

Parametrização, Calibração e Validação Piloto do Modelo 3-PG para *Pinus elliottii* na região Sudeste do Brasil

Marjorie Eliza Maia Reis

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de
Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Gestão de
Recursos Florestais no âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Orientada por

**Professora Doutora Maria do Sameiro Ferreira Patrício
Professor Doutor Luis Filipe de Sousa Teixeira Nunes
Professor Doutor Eleandro José Brun**

**Bragança
2024**

Dedico este trabalho à minha família, minha mãe Marilsa, meu pai Duillis, minhas irmãs Manuela e Mayara e meus sobrinhos José e Betina pelos momentos de ausência. E a Deus, sem ele nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Com profunda reverência e sincera gratidão, inicio meus agradecimentos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Instituto Politécnico de Bragança. É com apreço que reconheço a extraordinária oportunidade proporcionada por essas instituições para a realização de meus sonhos e objetivos. Agradeço de maneira especial pelas oportunidades magníficas que moldaram significativamente meu crescimento, tanto profissional quanto pessoal.

À Professora Doutora Maria do Sameiro Ferreira Pátricio, manifesto meu sincero agradecimento pela aceitação de orientar-me em um momento complexo, proporcionando valiosos insights ao longo deste processo. Ao Professor Doutor Luís Filipe de Sousa Teixeira Nunes, meu profundo reconhecimento pelo suporte em momentos cruciais desta dissertação, sendo um precursor essencial, sem sua participação nada disso teria se tornado realidade. À Professora Doutora Margarida Tomé por todo apoio despreendido nesta caminhada. Sem dúvida a sua participação teve uma importância fundamental e foi uma honra receber seus ensinamentos. Ao Professor Doutor Eleandro José Brun, meu coorientador exemplar, agradeço por seu profissionalismo notável e orientação dedicada durante toda a minha carreira acadêmica. Sua dedicação constante, papel exemplar como fonte de inspiração e habilidade notável em ser um profissional sempre acessível para guiar, aconselhar, motivar, cobrar e criar oportunidades têm sido fundamentais para o meu constante desenvolvimento nas esferas acadêmica, profissional e pessoal. Em momentos desafiadores, a sua orientação foi uma luz guia tendo proporcionado soluções e oportunidades significativas.

À Geplant, quero manifestar a minha profunda gratidão por viabilizar a elaboração desta dissertação, expandindo horizontes e permitindo uma aplicação prática no contexto empresarial do tema através da concessão de recursos. Um agradecimento especial ao Engenheiro Florestal Arthur Vrechi pelo apoio incansável e por ser um farol nos momentos em que a solução parecia inalcançável.

À minha querida mãe, Marilsa, que, mesmo diante de inúmeras adversidades, travou batalhas incansáveis para concretizar meus sonhos. Seu apoio, motivação, educação e amor incondicional são pilares essenciais em minha jornada, sempre acreditando em mim em todos os momentos. Ao meu pai, Duillis, expresso minha

profunda gratidão por transmitir os melhores exemplos e valores, ensinando-me a importância da perseverança e do trabalho honesto na busca pelos meus objetivos.

Às minhas amadas irmãs, Mayara e Manuela, expresso minha profunda gratidão por serem meu suporte e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. Seu constante estímulo para que eu me torne uma versão melhor de mim mesmo é inestimável. Juntas, superamos obstáculos e celebramos conquistas, e por todo esse apoio e companhia ao longo do tempo, mesmo à distância, meu mais sincero obrigado.

Aos meus sobrinhos Vinicius e Betina por ter despertado o amor mais puro e incondicional que existe em mim.

Às minhas amadas avós Marias e ao meu saudoso avô João, assim como ao querido Domingos (in memoriam), expresso minha profunda gratidão por sua significativa participação em minha criação e educação. Foram elementos essenciais na construção da pessoa que sou hoje. Agradeço também pelas incansáveis orações que, sem dúvida, foram uma fonte de apoio valiosa ao longo da minha jornada.

Aos meus amigos do Brasil e de Portugal, pelas histórias vividas, pelo apoio nos momentos difíceis, e principalmente pelos momentos felizes que compartilhamos juntos.

De uma maneira geral, quero agradecer a todos os familiares e amigos que, de forma direta ou indireta, tornaram possível a realização deste ciclo, sempre incentivando e acreditando que eu era capaz. O apoio de cada um foi fundamental para alcançar este feito.

Reconhecendo a divina presença de Deus em cada etapa desta jornada de mestrado, dedico-lhe minha mais sincera gratidão, por ser a luz que ilumina meu caminho, a força que sustenta meus esforços e a fonte inesgotável de sabedoria que me guiou ao longo deste trajeto acadêmico. Seu amor e graça foram a bússola que orientou meus pensamentos, inspirações e decisões.

Em Portugal, onde tive a oportunidade de mergulhar em uma cultura diferente, descobrir novos lugares e cultivar amizades valiosas que serão eternamente prezadas, quero expressar um agradecimento especial ao Mateus e Samuel, que se tornaram minha segunda família ao longo desse período, meus fiéis e eternos amigos. Que este trabalho possa contribuir, de alguma forma, para o avanço do conhecimento nesta área de estudo. Mais uma vez, agradeço a todos que tornaram esta conquista possível.

“Alcançar o sucesso é como navegar entre insucessos, mas manter o entusiasmo é o que faz toda a diferença no trajeto.”

(Autor desconhecido).

RESUMO

Desenvolvido com o intuito de superar a lacuna entre modelos empíricos e abordagens excessivamente detalhadas de base fisiológica, o 3-PG emerge como uma ferramenta valiosa na previsão do crescimento de espécies florestais em diversos países. Sua notável capacidade reside na habilidade de estimar os impactos do manejo, condições climáticas e características locais em diversos atributos do povoamento, utilizando dados de fácil acesso. No âmbito desta pesquisa de mestrado, a atenção volta-se ao potencial do 3-PG na predição do crescimento de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii*, espécie de relevância comercial no Sudeste do Brasil, considerando os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Este estudo, ao contrário dos precedentes, realiza a parametrização, calibração e validação do 3-PG para povoamentos da espécie em questão, empregando dados da literatura e análises de produtividade de longo prazo. A calibração e validação do modelo foi conduzida com dados de parcelas de medição ao longo de três anos, abrangendo diferentes faixas etárias ao longo do ciclo de crescimento, considerando também a presença de desbastes. O estudo se localizou no Município de Itararé, em São Paulo, Brasil. A aplicação do modelo 3-PG para esta espécie, na região referida, demonstrou um desempenho global satisfatório para a previsão de biomassa e volume, embora apresente uma leve deficiência na estimativa da área basal. O erro médio absoluto foi identificado em uma faixa moderada, ficando abaixo de 15%. Contudo, diante das limitações inerentes, a generalização segura do conjunto de parâmetros para todo o país permanece uma incerteza. Os resultados, promissores, apontam para a necessidade de estudos aprofundados para obter bases de dados mais completas com séries temporais de observação e medição mais extensas, especialmente relacionadas à biomassa, para alcançar a aplicabilidade desejada.

Palavras-chave: Modelo 3-PG; Modelagem florestal; Modelo baseado em processos fisiológicos; Modelação; Crescimento e produção.

ABSTRACT

Developed with the aim of bridging the gap between empirical models and excessively detailed physiological-based approaches, 3-PG emerges as a valuable tool in predicting the growth of forest species in various countries. Its remarkable capability lies in estimating the impacts of management, climatic conditions, and local characteristics on various stand attributes using readily available data. In the scope of this master's research, the focus turns to the potential of 3-PG in predicting the growth of *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii*, a commercially relevant species in southern Brazil, considering the challenges posed by climate change. In contrast to previous studies, this research conducts the parameterization, calibration, and validation of 3-PG for stands of the mentioned species, employing literature data and long-term productivity analyses. The model calibration and validation were conducted using measurement plot data over three years, encompassing different age classes throughout the growth cycle, also considering thinning operations. The study was located in the Municipality of Itararé, in São Paulo, Brazil. The application of the 3-PG model for this species, in the mentioned region, demonstrated a satisfactory overall performance for the prediction of biomass and volume, although it presents a slight deficiency in estimating the basal area. The average absolute error was identified in a moderate range, below 15%. However, given the inherent limitations, the safe generalization of the set of parameters to the entire country remains uncertain. The promising results point to the need for in-depth studies to obtain more complete databases with more extensive observation and measurement time series, especially related to biomass, to achieve the desired applicability.

Keywords: 3-PG Model; Forest modeling; Model based on physiological processes; Modeling; Growth and production.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	III
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE APÊNDICES	XII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XI
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3 JUSTIFICATIVA.....	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1 Espécies de Pinus na Silvicultura Brasileira.....	19
4.2 Modelos de Crescimento e Produção Florestal.....	21
4.3 Modelo ecofisiológico 3-PG.....	23
4.3.1 Dados de inicialização.....	23
4.3.2 Dados de saída.....	24
4.3.3 Estrutura do Modelo 3-PG.....	24
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
5.1 Localização da Área de Estudo.....	37
5.2 Caracterização dos Ensaios.....	39
5.3 Índice de Sítio	40
5.4 Índice de Fertilidade	41
5.5 Estimativas dendrométricas	43
5.6 Biomassa Florestal	43
5.7 Parâmetros climáticos	46
5.8 Regimes de desbaste	47
5.9 Parametrização e Calibração do modelo.....	48
5.10 Parâmetros-Chave no Modelo.....	51
5.10.1 Alocação de biomassa e turnover	51
5.10.2 Produtividade primária líquida	54
5.10.3 Mortalidade e auto-desbaste	57
5.10.4 Estrutura da copa e processos fisiológicos	57
5.10.5 Propriedades de madeira e suporte	60
5.10.6 Outros parâmetros e factores de conversão	62

5.11	Validação.....	62
5.12	Avaliação das estimativas do modelo	67
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
6.1	Calibração	68
6.2	Validação	83
7	CONCLUSÕES	91
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	92
8	REFERÊNCIAS	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral do modelo 3-PG: ilustração dos cinco sub-modelos: produção e alocação de biomassa (1-raízes, 2 – fuste e 3-folhas) e cálculos dendrométricos (a), balanço hídrico no solo (b) e taxa de mortalidade (incluindo produção serrapilheira e rotação das raízes) (c).....	34
Figura 2 - Mapa de localização do Município de Itararé no Estado de São Paulo, Brasil	38
Figura 3 - Mapa de localização dos plantios de <i>P. elliottii</i> da empresa Geplant no Município de Itararé no Estado de São Paulo, Brasil.....	38
Figura 4 – Relação entre a área basal (BA) e (a) Produção Primária Líquida (NPP), quantidade de folhagem e tronco ($Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), e (b) distribuição de NPP para folhagem (pF), tronco (pS) e proporção de tronco para folhagem (pFS) em plantações de pinheiros de 2 e 34 anos de idades situados norte da Flórida.....	52
Figura 5 - Representação da biomassa lenhosa total acima do solo (WS), em kg por árvore, em função do diâmetro à altura do peito	53
Figura 6 - Correlação entre o ajustador de umidade no solo e a proporção de umidade em quatro categorias de solo	56
Figura 7 - Relação entre o índice médio de área foliar específica das agulhas (SNA), em $kg\ m^{-2}$, com a idade (anos). Ajuste do modelo para SNA's dependentes da idade obtidos por vários autores	58
Figura 8 - Representação do ajustamento da correlação entre a casca (cm) e a idade (anos) a nível de talhão.....	61
Figura 9 - Biomassa do tronco predita e observada para talhões com diferentes classes de índice de sítio (IS), partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus) (A) e primeiro ano de inventário medido (2020) (B).....	76
Figura 10 - Volume predito e observado para talhões com diferentes classes de índice de sítio (IS), partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus) (A) e primeiro ano de inventário medido (2020) (B).....	77
Figura 11 - Área basal predita e observada para talhões com diferentes classes de índice de sítio (IS), partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus) (A) e primeiro ano de inventário medido (2020) (B)	78
Figura 12 - Relação entre os dados de biomassa do tronco, área basal e volume observado e simulado pelo modelo 3PG a partir do primeiro ano de inventário (2020) (A, C, E) e partindo do SisPinus (2 anos) (B, D, F) para a região de Itararé.....	80
Figura 13 - Biomassa do tronco predita e observada para os talhões com diferentes classes de índice de sítio, partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus)	85
Figura 14 - Volume predito e observado para os talhões com diferentes classes de índice de sítio, partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus).....	86
Figura 15 - Área basal predita e observada para os talhões com diferentes classes de índice de sítio, partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus).....	87
Figura 16 - Correlação entre os dados de biomassa do tronco, área basal e volume observado e simulado pelo modelo 3-PG partindo do SisPinus (2 anos) (A, B, C) para a região de Itararé	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das variáveis dendrométricas dos talhões de <i>P. elliottii</i> adotados para calibração e validação do modelo 3-PG	39
Tabela 2 – Atribuição do Índice de Sítio aos talhões usados para a calibração e validação da <i>P. elliottii</i> na área de estudo	41
Tabela 3 - Índice de Fertilidade do solo para o estudo piloto de calibração e validação do modelo 3PG para a espécie <i>P. elliottii</i>	42
Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros de ajuste de curva para previsão de WF, WS e WR usados para inicialização do 3PG	44
Tabela 5 - Previsões de diferentes compartimentos de biomassa para os três anos de medições estudadas.....	45
Tabela 6 - Cadastro dos respectivos regimes de desbastes realizados nos talhões estudados.	47
Tabela 7 - Categorias de avaliação atribuíveis aos parâmetros	50
Tabela 8 - Categorias de sensibilidade atribuíveis aos parâmetros	50
Tabela 9 - Parâmetros iniciais utilizados para iniciar simulações de crescimento 3-PG em <i>Pinus elliottii</i> (Estimativa: E - Estimados, O - Observados, D - Padrão; Sensibilidade: H - Elevada, M - Média, L – Baixa).....	63
Tabela 10 - Conjunto de parâmetros provisórios adotados para inicializar simulações de crescimento 3-PG para <i>P. elliottii</i>	71
Tabela 11 - Estatísticas que descrevem a relação entre biomassa do tronco observada e estimada (ton ha-1), área basal (m ² ha-1), e volume do povoamento (m ³ ha-1) para 6 talhões estudados	82
Tabela 12 - Estatísticas que descrevem a relação entre biomassa do tronco observado e previsto (ton ha-1), área basal (m ² ha-1), e volume do povoamento (m ³ ha-1) para 6 talhões estudados	90

