS, G. The role of forests in climate change. **Quebracho**, 2011, v. 19, n. 1–2, p. 84–96.

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**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 60-68, 2013.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SILVA, A. M.; AGUIAR, A. V.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; BUZETTI, S. Recuperação de áreas degradadas com a utilização de diferentes espécies e variedades de *Pinus*. **Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 11, n. 1, p. 1–11, 2002.

SILVA, L. B.; NOVAIS, J. W. Z.; SANCHES, L.; MACHADO, N. G.; AQUINO, A. M.; SALLO, F. S. Serrapilheira e efluxo de CO₂ do solo em floresta sazonalmente alagável no Pantanal Brasileiro. **Ens Cienc Ciênc Biol Agrár Saúde**, Campo Grande, v. 21, n. 3, p. 178–182, 2017.

SHIMIZU, J. Y. **Pínus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

VICENTINI, M. E.; PINOTTI, C. R.; HIRAI, W. Y.; MORAES, M. L. T.; MONTANARI, R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; MILORI, D. M. B. P.; LA SCALA JUNIOR, N.; PANOSSO, A. R. CO₂ emission and its relation to soil temperature, moisture, and O₂ absorption in the reforested areas of Cerrado biome, Central Brazil. **Plant Soil**, v. 444, p. 193–211, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04254-7>.

XIAO, W.; CHEN, H. Y. H.; KUMAR, P.; CHEN, C.; GUAN, Q. Multiple interactions between tree composition and diversity and microbial diversity underlie litter decomposition. **Geoderma**, 2019, v. 341, p. 161–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.006>.

5. CONCLUSÃO GERAL

Os principais achados revelaram diferenças marcantes entre os tratamentos quanto à emissão de CO₂ do solo, temperatura, atributos físicos e químicos do solo, refletindo as influências ambientais sobre o desempenho das populações.

Comparando os dados dos diferentes estudos incluídos no capítulo 1, observou-se que áreas manejadas com presença de gado (TECU e CEV) apresentaram os maiores fluxos de CO₂ do solo e, simultaneamente, em alguns dias de avaliação, menores teores de macro e micronutrientes em algumas profundidades.

Do ponto de vista do melhoramento genético, os dados reforçam a relevância de considerar não apenas o desempenho produtivo em termos de resina e madeira, mas também a influência dos genótipos sobre o solo e o ambiente ao longo do tempo.

A interação entre genótipo e ambiente, especialmente no que diz respeito ao manejo do solo e à presença de vegetação associada, mostrou-se um fator decisivo na manutenção do equilíbrio dos ecossistemas plantados.

A presente pesquisa permitiu evidenciar importantes aspectos da variabilidade genética e ecológica de genótipos de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *bahamensis* provenientes do CCGMPT, em função de diferentes sistemas de resinagem e ambientes de cultivo.

As contribuições dessa pesquisa ampliam o entendimento sobre a variação genética funcional das variedades tropicais de *Pinus*, destacando como determinadas combinações genéticas podem influenciar positivamente a resiliência dos sistemas de cultivo, a conservação do solo e o potencial de sequestro de carbono.

Esta pesquisa fornece contribuições inéditas ao revelar o comportamento genético de longo prazo das três variedades tropicais de *Pinus caribaea* em condições edafoclimáticas brasileiras. A adoção de análises com o método REML/BLUP e a reavaliação aos 35–39 anos conferiram maior confiabilidade às estimativas genéticas e possibilitaram:

Confirmar que o desbaste seletivo melhora a expressão genética e a herdabilidade, especialmente para *bahamensis* e *caribaea*, sendo uma prática recomendada para favorecer a seleção precoce.

Evidenciar o potencial de algumas famílias superiores com desempenho simultâneo em volume e resina, como as famílias 8, 73 e 84 da variedade *hondurensis*, indicativas de material genético promissor para seleção múltipla.

Fundamenta tecnicamente a formação de pomares de sementes clonais ou de base para cruzamentos futuros, considerando as famílias ranqueadas e a estabilidade fenotípica.

Ao integrar dados de atributos do solo e emissão de CO₂ com análises genéticas, a pesquisa traz uma abordagem inovadora que conecta produtividade e sustentabilidade.