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A - Interface de configuração da plataforma SisPinus para estimativas dendrométricas.....	100
APÊNDICE B - Dados climáticos da área de estudo situada no Município de Itararé utilizada para calibração e validação do modelo ecofisiológico 3-PG.....	103
APÊNDICE C - Ilustração das variáveis de inicialização que é necessário fornecer ao modelo 3-PG.....	108
APÊNDICE D - Demonstração da aplicabilidade do evento de desbastes para aplicação no modelo.	109
APÊNDICE E - Representação da interface do multisite utilizado para calibração e validação da espécie de Pinus elliottii no modelo 3-PG.....	110

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Siglas/Abreviatura	Descrição	Unidade
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores	
3-PG	Princípios fisiológicos na previsão do crescimento	
Árv	Árvore	
DAP	diâmetro a altura do peito (1,30m)	cm
\overline{DAP}	diâmetro médio a 1,30m de altura (média aritmética) das árvores no talhão	
Dg	diâmetro quadrático médio	cm
G	área basal do povoamento	m ² ha ⁻¹
H	altura individual	m
\bar{H}	altura média das árvores no talhão (média aritmética)	
Ha	Hectar	
Ncova	número de plantas plantadas	covas/ha
Narv	número de árvores por hectare	árv/ha
Nfuste	número de tronco por hectare	fuste/ha
Hdom	altura dominante	m
CO ₂	dióxido de carbono	
R ²	coeficiente de determinação	
SI	site index (índice de sítio ou índice de qualidade da estação)	
LAI	Índice de Área Foliar	
ET	evapotranspiração	mm mês ⁻¹
g_c	condutância do dossel	m s ⁻¹
PAR	radiação fotossinteticamente ativa	
PPB	produção primária bruta	Mg ha ⁻¹
PPL	produção primária líquida	Mg ha ⁻¹ . No 3-PG, PPL é assumida to por ser uma
NPP	Fração constante	(C _{pp} = 0.47) of PPB
Vtotal	volume total	m ³ ha ⁻¹
WF	biomassa da folha	ton ha ⁻¹
WS	biomassa do tronco	ton ha ⁻¹
WR	biomassa das raízes	ton ha ⁻¹
FR	fertilidade do solo	

VPD	déficits médios mensais de	kPa
	pressão de vapor	
Ac	eficiência quântica do	molC/molPAR
	dossel	
MF	massa foliar	
MT	massa do tronco	

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) de 2021 a área total de árvores plantadas no Brasil totalizou 9,93 milhões de hectares. Entre as espécies plantadas, 19,4% da área é composta pelo cultivo de Pinus, com 1,93 milhões de hectares. Segundo Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (2013) cerca de 88,9% dos plantios de Pinus se concentram na região Sul, onde as condições edafoclimáticas são favoráveis à espécie e a localização de indústrias de processamento da madeira facilitam o escoamento da produção.

Dentre as variedades de Pinus mais amplamente cultivadas e aproveitadas pela indústria madeireira, o *Pinus elliottii* Engelm emerge com destaque. O gênero Pinus detém uma relevância ímpar no segmento florestal devido à notável capacidade de adaptação de algumas de suas espécies às condições edafoclimáticas, servindo como fonte primordial para a produção de celulose e papel, mobiliário, indústria siderúrgica, carvão vegetal e também para a confecção de painéis de madeira reconstituída.

Entretanto, devido às emissões de gases de efeito estufa, o setor florestal enfrenta desafios significativos decorrentes das mudanças climáticas globais. Essas mudanças ameaçam as condições ideais para o crescimento e a produtividade dos plantios de Pinus, afetando diretamente o crescimento das árvores e, por conseguinte, impactando a produção, o consumo e o comércio internacional de produtos de madeira. Portanto, é essencial compreender e monitorar as mudanças locais e adotar estratégias sustentáveis para garantir a continuidade do setor em um cenário de aquecimento inevitável (Perez-Garcia et al., 2002). Nesse cenário, os modelos de crescimento e produção emergem como instrumentos de grande importância na projeção do progresso das plantações florestais comerciais, considerando não somente a sua capacidade produtiva, mas também os efeitos sobre o ambiente circundante. Estas ferramentas desempenham um papel fundamental na abordagem dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e na asseguuração da continuidade do setor florestal.

Os modelos empíricos de produção permitem estimar o crescimento e a produtividade das florestas, levando em consideração fatores como a idade da floresta, índice de sítio e área basal do povoamento (Campos e Leite, 2006). Estes modelos desempenham um papel crucial nas empresas florestais, fornecendo informações essenciais para o planejamento, como a estimativa de estoques de madeira e seus diversos

produtos. Essas informações são valiosas na organização eficaz da colheita e na otimização do abastecimento das fábricas (Almeida, 2003). No entanto, os modelos empíricos, assim como muitos outros, possuem limitações intrínsecas que os impedem de considerar de forma abrangente as variações naturais no solo, clima e práticas de manejo, as quais são fundamentais para a análise de diversos cenários e o planejamento da produção de madeira (Landsberg, 2003). Como uma solução para contornar essas limitações, tem surgido um aumento considerável no interesse internacional pela aplicação de modelos fundamentados em processos (PBMs) como instrumentos de gestão florestal. Exemplificando essa tendência, destacam-se notáveis casos como o PROMOD, implantado na Austrália (Battaglia e Sands, 1997, conforme citado em Sands, 2004), o CABALA (Battaglia et al., 2004) e o 3-PG (Landsberg e Waring, 1997). Esses modelos são amplamente utilizados em conjunto com abordagens tradicionais de gestão florestal por diversas organizações, incluindo instituições de pesquisa, entidades governamentais, empresas do setor privado e consultores independentes, com o propósito de diagnóstico, tomada de decisões e análises econômicas.

No contexto brasileiro, a Geplant Tecnologia Florestal implementou o modelo 3-PG como componente central de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) em seu novo sistema de gestão. Essa tendência global reflete a crescente necessidade de modelos processuais capazes de estimar o crescimento e a produtividade florestal em diferentes cenários ambientais e de disponibilidade de recursos.

O modelo 3-PG, desenvolvido com o propósito de superar a lacuna que separa os modelos empíricos dos modelos detalhados baseados em princípios fisiológicos, tem a capacidade de quantificar a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela árvore para a fixação de carbono permitindo deduzir a fração de carbono utilizada na respiração, resultando na produção primária líquida. A biomassa líquida é posteriormente distribuída entre os compartimentos da árvore, permitindo assim o cálculo do volume e da produtividade da floresta (Landsberg; Waring, 1997; Sands; Landsberg, 2002).

Neste trabalho é usado o modelo 3-PG aplicado à espécie *Pinus elliottii* Engelm no contexto do Sudeste do Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este estudo tem por objetivo apresentar uma abordagem inicial de um projeto piloto voltado para a parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG aplicado à espécie *Pinus elliottii* no contexto do Sudeste do Brasil.

2.2 Objetivos específicos

Desenvolver um conjunto abrangente de parâmetros para calibrar o modelo 3-PG, visando prever com precisão o crescimento da *Pinus elliottii* na região Sudeste do Brasil;

Avaliar a precisão das projeções geradas pelo modelo 3-PG, analisando a concordância entre as previsões e os dados observados;

Aperfeiçoar a compreensão do processo de parametrização específica para a *Pinus elliottii*, buscando otimizar a precisão e confiabilidade do modelo;

Investigar as limitações que influenciam as taxas de crescimento da *Pinus elliottii*, visando aprimorar a modelagem e oferecer percepções relevantes para otimizar o manejo florestal;

Aprimorar a utilidade do modelo 3-PG para a indústria florestal do Sul do Brasil, considerando especialmente a influência dos desbastes no povoamento.

3 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa deriva de um protocolo de cooperação técnica firmado entre três instituições: a Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança, a empresa Geplant – Tecnologia Florestal e a aluna responsável por este trabalho. Este projeto de apoio técnico profissional foi fundamental por proporcionar uma oportunidade de colaboração entre a organização parceira e o meio acadêmico, permitindo a união de conhecimentos para trabalhar como uma equipe integrada em prol da indústria florestal do Sul do Brasil, através de uma aplicação prática. O objetivo é demonstrar que o 3-PG é uma ferramenta que pode ser aplicada em diversos segmentos, mesmo diante da escassez de alguma informação, uma vez que medidas precisas podem ser encontradas para superar esses desafios.

Este projeto insere-se numa aplicação mais ambiciosa do modelo 3-PG no Sul do Brasil, refletindo a necessidade de considerar a grande diversidade de clima, solo e espécies de árvores em nossas regiões florestais. A empresa parceira já emprega esta ferramenta em seus sistemas de gestão, concretamente para *Eucalyptus* sp., sendo esta uma oportunidade de aprimoramento, com foco em aumentar a sensibilidade e, principalmente, melhorar a capacidade preditiva do modelo em sistemas de manejo da *P. elliotii* que envolvem desbastes, algo nunca antes realizado no Brasil para esta espécie. O projeto piloto teve por objetivo fornecer informações que pudessem ser incorporadas a uma ferramenta de simulação computacional, permitindo que o usuário utilize o 3-PG em regiões onde a *P. elliotii* cresce.

Espera-se que os resultados deste trabalho contribuam para uma gestão mais eficaz das plantações diante dos desafios climáticos, beneficiando não apenas a indústria, mas também os produtores e, por conseguinte, promovendo uma maior produtividade sustentável. Essa abordagem integrada visa aprimorar a tomada de decisões e promover práticas mais sustentáveis no contexto da gestão florestal na região sul do Brasil.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Espécies de Pinus na Silvicultura Brasileira

Com origem predominantemente no Hemisfério Norte, o gênero *Pinus* abriga cerca de 90 espécies de árvores pertencentes à família Pinaceae (Marchiori, 1996). Numerosas variedades são extensivamente cultivadas e submetidas a gestão intensiva com o propósito de alcançar uma produção comercial de madeira. Esta prática é particularmente proeminente no Hemisfério Sul, abrangendo países como o Brasil, Chile, Colômbia, Argentina, Uruguai, Nova Zelândia, África do Sul e Austrália, entre muitos outros.

No Brasil, o cultivo de diferentes espécies de *Pinus* tem uma história que remonta a mais de cem anos. Os primeiros plantios com espécies subtropicais tiveram início por volta de 1936, sendo estabelecidos pelo Serviço Florestal do Estado de São Paulo, atualmente conhecido como Instituto Florestal de São Paulo (Ferreira, 2001).

De acordo com o Instituto Hóruns de Desenvolvimento e Conservação Ambiental, em 1948 introduziram-se no país as espécies norte-americanas, originalmente denominadas como "pinheiros amarelos", e que compreendem o *P. palustris*, *P. echinata*, *P. elliotii* e *P. taeda*. No sul e sudeste do Brasil, as duas últimas espécies se destacaram notavelmente devido à sua eminente adaptabilidade às práticas de manejo, crescimento rápido e alta capacidade reprodutiva.

A partir da década de 1960, extensas áreas nas regiões sul e sudeste do Brasil começaram a ser plantadas com *P. elliotii* e *P. taeda*. Esse movimento foi impulsionado pelo reconhecimento do potencial dessas espécies pertencentes ao gênero *Pinus* como fontes valiosas de matéria-prima para a indústria madeireira, levando à introdução e experimentação de uma variedade de espécies de diferentes procedências tanto por órgãos governamentais quanto por empresas privadas (Kronka et al., 2005).

De acordo com Lamprecht (1990), na espécie *P. elliotii* Engelm, ocorrem duas variedades, a *Pinus elliotii* var. *elliotii* e a *Pinus elliotii* var. *densa*, sendo a primeira delas de maior significado no contexto comercial.

Para Dorman e Squillace (1974) a espécie *P. elliotii* Engelm. var. *elliotii*, de origem subtropical, é caracterizada pela produção substancial de resina com elevado teor de pineno. Esta encontra sua distribuição natural nas regiões sul e sudeste dos Estados Unidos, abrangendo desde a Planície Costeira do sul da Carolina do Sul (33° N) até ao centro da Flórida e ao sudoeste do estado da Louisiana (30° N).

Em sua área de distribuição natural, a *P. elliotii* é encontrada em solos de natureza ácida e arenosa, como em várzeas e solos hidromórficos (Harlow et al., 1968). A capacidade de se ajustar a ambientes com solos ácidos é atribuída à sua obrigatória simbiose com um basidiomiceto (fungo) capaz de formar micorrizas. Ainda segundo Lamprecht (1990), nas regiões onde ocorre naturalmente, a temperatura média anual varia de 15 a 24°C. Durante o inverno, pode resistir a temperaturas de 4 a 12°C, enquanto no mês mais quente suporta temperaturas entre 23 a 32°C, ocasionalmente chegando até 41°C. A média anual de chuvas oscila de 650 a 2500 mm, com um período de estiagem de no máximo 2 a 4 meses.

No que concerne à madeira do *P. elliotii*, categorizada como "madeira de caráter macio", Nutto et al. (2001) destacam a sua elevada densidade básica, situando-a na faixa de 0,50 a 0,56 g/cm³ em idade adulta, em relação a outras espécies de *Pinus*. Apresenta durabilidade notável e é facilmente suscetível a tratamentos químicos. Sua excelente maleabilidade é um traço distintivo, tornando-a uma escolha comum na construção naval e na fabricação de caixas. Quando devidamente tratada, também encontra aplicação na produção de mastros e postes (Nutto et al., 2001).

No Brasil, o uso da *P. elliotii* é limitado à produção de madeira para processamento mecânico e à extração de resina de árvores em pé, devido ao elevado teor de resina na madeira, ao contrário dos Estados Unidos, onde é amplamente empregada na fabricação de celulose e papel. Assim, no cenário brasileiro, seria necessário implementar um processo industrial adicional para separar a resina da matéria-prima, viabilizando seu uso (Shimizu, 2008). No estudo conduzido por Aguiar et al. (2011), comumente, o acréscimo volumétrico da *P. elliotii* tende a ser mais reduzido em relação a *P. taeda*. No entanto, um fator diferenciador crucial na seleção da espécie para a produção de madeira destinada ao processamento mecânico reside no fato de que *P. elliotii* inicia a produção de madeira adulta (lenho adulto) em um estágio mais antecipado, em torno de sete ou oito anos de idade, ao contrário da *P. taeda*, que requer um período de 12 a 15 anos para atingir tal estágio. Isso implica que, em toras com a mesma maturidade, as provenientes de *P. elliotii* apresentam uma proporção menor de madeira juvenil, resultando em uma qualidade física e mecânica superior em comparação com as oriundas de *P. taeda* (Aguiar et al., 2011).

4.2 Modelos de Crescimento e Produção Florestal

Na busca pela antecipação e eficaz planejamento da produção em povoamentos florestais, a aplicação de modelos se revela de suma importância. Estes modelos desempenham um papel crucial na previsão e no entendimento da dinâmica natural que rege o crescimento florestal, e, adicionalmente, capacitam a projeção desse desenvolvimento ao longo do tempo. Sob a ótica de Vanclay (1994), é pertinente ressaltar que esses modelos assumem um papel multifacetado, especialmente ao lidar com a complexa teia de opções de manejo disponíveis para esses ecossistemas. Por conseguinte, os modelos emergem como instrumentos fundamentais para avaliar o crescimento e a produção das florestas, proporcionando uma estrutura sólida e abrangente que possibilita decisões fundamentadas e refinadas, ampliando a capacidade de gestão florestal e otimização da produção.

No contexto da modelagem de crescimento e produção florestal, é importante notar que, ao ser implementado em um sistema computacional, o modelo se vale da linguagem matemática. Sobretudo, esta escolha, como destacado por Vanclay (1994) e Davis et al. (2001), é respaldada pelo fato de que a linguagem matemática demonstra ser mais concisa, conveniente e menos ambígua do que a linguagem verbal. A aplicação dessa abordagem contribui significativamente para a precisão e eficácia da modelagem, permitindo uma representação clara e formal dos processos de crescimento e produção florestal.

Conforme referido por Abreu (2000), os estudos de crescimento e produção têm como fundamento a utilização de informações provenientes de povoamentos como alicerce para a modelagem. Nesse contexto, é crucial empregar um conjunto de dados coeso, de preferência oriundos de parcelas permanentes, na elaboração das variáveis. Esse enfoque visa assegurar a harmonização entre a precisão das estimativas e a viabilidade de aplicação dos modelos de previsão.

Na elaboração de modelos, a abordagem pode seguir dois princípios fundamentais. Por um lado, os modelos de crescimento e produção orientados ao manejo florestal, denominados modelos empíricos - descritivos, desempenham um papel relevante. Por outro lado, temos os modelos processuais - mecanicistas, os quais são baseados em processos ecofisiológicos (Abreu, 2000).

Os modelos empíricos de crescimento, desenvolvidos para elucidar eventos passados, presentes ou futuros, se destacam pela ênfase na precisão da adaptação aos

dados e na qualidade das previsões (Sanquetta, 1996). De acordo com as observações de Maestri (2003) estes modelos frequentemente incorporam extensos conjuntos de dados obtidos em parcelas permanentes, delineando conexões entre as variáveis envolvidas sem necessariamente abordar os mecanismos biológicos subjacentes.

Abreu (2000) reitera que os modelos empíricos procuram, essencialmente, clarificar o que foi previamente observado por meio de experimentação ou coletado em pesquisas. Assim, sua construção se fundamenta na informação previamente adquirida por meio de experimentação. Como resultado, qualquer tentativa de aplicar esses modelos em contextos diferentes daqueles em que os dados iniciais foram obtidos é inadequada. Esta restrição, por sua vez, limita substancialmente a eficácia preditiva desses modelos.

De acordo com Stape, Ryan e Binkley (2004), uma outra particularidade dos modelos convencionais é a sua limitada capacidade de detectar flutuações climáticas anuais. Além disso, se práticas de manejo diferentes forem adotadas durante as rotações de plantio, as relações empíricas sofrem modificações significativas.

Por outro lado, os modelos fundamentados em processos buscam representar o crescimento com base em princípios físicos e biológicos. Ao contrário dos modelos empíricos, que se apoiam na análise estatística de dados, os modelos baseados em processos procuram simular os próprios processos subjacentes. No entanto, essa abordagem requer uma quantidade substancial de dados do sistema biótico e do ambiente, os quais nem sempre estão prontamente disponíveis. Esses modelos incorporam fatores como luz, temperatura e níveis de nutrientes do solo, e abrangem a modelagem de processos como fotossíntese, respiração e distribuição de materiais fotossintéticos nas raízes, caules e folhas (Vanclay, 1999).

Em outras palavras, segundo as análises de Mäkelä et al. (2000), os modelos baseados em processos são procedimentos que levam em consideração o comportamento dos sistemas como uma função das interações entre seus componentes e o ambiente, incorporando processos físicos e mecânicos ao longo do tempo.

No âmbito dos modelos processuais, são identificadas diversas abordagens, que incluem:

- a) Modelos ecofisiológicos, que descrevem o crescimento em termos de volume, biomassa ou carbono, incorporando influências do ambiente e processos ecológicos.
- b) Modelos climáticos, que baseiam suas projeções em dados climáticos.
- c) Modelos de arquitetura arbórea, que integram conhecimentos ecofisiológicos com descrições detalhadas da topologia e geometria das árvores.

4.3 Modelo ecofisiológico 3-PG

Elaborado com o intuito deliberado de reduzir a distância entre as abordagens tradicionais de avaliação de crescimento e rendimento, que se baseiam em medições, e os modelos de equilíbrio de carbono que se fundamentam em processos, foi concebido o modelo denominado 3-PG. Este modelo, intitulado "Princípios Fisiológicos de Previsão de Crescimento" (3-PG), desenvolvido por Landsberg e Waring em 1997, é uma ferramenta geral para prever o crescimento de ecossistemas florestais que são homogêneos em termos das suas características fisiológicas (ou seja, não varia muito entre as árvores). Embora o modelo seja aplicável a diferentes locais, ele precisa ser ajustado para espécies específicas (Girardin, 2008).

Basicamente o modelo 3-PG realiza o cálculo da absorção de energia radiante pelo dossel, que é posteriormente transformada em carboidratos e distribuída entre os diversos elementos da árvore, abrangendo folhas, casca, tronco, ramos e raízes.

4.3.1 Dados de inicialização

Segundo Sands e Landsberg (2002), o modelo 3-PG requer como principais variáveis de entrada:

- I. Informações climáticas: incluindo médias mensais de temperatura máxima e mínima do ar (expressas em graus Celsius), radiação solar global (medida em MJ m^{-2} por dia), precipitação (em mm por mês) e o número de dias de geada por mês.
- II. Dados locais: como a latitude do local, o tipo de solo, sua fertilidade e a capacidade de retenção de água no solo.
- III. Informações relacionadas com a planta: englobando a densidade populacional de árvores, biomassa inicial de folhas, madeira e raízes, bem como as relações alométricas correspondentes.

Todos esses dados estão prontamente disponíveis, com exceção, em alguns casos, da radiação solar, que pode ser derivada a partir de informações de temperatura (Bristow & Campbell, 1984; Coops et al., 1998). As informações mencionadas são empregadas em uma sequência de cálculos, inicialmente codificados para interação em uma planilha utilizando o software Excel, através da linguagem Visual Basic for Applications (VBA) (Sands, 2004). O modelo em questão pode ser adquirido através do site

<https://3pg.forestry.ubc.ca/software/>. Este portal também disponibiliza informações sobre as variantes 3-PGS e 3-PGmix do modelo, juntamente com referências às pesquisas mais relevantes que o empregam, bem como materiais relacionados a um curso prático.

4.3.2 Dados de saída

As saídas geradas pelo modelo 3-PG podem incluir uma variedade de informações relacionadas ao crescimento e ao estado do ecossistema florestal, podendo ser expressas em termos de valores mensais ou anuais, que englobam:

- I. Produtividade Primária Líquida (PPL): quantidade de biomassa produzida pelo ecossistema após subtrair a respiração das plantas.
- II. Alocação de Carbono: distribuição de carbono entre diferentes componentes da árvore, como folhas, tronco e raízes.
- III. Densidade de Árvores por Hectare: número de árvores presentes em uma unidade de área.
- IV. Disponibilidade de Água no Solo: quantidade de água disponível no solo para as plantas.
- V. Taxa de Transpiração: quantidade de água liberada pelas plantas para a atmosfera através da transpiração.
- VI. Índice de Área Foliar (LAI): medida da área total de todas as folhas em relação à área terrestre.

Além disso, o modelo também realiza o cálculo de métricas relevantes para a gestão florestal, isto é, a nível padrão frequentemente usado para o manejo florestal, como: Área Basal, Diâmetro Quadrático Médio (dg) , Volume, Acréscimo Médio Anual em Volume.

4.3.3 Estrutura do Modelo 3-PG

De acordo com Sands (2004), o modelo é composto por cinco submodelos elementares: a geração de biomassa, a distribuição de biomassa entre as folhas, raízes e tronco (incluindo ramos e casca), a mortalidade do tronco, o equilíbrio hídrico do solo e a transformação da biomassa do tronco em variáveis relevantes para os gestores florestais.

Por intermédio da lei de Beer, o modelo calcula a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFAA) absorvida pelo dossel, que parte do pressuposto de que a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) corresponde a 50% da radiação solar (RS). A equação (1) ilustra a lei de Beer, a qual descreve a redução exponencial da luz à medida que esta penetra verticalmente em toda a extensão da vegetação:

$$I_z = I_0 e^{-k \cdot LAI} \quad (1)$$

onde: I_z = intensidade da radiação a uma determinada altura dentro da cobertura vegetal; I_0 = intensidade de radiação no topo da cobertura vegetal, representa a RFA; k = é o coeficiente de extinção ou atenuação, indicando o grau de diminuição da radiação dentro da cobertura vegetal devido à absorção ou espalhamento; LAI = refere-se à soma cumulativa da superfície foliar de cima para baixo até à altura Z, por unidade de área de solo (LAI acumulado), (Larcher, 2000).