Dentre as principais limitações do estudo, destaca-se a avaliação em um único período do ano, o que restringe a análise da sazonalidade das emissões de CO₂ e da dinâmica dos nutrientes no solo. Sendo assim, recomenda-se para futuras pesquisas:

- A realização de avaliações sazonais, em diferentes períodos do ano, para capturar melhor a variabilidade temporal das emissões de CO₂ e a resposta dos genótipos;
- O uso de ferramentas de genotipagem molecular para aprofundar a caracterização genética dos indivíduos selecionados;
- A ampliação dos testes de resinagem em diferentes sistemas silviculturais e condições edafoclimáticas, incluindo análises integradas de produção de resina, crescimento em volume e impacto ambiental;
- A investigação longitudinal da interação genótipo × ambiente, visando ao desenvolvimento de modelos preditivos para seleção de genótipos mais adaptados às condições tropicais e mais eficientes na conservação de recursos naturais.

Os resultados obtidos servem como subsídio técnico e científico para orientar práticas de manejo florestal mais sustentáveis e eficazes, além de contribuir com a base genética necessária para o aprimoramento contínuo dos programas de melhoramento de *Pinus caribaea* no Brasil.

ANEXO A – Croqui de campo do *Pinus caribaea* var. *bahamensis* na FEPE

TESTE DE PROGÊNIES de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* I.
Sem adubação no plantio
Instalação: 20 a 21/03/90: Espaçamento: 3,0 x 3,0 metros;
Local: FEP – Selviria(MS): Delineamento: Látice Quadrado 11 x 11
Triplo – parcialmente balanceando: n° de plantas/parcela: 6

CROQUI DE CAMPO

															TR - EU																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"		"	

Fonte: MISSIO (2004); SILVA (2024).

ANEXO B – Croqui de campo do *Pinus caribaea* var. *caribaea* 1 na FEPE

TESTE DE PROGÊNIES DE *Pinus caribaea* var. *caribaea* I

INSTALAÇÃO: 31/05/88; ESPAÇAMENTO: 3 x 3 m; LOCAL: FEP-Selvira/MS;

PLANTAS/PARCELA: 10 (I e II), 9 (III) e 5 (IV); DELINEAMENTO: Blocos Casualizados.

		TP-AROEIRA SOL																			
C E H E		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		*	*	REP I						*	*	REP IV						*	*		
		*	*	49	66	43	72	55	*	*	*	*	7	37	74	73	21	*	*		
		*	*	76	56	54	9	47	*	*	*	*	75	25	6	57	60	*	*		
		*	*	29	52	75	48	45	*	*	*	*	40	62	47	19	49	*	*		
		*	*	73	65	78	67	2	*	*	*	*	50	63	31	43	48	*	*		
		*	*	70	59	31	27	28	*	*	*	*	20	72	35	54	34	*	*		
		*	*	38	23	39	8	57	*	*	*	*	14	55	3	70	1	*	*		
		*	*	64	12	30	4	32	*	*	*	*	36	10	33	77	41	*	*		
E M I		*	*	36	6	51	69	41	*	*	*	*	52	27	9	39	13	*	*		
		*	*	22	44	42	26	13	*	*	*	*	65	64	53	38	2	*	*		
		*	*	11	20	68	7	15	*	*	*	*	24	42	61	80	30	*	*		
		*	*	14	77	71	18	50	*	*	L	*	29	22	46	78	15	*	*		
		*	*	16	1	60	34	63	*	*	I	*	67	45	69	56	79	*	*		
		*	*	35	61	24	5	33	*	*	N	*	59	76	26	28	18	*	*		
		*	*	17	74	79	80	37	*	*	H	*	44	58	51	23	16	*	*		
		*	*	19	25	10	58	3	*	*	A	*	5	12	4	32	71	*	*		
		*	*	53	62	40	21	46	*	*	D	*	8	68	11	17	66	*	*		
		*	*	*	*	*	*	*	*	*	E	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
		*	*	REP II						*	*	REP III						*	*		
		*	*	66	38	51	5	26	*	*	*	*	30	76	54	28	4	*	*		
		*	*	64	79	36	39	20	*	*	T	*	18	7	1	50	67	*	*		
		*	*	40	69	1	60	78	*	*	E	*	74	26	9	59	20	*	*		
		*	*	25	19	73	3	76	*	*	N	*	70	21	15	16	72	*	*		
		*	*	8	71	14	53	58	*	*	S	*	24	3	68	32	57	*	*		
		*	*	46	2	12	32	56	*	*	Ã	*	36	48	65	33	75	*	*		
		*	*	9	75	42	7	34	*	*	O	*	47	17	19	44	22	*	*		
		*	*	33	80	37	68	30	*	*		*	61	12	42	78	62	*	*		
		*	*	13	50	24	63	67	*	*		*	55	49	11	45	63	*	*		
		*	*	47	72	43	45	77	*	*		*	13	31	51	23	41	*	*		
		*	*	35	10	59	55	23	*	*		*	80	52	5	79	58	*	*		
		*	*	61	54	28	18	6	*	*		*	25	77	8	40	2	*	*		
		*	*	27	57	74	48	11	*	*		*	10	29	73	64	69	*	*		
		*	*	31	70	49	16	41	*	*		*	6	56	60	71	35	*	*		
		*	*	15	17	65	62	29	*	*		*	38	53	66	37	43	*	*		
		*	*	21	22	52	44	4	*	*		*	39	27	46	14	34	*	*		
		*	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*		
		*	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*		