Após a determinação da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (RFAA) pelo estrato vegetativo superior, o modelo de crescimento 3-PG é empregado para estimar a fixação de dióxido de carbono (CO_2) por unidade de energia radiante absorvida (fótons). Este cálculo reflete a eficiência quântica do dossel (α_c) e é derivado a partir do valor máximo da eficiência quântica do dossel (α_{cx}), levando em consideração as restrições ambientais advindas de diversos componentes, tais como:

Déficit de pressão de vapor (f_{dpv}), expressa pela equação (2):

$$f_D(DPV) = e^{-k_D DPV} \quad (2)$$

onde: f_D = modificador dependente do déficit de pressão de vapor; DPV = déficit de pressão de vapor (mbar); k_D = resposta estomática ao DPV ($mbar^{-1}$).

Temperatura (f_T), expressa pela equação (3):

$$f_T(T_a) = \left(\frac{T_a - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \left(\frac{T_{max} - T_a}{T_{max} - T_{opt}} \right)^{\frac{T_{max} - T_{opt}}{T_{opt} - T_{min}}} \quad (3)$$

em que: f_T = modificador dependente da temperatura; T_a ; T_{min} ; T_{max} e T_{opt} = temperaturas média, mínima, máxima e ótima (°C).

Episódios de geadas (f_F), expressa pela equação (4):

$$f_F(d_F) = 1 - k_F \left(\frac{d_F}{30} \right) \quad (4)$$

onde: f_F = modificador dependente da geada; d_F = média mensal do número de dias com geada; k_F = número de dias de produção perdidos para cada dia de geada.

Disponibilidade hídrica (f_θ), expressa pela equação (5):

$$f_\theta(\theta_s) = \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{\theta_{sn}/\theta_{sx}}{c_\theta} \right)^{n_\theta}} \quad (5)$$

em que: f_θ = modificador dependente da água disponível no solo; θ_s = quantidade de água disponível no solo (mm); θ_{sn} e θ_{sx} = quantidades mínima e máxima de água disponível no solo (mm); c_θ = taxa do déficit de umidade que corresponde a $f_\theta = 0,5$; n_θ = potência do déficit da taxa de umidade em f_θ .

Disponibilidade nutricional (f_N), expressa pela equação (6):

$$f_N(FR) = 1 - (1 - f_{N0})(1 - FR)^{n_{fN}} \quad (6)$$

onde: f_N = modificador dependente da nutrição do solo; FR = taxa de fertilidade; f_{N0} = valor de f_N quando $FR = 0$; n_{fN} = potência de $(1 - FR)$ em f_N .

Idade da população vegetal (f_I), expressa pela equação (7):

$$f_{age}(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{t/t_x}{r_{age}} \right)^{n_{age}}} \quad (7)$$

em que: f_{age} = modificador dependente da idade; t e t_x = idades atual e máxima (anos); r_{age} = idade relativa em que : $f_{age} = 0,5$; n_{age} = potência da idade relativa.

Bem como concentração de gás carbônico na atmosfera (CO_2), expressa pela equação (8):

$$\begin{aligned}
 f_{Ca}(C_a) &= \left(\frac{f_{Cax} - C_a}{350 (f_{Cax} - 1) + C_a} \right) \\
 f_{Cax} &= \frac{f_{Cax700}}{2 - f_{Ca700}} \\
 f_{Cg}(C_a) &= \left(\frac{f_{Cg0}}{1 + (f_{Cg0} - 1) + C_a/350} \right) \\
 f_{Cg0} &= \frac{f_{gx700}}{2f_{gx700} - 1}
 \end{aligned} \tag{8}$$

em que: f_{Ca} e f_{Cg} = modificadores dependentes do efeito da concentração de CO_2 sobre a eficiência quântica do dossel e sobre a condutância do dossel; C_a = concentração atmosférica de CO_2 (ppm); f_{Cax} = valor do modificador da eficiência quântica do dossel quando C_a é máximo; f_{Ca700} = valor do modificador da eficiência quântica do dossel quando $C_a = 700$ ppm; f_{Cg0} = valor do modificador da condutância do dossel quando $C_a = 0$; f_{Cg700} = valor do modificador da condutância do dossel quando $C_a = 700$ ppm.

Dessa forma, a proporção de Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (RFAA) utilizada na produção primária bruta (PPB) é influenciada pelas condições ambientais mencionadas anteriormente. O modelo integra essas restrições ao multiplicar coeficientes adimensionais, devidamente calculados. Estes coeficientes têm valores que variam de 0 a 1, e à medida que se aproximam de 1, a limitação ao crescimento se torna menor, na formulação da eficiência do sistema fotossintético da copa.

Definido como o modulador fisiológico (φ), o conjunto de ajustes que contempla o equilíbrio de água no solo (f_θ), o déficit de pressão de vapor (f_{dpv}) e a idade da população (f_I) são parte integrante desse componente, podendo ser exemplificados como:

$$\varphi = f_I \min \{ f_{dpv}, f_\theta \} \tag{9}$$

De acordo com Landsberg et al. (2001), o modulador ϕ exerce uma influência direta sobre o processo de fotossíntese. Em contraste, os moduladores f_{dpv} e f_{θ} não operam de modo aditivo ou multiplicativo, mas sim, levam em consideração a limitação mais rigorosa, ou seja, o modulador de menor valor. Por exemplo, se a disponibilidade de água no solo for mais restritiva do que o déficit de pressão de vapor (DPV) para o crescimento, então o modulador f_{θ} limitará o crescimento durante o período de estimativa em consideração.

Por outro lado, os demais moduladores - f_T , f_F e f_N - que atuam de forma independente ao processo fotossintético, são aplicados de maneira multiplicativa (Sands e Landsberg, 2002)

Logo, para calcular a produção primária líquida, inicia-se multiplicando os modificadores pela eficiência quântica máxima do dossel (α_{Cx}). Isso resulta na eficiência quântica do dossel (α_C), que representa a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) fixado por unidade de energia radiante absorvida, após diminuir os efeitos dos modificadores do crescimento (10).

O produto entre α_C e a Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (RFAA) equivale à produção primária bruta (PPB) (Mg ha⁻¹) (11) Após deduzir a respiração, que é definida por um valor constante (Y), obtém-se a produção primária líquida (PPL) (em Mg ha⁻¹) (12) (Figura 1a).

$$a_C = \alpha_{Cx} f_T f_N f_F f_{Ca} \phi \quad (10)$$

$$PPB = a_C RFAA \quad (11)$$

$$PPL = PPB Y \quad (12)$$

Waring et al. (1998) conduziram uma análise que revelou uma notável consistência na relação PPL/PPB, apresentando uma média de $0,47 \pm 0,04$. Este estudo abrangeu 12 localidades caracterizadas por uma diversidade significativa de condições climáticas, níveis de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e espécies dominantes. Em consonância com esse resultado, o modelo 3-PG adota um valor constante de cerca de

0,47 para essa relação, eliminando, assim, a necessidade de calcular as perdas de carbono resultantes da respiração.

A alocação da biomassa entre os compartimentos raiz, folha e fuste é determinada após a obtenção da produção total em um período específico. Essa alocação é realizada por meio do cálculo das proporções das biomassas destinadas a cada compartimento (Figura 1a).

O processo de alocação começa com as raízes e é influenciado pela fertilidade do solo (FR) e pelo modificador fisiológico (φ) (13) e (14), respectivamente. À medida que as condições de umidade e nutrição do solo se tornam mais desafiadoras, o modelo aumenta a quantidade de biomassa alocada para as raízes.

$$m = m_0 + (1 - m_0) FR \quad (13)$$

No caso em que a fertilidade do solo (FR = 0) leva a "m0" ser igual a "m". O valor de "m" é integrado em uma equação empírica (14) que efetua o cálculo da distribuição de carboidratos para as raízes:

$$\eta_R = \frac{\eta_{Rx} \eta_{Rn}}{\eta_{Rn} + (\eta_{Rx} - \eta_{Rn}) m \varphi} \quad (14)$$

Onde: η_R = coeficiente de alocação para raízes; η_{Rx} = valor máximo do coeficiente de alocação para raízes; η_{Rn} = valor mínimo do coeficiente de alocação para raízes; φ = modulador fisiológico.

Subsequentemente à alocação de carbono nas raízes, o modelo efetua o cálculo da distribuição de biomassa para as folhas e a estrutura do tronco (15), composta pela casca, lenho e ramos. Este cálculo se baseia em equações alométricas que descrevem a quantidade de massa foliar (MF), incluindo a acumulação da queda de folhas, bem como a massa do tronco (MT), correlacionada com o diâmetro à altura do peito (DAP), conforme delineado nos trabalhos de (Landsberg e Waring, 1997; Sands e Landsberg, 2002; Landsberg et al., 2003).

$$\begin{aligned} M_F &= a_F DAP^{n_F} \\ M_T &= a_T DAP^{n_T} \end{aligned} \quad (15)$$

Os fatores multiplicativos (a_F e a_T) e exponenciais (n_F e n_T) associados à M_F e M_T são empregados na determinação da diminuição da relação ($p_{F,T}$) (16) entre os coeficientes de alocação de folhas (n_F) e tronco (n_T) (assumindo DAP como bom substituto da biomassa da árvore):

$$p_{F,T} = \frac{n_F}{n_T} = \left(\frac{\frac{dM_F}{dDAP}}{\frac{dM_T}{dDAP}} \right) = \frac{a_F n_F DAP_F^{(n-1)}}{a_T n_T DAP_T^{(n-1)}} = a_p DAP^{n_p} \quad (16)$$

Onde, $n_p = \frac{\ln\left(\frac{p_{F,T20}}{p_{F,T2}}\right)}{\ln(10)}$; e $a_p = p_{F,T} \frac{2}{2^{n_p}}$ Os valores de $p_{F,T2}$ e $p_{F,T20}$, reportam a relação $p_{F,T} \left(\frac{n_F}{n_T}\right)$, para os DAP do tronco de 2 e de 20 cm, respectivamente (Sands & Landsberg, 2002).

O montante designado para cada compartimento é determinado após subtrair as reduções na biomassa causadas pela perda de folhas (serrapilheira) (17), a rotação de raízes e a mortalidade. A rotação de raízes é caracterizada por uma taxa invariável (γ_R), e a mortalidade pode ser calculada com base na densidade, seguindo o princípio de autodesbaste (18, 19 e 20), ou de forma independente da densidade (21) (Figura 1c).

$$\gamma_F(t) = \frac{\gamma_{F1}\gamma_{F0}}{\gamma_{F0} + (\gamma_{F1} - \gamma_{F0})e^{-\left(\frac{t}{t_{yF}}\right)\ln\left(1+\frac{\gamma_{F1}}{\gamma_{F0}}\right)}} \quad (17)$$

Onde, $\gamma_F(t)$ = velocidade de decomposição de folhas na etapa t; γ_{F0} e γ_{F1} = velocidades iniciais de decomposição de folhas em fases jovens e maduras; t_{yF} = o ponto em que a velocidade de decomposição de folhas atinge a $1/2$ ($\gamma_{F0} + \gamma_{F1}$) (em meses).

$$W_{Sx} = W_{Sx1000} \left(\frac{1000}{N}\right)^{n_N} \quad (18)$$

$$W_{Sx}^+ = w_s - m_s(N - N^+) \frac{W_s}{N} \quad (19)$$

$$\frac{W_{Sx}^+}{N^+} \leq W_{Sx1000}(1000/N^+)^{n_N 10^{-3}} \quad (20)$$

No contexto dado: W_{Sx} = representa a quantidade máxima de biomassa permitida por tronco (kg árvore⁻¹); W_{Sx1000} = é o valor de W_{Sx} para uma densidade de 1000 árvores por hectare (em kg por árvore⁻¹); N = é a quantidade de troncos por hectare; n_N = é o expoente na fórmula da autodesbaste; W_{Sx}^+ = indica a quantidade de biomassa do tronco após a autodesbaste; W_s = representa a biomassa do tronco; m_s = é a fração da biomassa do tronco perdida devido a uma árvore morta; N^+ = é o número de troncos após o autodesbaste.

$$\begin{aligned} \gamma_N &= \gamma_{N1} + (\gamma_{N0} - \gamma_{N1}) e^{-\ln(2) \left(\frac{t}{t_{\gamma N}}\right)^{n_{\gamma N}}} \\ \Delta N &= -\gamma_N N \Delta t \end{aligned} \quad (21)$$

Na qual: γ_N = denota a taxa de mortalidade; γ_{N0} e γ_{N1} representam as taxas de mortalidade em estágios jovens e maduros; $t_{\gamma N}$ = é a idade na qual a mortalidade atinge a metade do valor entre $1/2 (\gamma_{N0} + \gamma_{N1})$ (meses); $n_{\gamma N}$ = é o expoente de modelagem; Δn simboliza o total de árvores mortas; $N \Delta t$ = corresponde ao número de árvores no intervalo de tempo t.

Assim, a equação que descreve o equilíbrio de carbono em cada setor durante o intervalo de tempo Δt será fornecida pelas expressões (22), (23) e (24).

$$\Delta W_F = \eta_F PPL - \gamma_F W_F \Delta t - m_F (W_F/N) \Delta N \quad (22)$$

$$\Delta W_R = \eta_R PPL - \gamma_R W_R \Delta t - m_R (W_R/N) \Delta N \quad (23)$$

$$\Delta W_S = \eta_S PPL - m_S (W_S/N) \Delta N \quad (24)$$

Nas quais: ΔW_F ; ΔW_R ; ΔW_S = representam as quantidades de biomassa de folhas, raízes e troncos produzidas durante o período Δt (Mg ha⁻¹); W_F ; W_R ; W_S = biomassa de folhas, raízes e troncos acumulada até o instante t (Mg ha⁻¹); m_F ; m_R ; m_S = proporções de biomassa (W_i/N) de folhas, raízes e troncos perdidas por cada árvore morta.

No contexto do submodelo de cálculos dendrométricos, a análise incorpora as variáveis D (diâmetro médio à 1,30 m) e N (número de árvores por área) como pilares centrais na determinação da área basal (G), altura total (H) e volume total do povoamento, excluindo a casca (Vs). A primeira etapa é o cálculo do diâmetro (D), que parte da biomassa média do tronco (25), subseqüente às avaliações da área basal (26), altura total (27), e volume do povoamento. O volume pode ser obtido de acordo com a densidade básica da madeira (28) ou utilizando um modelo alométrico que leva em conta tanto o diâmetro (D) quanto o número de troncos por hectare (29). Como resultado final, são derivados o incremento médio anual e o incremento mensal atual em volume (Im e Icm) (30 e 31) (Figura 1a).

$$D = \left(\frac{W_s}{a_s} \right)^{n_s} \quad (25)$$

$$G = \pi \left(\frac{D}{200} \right)^2 N \quad (26)$$

$$H = a_H D^{n_{HB}} N^{n_{HN}} \quad (27)$$

$$v_s = \frac{W_s (1 - \rho_{BB})}{\rho} \quad (28)$$

$$v_s = a_V D^{n_{VB}} N^{n_N} \quad (29)$$

$$I_m = \frac{V_s}{t_i} \quad (30)$$

$$I_{cm} = V_{s(i)} - V_{s(i-1)} \quad (31)$$

Na qual, D = representa o diâmetro médio a 1,30 metros (cm); w_s = indica a biomassa média do fuste por árvore (kg árvore⁻¹); a_s e n_s = são parâmetros associados à relação alométrica do D; ρ_{BB} = corresponde a fração de biomassa alocada para ramos e casca; W_s = se refere à biomassa de fuste (Mg ha⁻¹); ρ = denota a densidade básica da madeira (t m⁻³); a_H ; n_{HB} ; n_{HN} = representam os parâmetros relativos à relação

alométrica da altura; a_V ; n_{VB} ; n_N =correspondem aos parâmetros da relação alométrica do volume; I_m = é o incremento médio anual ($m^3 ha^{-1} ano$); V_S = representa volume do povoamento excluindo a casca ($m^3 ha^{-1}$); I_{cm} = incremento corrente mensal ($m^3 ha^{-1} mês^{-1}$); $V_{S(i)}$ = indica o volume no período atual ($m^3 ha^{-1}$); $V_{S(i-1)}$ = volume no período anterior ($m^3 ha^{-1}$); t_i = denota idade do povoamento no período i (anos);

Por fim, o cálculo do balanço hídrico no solo é realizado mediante a diferença entre a precipitação pluviométrica, que incorpora eventuais práticas de irrigação, e a taxa de evapotranspiração (34). A quantidade de precipitação pluviométrica considera a parcela de chuva interceptada pela cobertura vegetal, uma magnitude variável dependente do IAF (A_f) em (33) e (35). No âmbito do cálculo da evapotranspiração, recorre-se à aplicação da equação de Penman-Monteith (36), cujo resultado está intrinsecamente associado à condutância da cobertura vegetal (37) e igualmente sujeito a oscilações relacionadas ao A_f (Figura 1b).

$$\Delta\theta_S = (1 - i_R)R_p R_i - ET \quad (32)$$

$$i_R = i_{Rx} \min\left\{1, \frac{A_f}{L_{ix}}\right\} \quad (33)$$

$$ET = g_C(\varepsilon(R_n - G) + \lambda\rho_{ar}D_u g_B / (\varepsilon + 1)g_C + g_B) \quad (34)$$

$$g_C = g_{Cx} \varphi \min\left\{1, \frac{A_f}{L_{Cx}}\right\} \quad (35)$$

onde: L_{ix} = índice de área foliar na qual a interceptação da chuva é máxima; $\Delta\theta_S$ = balanço de água no solo; R_p = precipitação pluviométrica ($mm\ mês^{-1}$); R_i = irrigação ($mm\ mês^{-1}$); ET = evapotranspiração ($mm\ mês^{-1}$); i_R = fração da chuva interceptada pelo dossel e evaporada pelo dossel; i_{Rx} = fração máxima da chuva interceptada pelo dossel; g_C = condutância do dossel ($m\ s^{-1}$); g_{Cx} = condutância máxima do dossel ($m\ s^{-1}$); L_{Cx} = índice de área foliar correspondente à condutância máxima do dossel; ε = é a taxa adimensional de mudança da pressão de vapor saturado em relação a inclinação da curva de pressão de vapor saturado dividido pela constante psicrométrica; R_n = radiação líquida; G = fluxo de calor do solo (é muito pequeno em relação à R_n para uma escala mensal, por isso é negligenciado); λ = calor latente de vaporização ($J\ kg^{-1}$); ρ_{ar} =

densidade do ar (kg m^{-3}); D_u = déficit de umidade específica do ar do dossel (g de H_2O (g de ar) $^{-1}$); g_B = condutância na camada limítrofe do dossel (m s^{-1}).

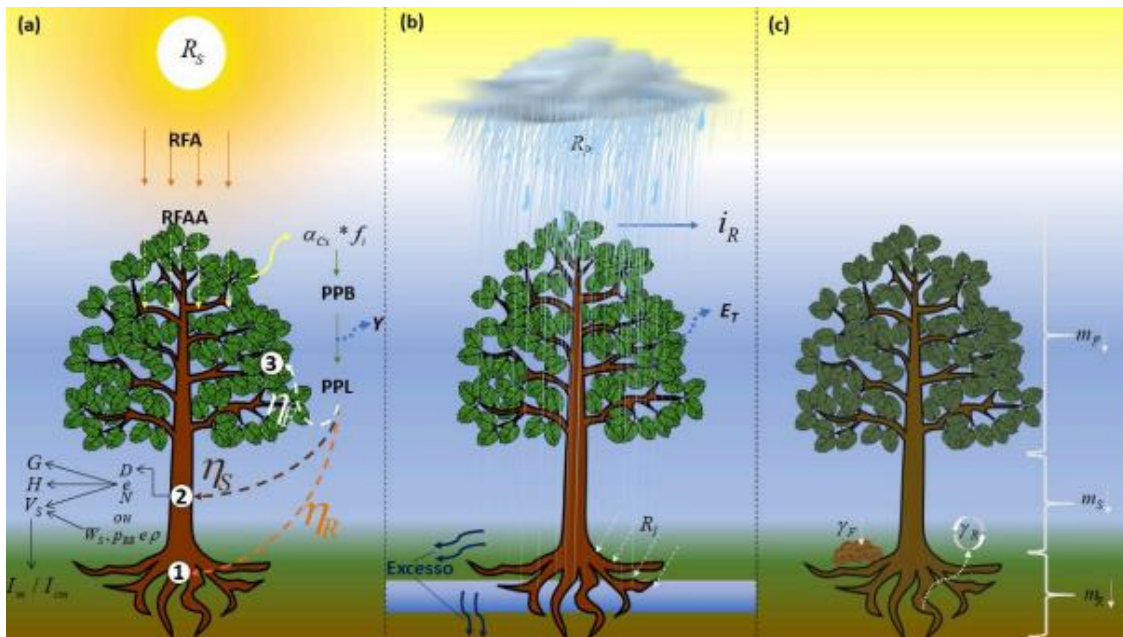


Figura 1 - Visão geral do modelo 3-PG: ilustração dos cinco sub-modelos: produção e alocação de biomassa (1-raízes, 2 – fuste e 3-folhas) e cálculos dendrométricos (a), balanço hídrico no solo (b) e taxa de mortalidade (incluindo produção serrapilheira e rotação das raízes) (c). Fonte: Silva (2021).

Em síntese, na versão convencional do modelo 3-PG, é realizada a simulação do crescimento florestal com base nos cinco modelos, os quais são apresentados de forma mais sucinta nos pontos 4.3.3.1, 4.3.3.2, 4.3.3.3, 4.3.3.4, 4.3.3.5.

4.3.3.1 Produção de biomassa (produtividade primária líquida e bruta)

Dentro do âmbito do modelo 3-PG, a captura da radiação solar pelo dossel é influenciada por diversos fatores. A Lei de Beer descreve a maneira como a radiação solar que incide no topo do dossel é reduzida em relação ao Índice de Área Foliar (IAF). A Produção Primária Bruta (PPB) se correlaciona diretamente com a absorção da radiação fotossinteticamente ativa. A eficiência quântica do dossel, que leva em consideração adaptações ambientais, é calculada por meio da multiplicação de diversos fatores que incluem o déficit de pressão de vapor (DPV), disponibilidade de água no solo, temperatura média do ar, frequência de geadas mensais, estado nutricional e idade atual

do povoamento. Paralelamente, a Produção Primária Líquida (PPL) constitui uma parte constante da PPB (Waring et al., 1998).

4.3.3.2 Alocação de biomassa/carbono

No tocante à distribuição da Produção Primária Líquida (PPL) nas raízes, tal alocamento é regido pelas condições de desenvolvimento que se manifestam através da disponibilidade de água no solo, do déficit de pressão de vapor (DPV) e da qualidade do solo (Beets, 1996; Landsberg e Gower, 1997). Na presença de solo pouco fértil ou carência de água disponível, a fração de PPL destinada às raízes cresce significativamente. Por outro lado, a alocação de biomassa para as folhas e tronco é ditada pelo tamanho médio da árvore, exemplificado pelo diâmetro à altura do peito (DAP). À medida que o povoamento envelhece, ocorre uma redução na alocação para as folhas, enquanto a alocação para o tronco cresce.

4.3.3.3 Evolução do número de árvores

Mensalmente, é aplicado um cálculo da probabilidade de morte de árvores relacionado à idade, sendo influenciado por fatores estressores, como a disponibilidade de água. Também se calculam mudanças na densidade de árvores usando a "lei de autodesbaste" para determinar um limite máximo de biomassa de tronco por árvore em um estoque atual. Caso a média de biomassa de tronco exceda esse limite, a população é reduzida para se ajustar ao limite. Pressupõe-se que as árvores mais fracas e menores são as primeiras a serem removidas, contribuindo com apenas uma fração da biomassa total (Sands e Landsberg, 2002).

4.3.3.4 Balanço de água no solo

Em seu modelo de balanço hídrico do solo, o modelo trabalha com uma única camada e opera em intervalos mensais de tempo. A equação de Penman-Monteith é usada para calcular a evapotranspiração, e a precipitação, incluindo irrigação, é equilibrada nesse processo (Landsberg e Gower, 1997). A condutância do dossel é estabelecida com base no Índice de Área Foliar (IAF) do dossel e na condutância estomática. Ela cresce à medida que o IAF aumenta, até alcançar o seu valor máximo, e é influenciada pelo déficit

de pressão de vapor (DPV), a disponibilidade de água no solo e a idade atual do povoamento.

4.3.3.5 Características do povoamento

Os parâmetros do povoamento, tais como volume do tronco, DAP, área basal e IMA, são derivados a partir da biomassa lenhosa total e da quantidade de troncos. A relação entre a idade do povoamento e a fração de ramos e casca, bem como a densidade básica, é explicitamente considerada. Além disso, podem ser aplicadas relações alométricas para estimar a altura do tronco, o volume utilizável e outros indicadores relevantes.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização da Área de Estudo

Os dados passíveis de utilização nesta investigação derivam de plantios florestais situados nas áreas operacionais da empresa Geplant, localizada na região de Itararé, no estado de São Paulo, Brasil. A referida região geográfica se encontra nas coordenadas de latitude sul 24°6' 18' e longitude oeste de Greenwich 49°20'35".