Á
R
E
A

D
E

P
R
O
D
U
Ç
Ã
O

MATA CILIAR

MATA CILIAR

Fonte: SILVA (2005); ZULIAN (2017).

ANEXO D – Croqui de campo do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na FEPE

TESTE DE PROGÊNIES DE *Pinus caribaea* var. *hondurensis*
 Instalação: 06/86 : Espaçamento: 3,0 x 3,0 metros;
 Local: FEP – Selviria(MS): Delineamento: Látice Quadrado 10 x 10
Triplo – parcialmente balanceado: n° de plantas/parcela: 10

CROQUI DE CAMPO

MILHO

M I L H O	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	R E P	"Z"	C E S P
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			
	"	"	91	41	31	81	11	71	51	21	1	61	"	"			
	"	"	57	7	97	47	77	37	17	87	67	27	"	"			
	"	"	13	63	53	3	33	93	73	43	23	83	"	"			
	"	"	90	40	30	80	10	70	50	20	100	60	"	"			
	"	"	2	52	42	92	22	82	62	32	12	72	"	"			
	"	"	46	96	86	36	66	26	6	76	56	16	"	"			
	"	"	68	18	8	58	88	48	28	98	78	38	"	"			
	"	"	24	74	64	14	44	4	84	54	34	94	"	"			
M I L H O	"	"	35	85	75	25	55	15	95	65	45	5	"	"	R E P	"Y"	C E S P
	"	"	79	29	19	69	99	59	39	9	89	49	"	"			
	"	"	55	59	51	54	60	58	57	56	53	52	"	"			
	"	"	65	69	61	64	70	68	67	66	63	62	"	"			
	"	"	95	99	91	94	100	98	97	96	93	92	"	"			
	"	"	35	39	31	34	40	38	37	36	33	32	"	"			
	"	"	45	49	41	44	50	48	47	46	43	42	"	"			
	"	"	25	29	21	24	30	28	27	26	23	22	"	"			
	"	"	75	79	71	74	80	78	77	76	73	72	"	"			
	"	"	5	9	1	4	10	8	7	6	3	2	"	"			
M I L H O	"	"	15	19	11	14	20	18	17	16	13	12	"	"	R E P	"X"	C E S P
	"	"	85	89	81	84	90	88	87	86	83	82	"	"			
	"	"	88	8	58	98	78	68	48	18	28	38	"	"			
	"	"	86	6	56	96	76	66	46	16	26	36	"	"			
	"	"	84	4	54	94	74	64	44	14	24	34	"	"			
	"	"	83	3	53	93	73	63	43	13	23	33	"	"			
	"	"	81	1	51	91	71	61	41	11	21	31	"	"			
	"	"	89	9	59	99	79	69	49	19	29	39	"	"			
	"	"	82	2	52	92	72	62	42	12	22	32	"	"			
	"	"	85	5	55	95	75	65	45	15	25	35	"	"			
M I L H O	"	"	90	10	60	100	80	70	50	20	30	40	"	"	R E P	"X"	C E S P
	"	"	87	7	57	97	77	67	47	17	27	37	"	"			
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"			

Pop. Base de *Eucalyptus camaldulensis*

Fonte: MORAES (2001); SANTOS (2014).

ANEXO E – Croqui de campo do experimento Competição de Espécies e Variedades de *Pinus* (CEVP) na FEPE

CEVP - INSTALAÇÃO: 15/03/1995 - ESPAÇAMENTO: 3,0 X 1,5 m

COMPETIÇÃO DE ESPÉCIES DE *Pinus* ssp.