Itararé, município brasileiro do estado de São Paulo, está posicionado na fronteira com o estado do Paraná e faz parte das dezenove cidades que compõem a Região Imediata de Itapeva (Figura 2). A configuração municipal abrange a sede e os distritos de Pedra Branca de Itararé e Santa Cruz dos Lopes. A cidade de Itararé encontra-se a uma distância de 343 km da capital paulista, São Paulo, 287 km de Curitiba, 17 km de Sengés e 58 km de Jaguariaíva, destacados destinos de ecoturismo na região (IBGE, 2019).

No contexto da paisagem, os solos argilosos e avermelhados são prevalentes nas cristas, topos alongados e vertentes suavemente inclinadas. Principalmente, encontram-se Latossolos Vermelhos Escuros (LVE) de textura argilosa, com horizonte A moderado ou proeminente, vinculados aos argilitos e siltitos da Formação Itararé. Em algumas localidades, observa-se um caráter ligeiramente mais arenoso, possivelmente relacionado à influência subjacente do arenito Furnas (Rizzo e Marinho, 1986).

No Planalto da Zona do Paranapanema, a região de Itararé apresenta características geomorfológicas de topografia plano-ondulada, com colinas paralelas, morros alongados, encostas de baixa declividade, vales abertos e drenagem paralela. A orientação predominante da drenagem é no sentido NW, com gradientes regionais acentuados de aproximadamente 20 a 25 m/km (IPT, 1981).

Conforme a classificação de Köppen, o clima é do tipo Cfa, ou seja, clima mesotérmico e úmido sem estiagem e com a temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C, sendo o mês mais frio o de julho, com média mensal de 12,0°C, e o mais quente, fevereiro, com média mensal de 19,0°C (Walter e Lieth, 1967).

Nesta pesquisa, foram selecionados plantios seminais de *P. elliottii*, abrangendo diferentes faixas etárias ao longo do ciclo de crescimento. A área total destinada aos plantios perfazia 426 hectares, dos quais 105 hectares foram especificamente designados como amostras para a calibração e validação do estudo (Figura 3). No âmbito de cada faixa etária, foram identificados dois talhões, resultando, portanto, em um total de seis talhões destinados à fase de calibração e seis destinados à fase de validação.

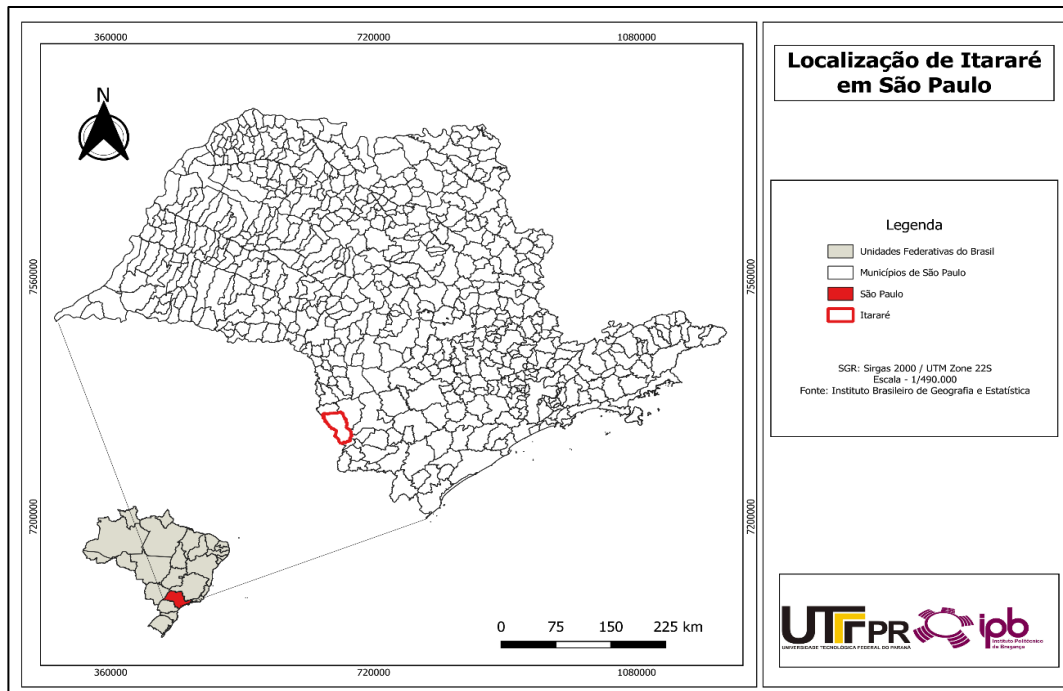


Figura 2 - Mapa de localização do Município de Itaré no Estado de São Paulo, Brasil.

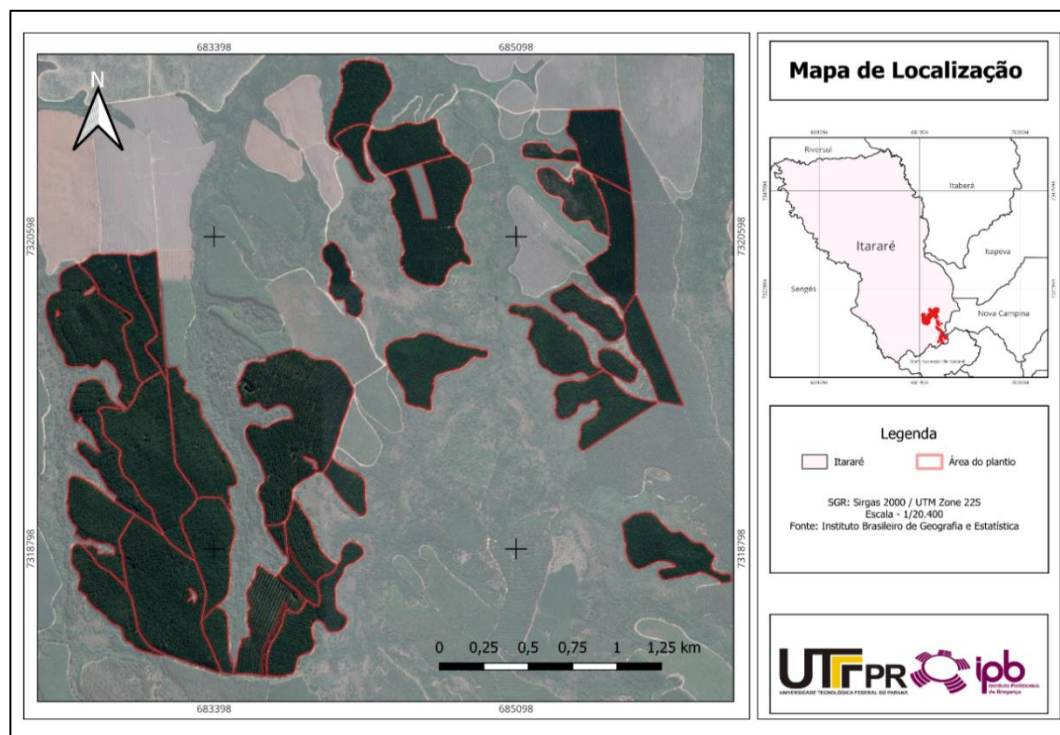


Figura 3 - Mapa de localização dos plantios de *P. elliottii* da empresa Geplant no Município de Itaré no Estado de São Paulo, Brasil.

No contexto da calibração e validação do modelo, é crucial garantir um elevado número de medições em cada ensaio, proporcionando uma base de dados sólida ao longo do tempo. Para superar a escassez de medições em ensaios anteriores mencionados,

optou-se por incluir talhões com e sem desbaste na calibração, visando obter maior variabilidade nos dados. Nesse contexto, esses talhões específicos foram alvo de três medições em anos distintos, nomeadamente em 2020, 2021 e 2022.

5.2 Caracterização dos Ensaiois

As características dendrométricas do povoamento para ajuste e validação do modelo são resumidas nas Tabelas 1. Estes povoamentos foram estabelecidos por meio de talhões, entre período de outubro de 1999 a fevereiro de 2014. Os talhões exibiram uma variação significativa de tamanho, com áreas variando de 0,53 a 23,49 hectares, e densidades oscilando entre 508 e 1314 árvores por hectare, mantendo um espaçamento de 3x2 metros.

Tabela 1 - Resumo das variáveis dendrométricas dos talhões de *P. elliottii* adotados para calibração e validação do modelo 3-PG

	Talhão	Área ha	Data plântio dd/m m/aa	Idade anos	\overline{DAP} cm	\overline{H} m	Hdom m	Ncova covas/ ha	Narv árv/ ha	Nfuste fuste/ ha	G m ² / ha	Dg cm	Vtotal m ³ / ha
Calibração	302-A	8,1	01/02/ 2014	6,5	14,9	12,2	14,4	1425	1314	1344	27,9	16,3	162,3
	420-A	10,9	01/10/ 2008	11,8	19,5	15,9	17,2	1323	834	840	25,8	19,8	211,9
	412	4,8	01/10/ 2002	17,8	23,3	20,2	21,9	1413	791	791	26,1	20,5	375,4
	419	12,3	01/10/ 2003	16,8	24,5	19,6	20,7	1256	590	590	24,9	23,2	295,9
	327-A	11,8	01/10/ 2001	18,8	20,7	17,9	19,2	1475	664	664	30,3	24,1	218,3
	329	6,4	01/10/ 2003	16,8	22,6	16,4	17,4	1353	541	541	30	26,6	188,3
Validação	201-A	2,0	01/10/ 2003	16,8	22	18,8	20,4	1351	608	608	17,6	19,2	240,2
	504-B	12,1	01/10/ 2000	19,8	22,5	20,8	22,6	1412	762	762	27,4	21,4	351,9
	207-B	0,5	01/10/ 2001	18,8	16,9	14,7	16,9	1608	1254	1254	25,4	16,1	233,1
	418-B	2,8	01/10/ 1999	20,8	24,3	19,5	20,6	1301	495	508	24,7	24,9	247
	503-B	9,7	01/10/ 2000	19,8	28,6	22,2	23,4	1470	544	544	28,2	25,7	431,5
	107	23,4	01/10/ 2008	11,8	17,3	14,6	16,2	1281	844	844	23,3	18,7	155,6

Nota: **DAP**: diâmetro médio a 1,30m de altura (média aritmética) das árvores no talhão; **H**: altura média das árvores no talhão; **Hdom**: altura dominante; **Ncovas**: número de plantas plantadas; **Nfuste**: número de troncos por hectare; **G**: área basal do povoamento; **Dg**: diâmetro da árvore de área basal média (diâmetro quadrático médio); **Vtotal**: volume total das árvores do talhão.

5.3 Índice de Sítio

Considerando a importância fundamental dos dados de entrada para a execução eficaz do modelo e as restrições inerentes ao inventário original, foram implementadas medidas específicas em resposta à escassez de informação disponível. Para otimizar a calibração, além de concentrar esforços no aumento do número de medições, procedeu-se a seleção e categorização dos talhões, levando em consideração a presença ou ausência de desbastes.

A seleção foi baseada na determinação do índice de sítio de cada talhão, calculado através da equação proposta por Scolforo e Machado (1988), para plantações de *P. elliottii* nos estados do Paraná e Santa Catarina, conforme expresso na equação (36) a seguir:

$$IS = \frac{hdom (1 - EXP (-b_1 Iref))^{b_2}}{1 - EXP (-b_1 I)^{b_2}} \quad (36)$$

Onde: IS = índice de sítio; hdom = altura média das árvores dominantes do povoamento, as árvores dominantes do povoamento são as árvores mais grossas na proporção de 100 árvores por hectare; I = idade em anos; exp = exponencial; Iref = idade de referência estabelecida aos 25 anos; b₁ e b₂ = coeficientes de regressão. Os valores específicos, 0,0732239 para b₁ e 1,2911456 para b₂, foram adotados e desempenham papéis cruciais na equação. O primeiro está associado à taxa de crescimento, definindo a inclinação média da curva de crescimento em altura dominante, enquanto o segundo representa a localização do ponto de inflexão na referida curva.