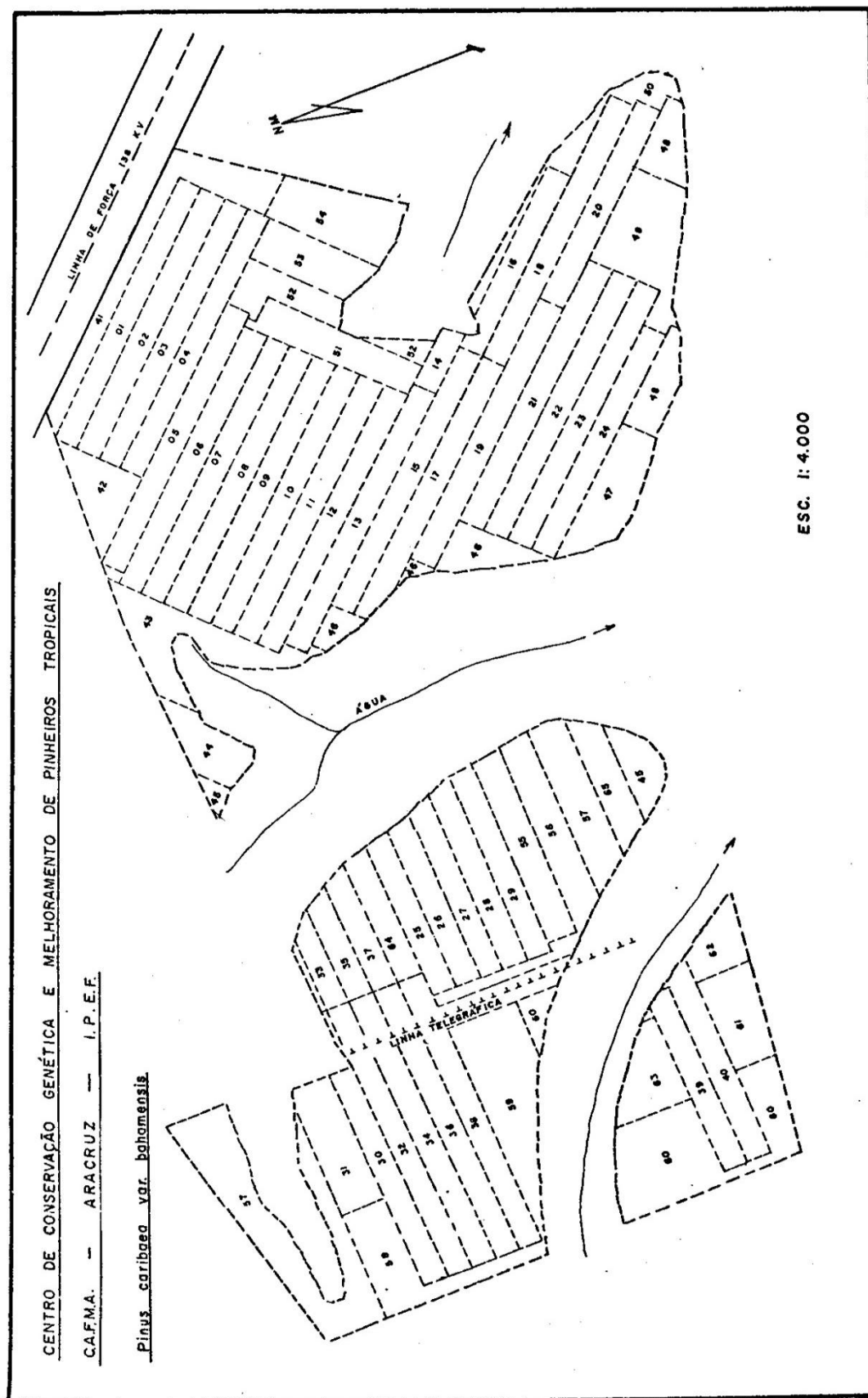
EM DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO

		NATIVAS						N A T I V A S
		A			B			
		AV	ST	SL	ST	AV	SL	
		8	8	8	3	3	3	
A R E A D E E M P R E S T I M O		2	2	2	5	5	5	
		4	4	4	2	2	2	
		3	3	3	6	6	6	
		9	9	9	7	7	7	
		1	1	1	8	8	8	
		7	7	7	4	4	4	
		6	6	6	1	1	1	
		5	5	5	9	9	9	
	C			D				
	SL	ST	AV	AV	SL	ST		
		7	7	7	5	5	5	
		3	3	3	7	7	7	
		4	4	4	2	2	2	
		2	2	2	6	6	6	
		9	9	9	8	8	8	
		5	5	5	1	1	1	
		8	8	8	4	4	4	
		1	1	1	3	3	3	
		6	6	6	9	9	9	
		LAGOA						

Espécies e Variedades de *Pinus*: 1. *P. caribaea* var. *caribaea*; 2. *P. kesiya*; 3. *P. caribaea* var. *hondurensis*; 4. *P. elliottii* var. *elliottii*; 5. *P. pseudo strobus*; 6. *P. caribaea* var. *bahamensis*; 7. *P. patula* var. *tecunumanii*; 8. *P. strobus* var. *chiapensis*; 9. *P. oocarpa*.

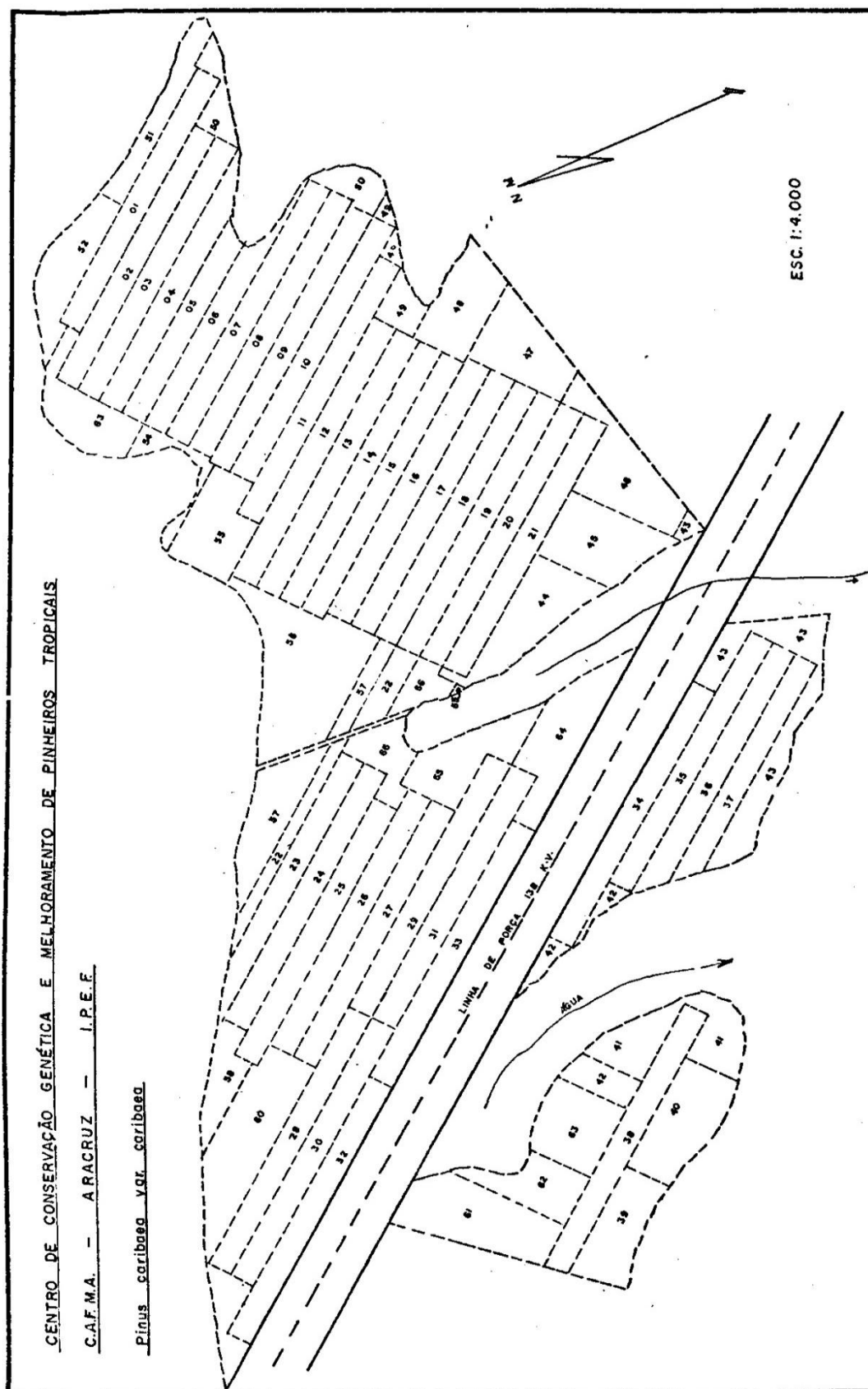
Fonte: Gomes (2014).