Através da aplicação da equação 36, foi possível obter os valores do Índice de Sítio, os quais foram categorizados de acordo com os limites estabelecidos nas classes de sítio pelos referidos autores. Os resultados extraídos podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Atribuição do Índice de Sítio aos talhões usados para a calibração e validação da *P. elliotii* na área de estudo

	Talhão	Espécie	Idade	Hdom	Idade de Referência	SI	Classe	Categoria
	-	-	anos	m	anos	m		
Calibração	302-A	<i>P. elliotii</i>	6,5	14,40	25	40,26	I	superior
	420-A	<i>P. elliotii</i>	11,8	17,20	25	27,82	II	superior
	419	<i>P. elliotii</i>	16,8	20,70	25	25,81	III	Médio
	412	<i>P. elliotii</i>	17,8	21,90	25	26,31	III	Médio
	327-A	<i>P. elliotii</i>	19,8	19,20	25	22,31	IV	inferior
	329	<i>P. elliotii</i>	16,8	17,40	25	21,70	IV	inferior
Validação	201-A	<i>P. elliotii</i>	16,8	20,4	25	25,44	III	Médio
	504-B	<i>P. elliotii</i>	19,8	22,5	25	26,37	III	Médio
	207-B	<i>P. elliotii</i>	18,8	16,9	25	19,64	IV	inferior
	418-B	<i>P. elliotii</i>	20,8	20,6	25	22,58	IV	
	503-B	<i>P. elliotii</i>	19,8	23,4	25	26,37	III	Médio
	107	<i>P. elliotii</i>	11,8	16,2	25	26,21	III	Médio

Nota: Hdom: altura dominante; SI: Índice de Sítio.

Neste contexto, a seleção dos talhões foi deliberadamente orientada por critérios específicos de índice de sítio com idades que variaram de 6,5 anos até 20,8 anos, resultando na escolha de dois talhões com classificação de índice de sítio considerado superior, outros dois com classificação de índice de sítio classificado como regular ou médio, e mais dois com índice de sítio caracterizado como inferior. Esta estratégia engloba uma variedade abrangente de idades nos povoamentos, abarcando desde os estágios mais jovens até os estágios mais avançados de desenvolvimento. Conseqüentemente, essa justificativa vai ao encontro do que preconiza o autor Sands (2004), que destaca a necessidade de parametrizar ou validar as estimativas de produção de biomassa do 3-PG, com dados que abrangem uma diversidade de situações (por exemplo, idade, qualidade da estação, densidade). No entanto, apenas na validação, a categoria com índice de sítio superior não pôde ser simulada devido à falta de informação sobre esta classe.

5.4 Índice de Fertilidade

Na ausência de análises de solo para a área de estudo, o Índice de Fertilidade foi determinado através da correlação desse valor com um índice de produtividade do povoamento. O índice de sítio (SI) foi identificado como um indicador eficaz de produtividade florestal, conforme evidenciado por estudos anteriores (Burkhart e Tomé,

2012), desempenhando um papel crucial em diversos modelos de crescimento e rendimento (Weiskittel et al., 2011). Considerando que as funções do Índice de Sítio (SI) estão bem estabelecidas e prontamente disponíveis para esta espécie na região sudeste dos Estados Unidos (Pienaar et al., 1996; Yin et al., 1998), optou-se por empregar a abordagem de correlacionar a Fertilidade Relativa (FR) com as variações no Índice de Sítio.

O cálculo do Índice de Fertilidade do solo empregado neste estudo baseou-se na equação proposta por Gonzalez-Beneck et al. (2014), que utilizou dados do estudo IMPAC (Jokela et al., 2010). Nessa calibração, foram atribuídos valores de FR de 0,18 para talhões com SI de 18 m e FR de 1 para talhões com SI igual a 29,5 m. A equação correspondente (37) é expressa da seguinte forma:

$$FR = -1,0979 + 0,0712 * SI \quad (37)$$

Onde: FR = representa o Índice de Fertilidade; SI = Índice de Sítio.

Os valores do índice de fertilidade extraídos da equação apresentada e empregados no seguinte estudo piloto de calibração podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Índice de Fertilidade do solo para o estudo piloto de calibração e validação do modelo 3PG para a espécie *P. elliottii*

	Talhão	Espécie	SI	FR
	-	-	m	-
Calibração	302-A	<i>P. elliottii</i>	40,26	1,0
	420-A	<i>P. elliottii</i>	27,82	0,9
	419	<i>P. elliottii</i>	25,81	0,7
	412	<i>P. elliottii</i>	26,31	0,8
	327-A	<i>P. elliottii</i>	22,31	0,5
	329	<i>P. elliottii</i>	21,70	0,4
Validação	201-A	<i>P. elliottii</i>	25,44	0,7
	504-B	<i>P. elliottii</i>	25,47	0,7
	207-B	<i>P. elliottii</i>	19,64	0,3
	418-B	<i>P. elliottii</i>	22,58	0,5
	503-B	<i>P. elliottii</i>	26,37	0,8
	107	<i>P. elliottii</i>	26,21	0,7

Nota: SI: Índice de Sítio; FR: Índice de Fertilidade.

5.5 Estimativas dendrométricas

Devido à restrição imposta pela disponibilidade de apenas três medições ao longo dos anos nos dados do inventário original, procurou-se obter medidas adicionais como uma estratégia para contornar esse desafio. Dado que todas as medições existentes referem-se a árvores já em idade adulta, tornou-se necessário inserir dados correspondentes aos 2 anos de idade, utilizando a plataforma SisPinus. Essa inclusão de dados em tenra idade foi realizada com o objetivo de estabelecer um ponto de referência inicial para o início das simulações.

Os softwares, denominado com o prefixo "Sis" seguido pelo nome popular da espécie ou gênero, como é o caso do SisPinus, simulam uma descrição do crescimento e produção da floresta, conforme os regimes de manejo indicados pelo usuário. Para operar os simuladores "Sis", é necessário que o usuário forneça dados do inventário florestal. Desta forma, os softwares simulam o crescimento e a produção futura, indicando a quantidade de madeira que a floresta produzirá em diferentes idades. Esses simuladores possibilitam simular desbastes e testar qualquer regime de manejo que se deseje aplicar nos povoamentos florestais (Oliveira, 2018).

Nesse contexto, foram obtidas estimativas de idade, altura, DAP, área basal e volume a partir do mesmo. Esses dados foram utilizados na calibração do modelo 3-PG para a espécie em questão, incorporando a medição simulada aos 2 anos do SisPinus e as três medições de inventário da espécie já adulta fornecidas pela empresa. Adicionalmente, foi realizada uma simulação do comportamento do povoamento entre o segundo ano e a idade do primeiro inventário de 2020, utilizando a plataforma do Sispinus para compreender o desempenho do modelo 3-PG.

No que diz respeito aos requisitos mínimos para operação do software, são necessários dados como índice de sítio, número de árvores por hectare e idade da floresta (APÊNDICE A).

5.6 Biomassa Florestal

Conjuntos iniciais de biomassa das folhas (WF), tronco (WS) e raiz (WR) são necessários para a inicialização do modelo. Segundo Gonzalez-Beneck et al. (2014) se o usuário do modelo não tiver estimativas iniciais de biomassa para o povoamento a ser simulado, que foi o caso enfrentado neste estudo, funções gerais de biomassa para

folhagem e caule que usam DAP, altura total (Ht) e idade podem ser usadas como preditores. Desse modo, como os valores de dbh Ht são conhecidos, os modelos selecionados do autor Gonzalez-Beneck et al. (2014) foram (38 e 39):

$$W_{F,S} = W_1 dbh^{w_2} Ht^{w_3} Age^{w_4} \quad (38)$$

$$W_R = r_1 WAG \quad (39)$$

Onde: WF = massa seca da folhagem (kg árvore⁻¹); WS = massa seca da estrutura do tronco (kg árvore⁻¹); WR = massa seca da raiz (kg árvore⁻¹); WAG = massa seca total acima do solo (WS + WF; kg árvore⁻¹) dbh = diâmetro altura do peito 1.37 m (cm); Ht = altura total da árvore (m); e w1 a w4 são parâmetros de ajuste de curva, expressos na Tabela 4.

Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros de ajuste de curva para previsão de WF, WS e WR usados para inicialização do 3PG

Modelo	Equação	Parâmetro	Estimativa do parâmetro
Altura > 3 m	W _F	w1	0,0069
		w2	2,8123
		w3	-0,2932
		w4	-0,1377
	W _S	w1	0,0140
		w2	2,0202
		w3	0,9804
		w4	0,1181
W _R	r1	0,1456	

Nota: W_F: massa seca da folhagem (kg árvore⁻¹); W_S: massa seca da estrutura do tronco (kg árvore⁻¹); W_R: massa seca da raiz (kg árvore⁻¹). Fonte: Adaptado de Gonzalez-Beneck et al. (2014).

Os valores de biomassa obtidas para os períodos estudados para a calibração e validação do povoamento em questão estão exemplificados na Tabela 5.

Tabela 5 - Previsões de diferentes compartimentos de biomassa para os três anos de medições estudadas

	Medições	Talhão	Espécie	Idade	\overline{DAP}	\overline{H}	WF	WS	WR
	anos	-	-	anos	cm	m	ton/ha	ton/ha	ton/ha
Calibração	2020	302-A	<i>P. elliottii</i>	6,5	14,9	12,2	6,86	63,92	10,31
	2021	302-A	<i>P. elliottii</i>	7,2	16,1	12,6	8,33	78,09	12,58
	2022	302-A	<i>P. elliottii</i>	8,5	17,1	15,4	9,09	109,51	17,27
	2020	420-A	<i>P. elliottii</i>	11,8	19,5	15,9	7,78	95,71	15,07
	2021	420-A	<i>P. elliottii</i>	12,6	20,1	16,7	8,22	106,84	16,75
	2022	420-A	<i>P. elliottii</i>	13,8	20,1	17,6	8,00	113,69	17,72
	2020	419	<i>P. elliottii</i>	16,8	24,5	19,6	9,31	136,46	21,22
	2021	419	<i>P. elliottii</i>	17,6	24,8	20,2	9,49	144,85	22,47
	2022	419	<i>P. elliottii</i>	18,8	24,8	20,9	9,31	150,94	23,33
	2020	412	<i>P. elliottii</i>	17,8	23,3	20,2	8,08	130,03	20,11
	2021	412	<i>P. elliottii</i>	18,6	23,6	20,7	8,27	137,39	21,21
	2022	412	<i>P. elliottii</i>	19,8	23,7	22,1	8,14	148,84	22,86
	2020	327-A	<i>P. elliottii</i>	18,8	20,7	17,9	6,59	101,30	15,71
	2021	327-A	<i>P. elliottii</i>	19,6	21,1	18,4	6,86	108,71	16,83
	2022	327-A	<i>P. elliottii</i>	20,8	21,4	19,3	6,98	118,04	18,20
	2020	329	<i>P. elliottii</i>	16,8	22,6	16,4	7,17	89,26	14,04
	2021	329	<i>P. elliottii</i>	17,6	23,1	17	7,49	97,17	15,24
	2022	329	<i>P. elliottii</i>	18,8	22,8	17,7	7,07	99,22	15,48
Validação	2020	201-A	<i>P. elliottii</i>	16,8	22	18,8	7,17	108,61	2,09
	2021	201-A	<i>P. elliottii</i>	17,6	22,5	19,3	7,53	117,26	2,19
	2022	201-A	<i>P. elliottii</i>	18,8	22,3	20,6	7,31	126,58	2,13
	2020	504-B	<i>P. elliottii</i>	19,8	22,5	20,8	9,09	160,37	24,67
	2021	504-B	<i>P. elliottii</i>	20,6	22,6	21,1	9,12	164,87	25,33
	2022	504-B	<i>P. elliottii</i>	21,90	26,1	22,80	10,46	189,34	29,09
	2020	207-B	<i>P. elliottii</i>	18,8	16,9	14,7	7,46	104,69	16,33
	2021	207-B	<i>P. elliottii</i>	19,6	17,7	15,3	8,35	120,13	18,71
	2022	207-B	<i>P. elliottii</i>	20,8	18,6	16,8	9,14	144,70	22,40
	2020	418-B	<i>P. elliottii</i>	20,8	24,3	19,5	7,62	117,93	18,28
	2021	418-B	<i>P. elliottii</i>	21,6	25	20	8,15	128,60	19,91
	2022	418-B	<i>P. elliottii</i>	22,8	25,9	20,8	8,83	144,46	22,32
	2020	503-B	<i>P. elliottii</i>	19,8	28,6	22,2	12,50	198,14	30,67
	2021	503-B	<i>P. elliottii</i>	20,6	28,9	22,8	12,70	208,70	32,24
	2022	503-B	<i>P. elliottii</i>	21,9	23	20,8	8,17	145,39	22,36
	2020	107	<i>P. elliottii</i>	11,8	17,3	14,6	5,73	69,45	10,95
	2021	107	<i>P. elliottii</i>	12,6	18	15,5	6,24	80,41	12,62
	2022	107	<i>P. elliottii</i>	13,8	18,8	16,6	4,91	68,26	10,65

Nota: \overline{DAP} : diâmetro médio a 1,30m de altura (média aritmética) das árvores no talhão; \overline{H} : altura média das árvores no talhão; WF = massa seca da folhagem; WS = massa seca da estrutura do tronco; WR = massa seca da raiz

5.7 Parâmetros climáticos

O modelo 3-PG requer dados climáticos abrangentes, incluindo informações sobre temperatura média máxima e mínima, precipitação, radiação solar, número de dias com chuva e ocorrência de geadas. Estes dados foram obtidos por meio da plataforma Power Data Access Viewer da NASA, disponível em (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), que tem como objetivo fornecer dados relacionados à energia solar e parâmetros meteorológicos para fins de pesquisa da NASA, bem como para apoiar iniciativas de energia renovável, eficiência energética em edifícios e demandas agrícolas. Esses produtos fundamentam-se em informações provenientes de satélites e modelos de elevada precisão e confiabilidade, viabilizando a aquisição de dados exatos sobre os recursos solares e as condições meteorológicas em regiões carentes ou desprovidas de medições de superfície (NASA POWER, 2020). Esses dados incluem estimativas de longo prazo para variáveis meteorológicas e fluxos de energia solar na superfície. Assim, foram obtidos registros diários, que foram posteriormente convertidos em médias mensais e detalhadamente documentados no Apêndice B para referência completa. A coleta desses dados priorizou fatores como altitude e a concordância de coordenadas entre as estações meteorológicas e a localização do banco de amostras. Os déficits médios mensais de pressão de vapor (VPD) foram calculados usando a relação (40) (Dye et al. 2001):

$$VPD = \frac{VPD_x - VPD_n}{2} \quad (40)$$

Em que:

$$VPD_x = 6,1078 * \text{Exp}(17,269 * T_x / (237,3 + T_x)) \quad (41)$$

$$VPD_n = 6,1078 * \text{Exp}(17,269 * T_n / (237,3 + T_n)) \quad (42)$$

Sendo: T_x = média mensal da temperatura máxima diária (°C); T_n = média mensal da temperatura mínima diária (°C).