ANEXO G – Distribuição do *Pinus caribaea* var. *bahamensis* no CCGMPT



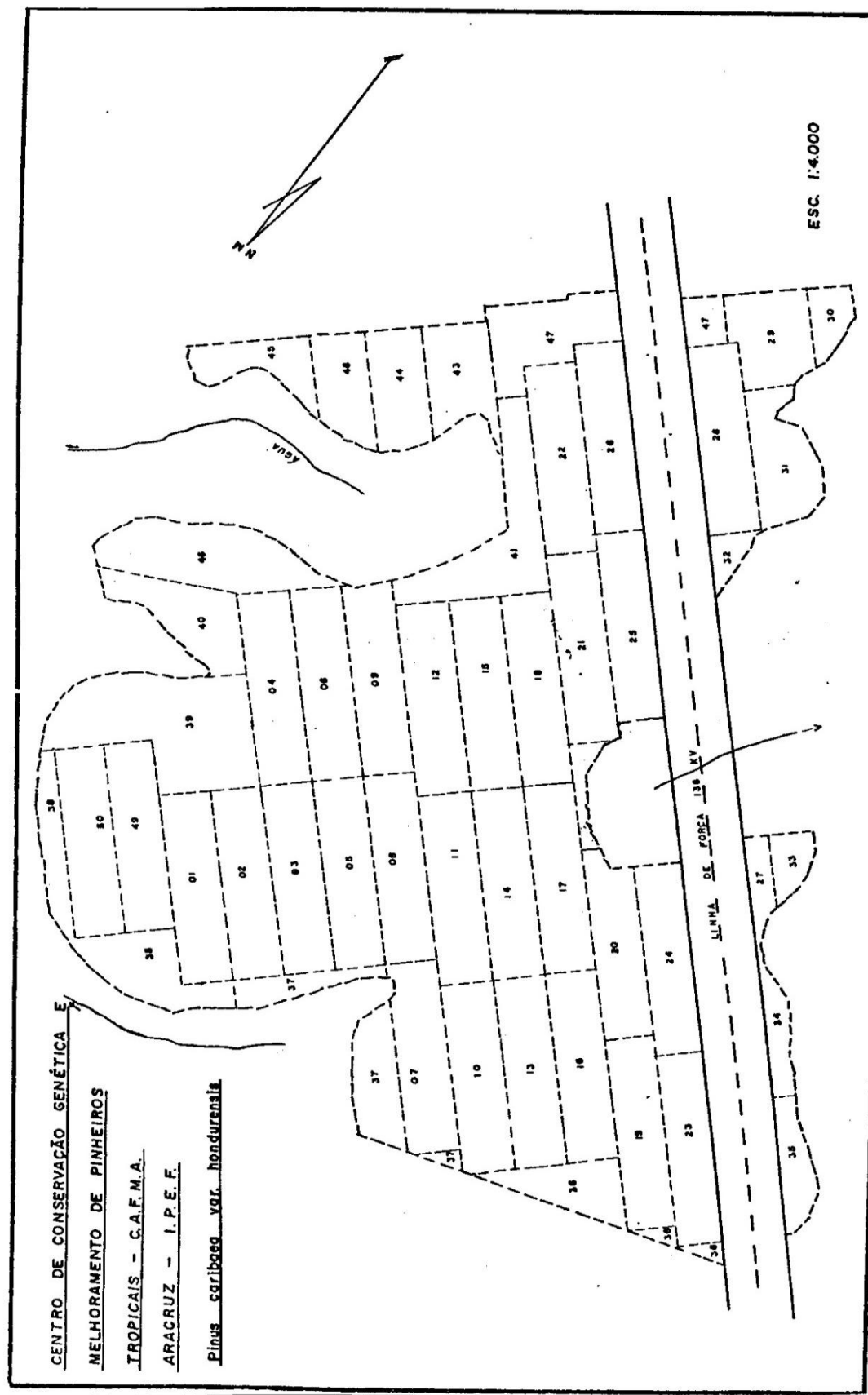
Fonte: MARTINI; ENGEL (1985).

ANEXO H – Distribuição do *Pinus caribaea* var. *caribaea* no CCGMPT



Fonte: MARTINI; ENGEL (1985).

ANEXO I – Distribuição do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* no CCGMPT



Fonte: MARTINI; ENGEL (1985).