Na determinação dos dias com geada, utilizou-se a abordagem proposta por Alvares et al. (2018), a qual estabelece que todos os dias com temperatura mínima inferior a 5°C são considerados potenciais dias com geada. O autor menciona que a temperatura

da relva é aproximadamente 5°C abaixo da temperatura a 2 metros da superfície. Portanto, 5°C na temperatura medida corresponde a 0°C na relva, indicando a ocorrência de geada.

5.8 Regimes de desbaste

Na análise dos dados fornecidos pela empresa, a detecção de desbastes foi realizada observando a redução no quantitativo arbóreo. Os talhões sujeitos a desbastes foram identificados com base na suposição de que essas intervenções seguiram a periodicidade de desbaste normalmente adotada pela empresa, ou seja, aos 8 e 14 anos. Embora as informações oficiais sobre as datas específicas dos desbastes não tenham sido fornecidas, a inferência foi feita com base nos padrões discerníveis nos dados e nas práticas usuais da empresa. Estima-se que o primeiro desbaste tenha ocorrido aos 8 anos, resultando na remoção de aproximadamente 40% das árvores, seguido por um segundo desbaste aos 14 anos, com uma retirada adicional de 40%. Em resumo, o processo teve início com 1667 árvores, diminuiu para 1000 árvores após o primeiro desbaste e, em seguida, para 600 árvores após o segundo desbaste, mantendo esta densidade até corte final. Assim, as simulações foram conduzidas com a plataforma SisPinus. O tipo de desbaste registrado no cadastro dos talhões pode variar, podendo ser apenas seletivo ou compreendendo um desbaste seletivo e um sistemático (Tabela 6).

Tabela 6 - Cadastro dos respectivos regimes de desbastes realizados nos talhões estudados.

	Talhão	Espécie	Tipo de Desbaste	Sequência linhas desbastadas
	-	-	-	-
Calibração	302-A	<i>P. elliottii</i>	Sem desbaste	-
	420-A	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	5
	419	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	5
	412	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	5
	327-A	<i>P. elliottii</i>	Seletivo	5
	329	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	5
Validação	201-A	<i>P. elliottii</i>	Seletivo	5
	504-B	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	10
	207-B	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	10
	418-B	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	10
	503-B	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	10
	107	<i>P. elliottii</i>	Seletivo e Sistemático	5

5.9 Parametrização e Calibração do modelo

De acordo com Zeigler et al. (2000), a calibração representa um processo no qual os parâmetros são ajustados para aprimorar a concordância do modelo com os dados reais. No decorrer do processo de calibração, ajustam-se os valores de determinados parâmetros e/ou variáveis que não foram mensurados durante a realização do trabalho de campo. Essa modificação é realizada com o intuito de reduzir a disparidade entre os valores estimados e os efetivamente medidos, resultando em uma melhoria na precisão do modelo (Borges, 2009).

Neste estudo, a calibração do modelo proposto foi conduzida utilizando a versão Microsoft Excel 3PGpjs v2.6 do 3-PG (Apêndice E). Os detalhes de cada talhão foram inseridos em planilhas individuais, as quais, quando agrupadas, constituíram seis sites que formaram um multisite. Estes dados englobaram informações de inicialização do povoamento, fatores locais e eventos silviculturais (Apêndice C). Cada planilha continha uma tabela com dados observados do povoamento, nomeadamente volume de madeira por hectare ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), número de árvores por hectare ($\text{árv} \text{ha}^{-1}$), biomassa das folhas, raízes e caule ($\text{ton} \text{ha}^{-1}$) estimadas por meio da base de dados de inventário florestal (DAP, idade e altura), bem como parâmetros dendrométricos aos 2 anos de idade estimados por meio da plataforma SisPinus. Os talhões foram simulados em dois cenários distintos, mantendo, no entanto, os mesmos parâmetros para ambas as situações. Uma das simulações traduziu o progresso do modelo considerando uma faixa etária mais jovem do povoamento, inicializando a análise a partir dos 2 anos de idade com informação obtida na plataforma SisPinus (inicializando com dados de biomassa aos 2 anos - mais jovem do povoamento). A segunda simulação abordou talhões de idade mais avançada, começando a avaliação a partir do primeiro inventário medido em 2020, fornecido pela empresa parceira do projeto (inicializando com dados de biomassa aos 17, 18 anos em média - mais velhas).

No que diz respeito aos eventos silviculturais, o modelo leva em conta a realização de desbastes, conforme mostrado no Apêndice D. Para a inclusão dessa funcionalidade no presente estudo, tornou-se imperativo fornecer informações precisas relativas à idade do povoamento, ao número de árvores remanescentes (denominado "stocking"), e à proporção da biomassa associada às diversas componentes da árvore média (folhas, raízes e tronco, denotadas como F, R e S, respectivamente) que são submetidas a corte durante o desbaste no ano correspondente. Nesta pesquisa foi estabelecido que, para desbastes

sistemáticos, o valor de saída se aproxima de 1, representando a média da biomassa de uma árvore removida durante esse processo. Já nos desbastes seletivos, a fração removida tende a aproximar-se de 0,75, refletindo a prática comum de remover uma proporção significativa de árvores menores nesse contexto específico.

A adoção desses valores baseou-se no suporte teórico disponibilizado pelo Manual 3PGPJS User Manual of Sands (2010). Segundo este manual, o desbaste é definido como o estoque residual de árvores por hectare que resultaram do corte de desbaste na idade indicada. A quantidade de biomassa de cada árvore removida durante o desbaste é expressa como uma fração da biomassa total de folhagem, raiz e caule de uma árvore média no povoamento no momento do desbaste. Frações maiores que 1 simulam desbastes pelo alto, onde são selecionadas as árvores que exibem maior desenvolvimento no estrato, isto é, maior altura, mas que não manifestam níveis elevados de dossel e nem de crescimento em diâmetro. Desta maneira, concede-se espaço para árvores dominantes e/ou codominantes de diâmetros e dossel mais pronunciados para persistirem até o término da rotação. O procedimento de estimativa de parâmetros empregado foi semelhante ao utilizado pelos autores Sands e Landsberg (2002).

A metodologia preconizada por Sands (2004) foi seguida durante o processo de alocação de parâmetros, acompanhando a seguinte sequência: inicialmente, foram atribuídos valores aos parâmetros obtidos por meio de medição direta ou adotando valores padrões específicos para a espécie. Em seguida, foram atribuídos os valores dos parâmetros provenientes de modelagem. Por último, os parâmetros para os quais não se dispunha de dados provenientes de medição direta foram ajustados com o objetivo de otimizar as estimativas em relação aos valores observados. Cabe salientar que este procedimento final foi efetuado de maneira minuciosa, uma vez que este demanda um conhecimento aprofundado sobre os limites de variação dos parâmetros, a fim de preservar sua validade biológica.

Com base na metodologia empregada para a alocação de valores aos parâmetros, estes foram estratificados em "classes de estimativa" (Tabela 7) e "classes de sensibilidade" (Tabela 8). Adicionalmente, estes foram categorizados de acordo com o maior ou menor impacto que a variação do valor exerce nos resultados do modelo.

Tabela 7 - Categorias de avaliação atribuíveis aos parâmetros

Categoria de Previsão	Siglas	Característica
Padrão	D	Um valor genérico pode ser atribuído ao parâmetro, utilizando, por exemplo, informações provenientes do estudo de sensibilidade de outras espécies ou de conhecimento prévio.
Observado	O	O parâmetro pode ser avaliado de maneira direta, como, por exemplo, por meio da análise de trocas gasosas.
Ajustado	A	Estabelecido por meio da análise de dados experimentais, como, por exemplo, por meio de análise de regressão.
Estimado	E	O parâmetro apenas pode ser inferido de maneira indireta, por exemplo, ajustando seu valor de maneira a otimizar os resultados.

Fonte: Adaptado de Sands, (2004).

Ao analisar a sensibilidade dos parâmetros específicos da espécie no modelo (Battaglia e Sands, 1998; Esprey et al., 2004) em relação aos principais resultados do modelo (como LAI, d), é possível classificar esses parâmetros (L, M ou H) com base na precisão necessária para suas atribuições (Tabela 8).

Tabela 8 - Categorias de sensibilidade atribuíveis aos parâmetros

Categoria de Sensibilidade	Siglas	Característica
Baixa	L	Os resultados são praticamente insensíveis ao valor do parâmetro
Média	M	Os resultados são moderadamente influenciados pelo valor do parâmetro.
Alta	H	Os resultados mostram uma alta dependência em relação ao valor do parâmetro, ou sua sensibilidade varia consideravelmente entre as estações.

Fonte: Adaptado de Sands, (2004).

A categorização mencionada, desenvolvida com base nas particularidades das espécies *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus grandis*, não é concebida com a intenção de alcançar uma aplicação universal (Sands, 2004).

Contudo, apresenta-se como uma diretriz orientadora essencial no contexto do processo de atribuição de valores a serem empregados em novas espécies. Com base nessas orientações específicas, pretende-se realizar uma descrição minuciosa do procedimento adotado para a obtenção dos valores dos parâmetros, especialmente direcionado à espécie *P. elliotii*.

5.10 Parâmetros-Chave no Modelo

5.10.1 Alocação de biomassa e turnover

5.10.1.1 Alocação de biomassa

Na etapa de calibração do modelo 3PG, é fundamental obter a proporção de partição do caule (p_{FS}), que representa o rácio entre as alocações para folhas e materiais lenhosos, para dois valores diferentes de diâmetro, normalmente fixados em 2 e 20 cm (p_{FS2} e p_{FS20}).

Os parâmetros p_{FS2} e p_{FS20} , destacados na Tabela 9, demonstram uma significativa sensibilidade e demandam ajustes iterativos a fim de harmonizar o LAI com os valores observados em condições de campo.

Neste estudo, foram mantidos constantes os valores de p_{FS2} e p_{FS20} conforme definidos por Gonzalez-Beneck et al. (2014) para a espécie *P. elliotii*. Este autor fundamentou-se nos dados de Gholz e Fisher (1982) para ajustar uma função de decaimento exponencial a uma assíntota não nula, modelando a relação entre a Área Basal (BA) do povoamento e a proporção de partição entre folhagem e caule, aplicada a povoamentos de *P. elliotii* com idades entre 2 e 34 anos no norte da Flórida (Figura 4). As estimativas dos parâmetros para a nova formulação de p_{FS2} e p_{FS20} foram 0,672 e 0,289, respectivamente, conforme detalhado na Tabela 10 e expresso em cm (p_{FS2} e p_{FS20}).

Em relação aos parâmetros a_s e n_s , conforme delineado na Tabela 9, estes desempenham um papel fundamental no cálculo do diâmetro a partir da biomassa média da parte lenhosa. Preferencialmente, sua definição deve ser fundamentada em dados empíricos. É importante observar que, devido à natureza não linear das equações correspondentes, pequenas variações nos valores desses parâmetros podem resultar em disparidades significativas nos resultados de diâmetro ou área basal.

Segundo as diretrizes propostas por Landsberg et al. (2003), uma vez que esses parâmetros se encontram estabelecidos, é fundamental destacar que não devem ser alterados por meio de processos de calibração.

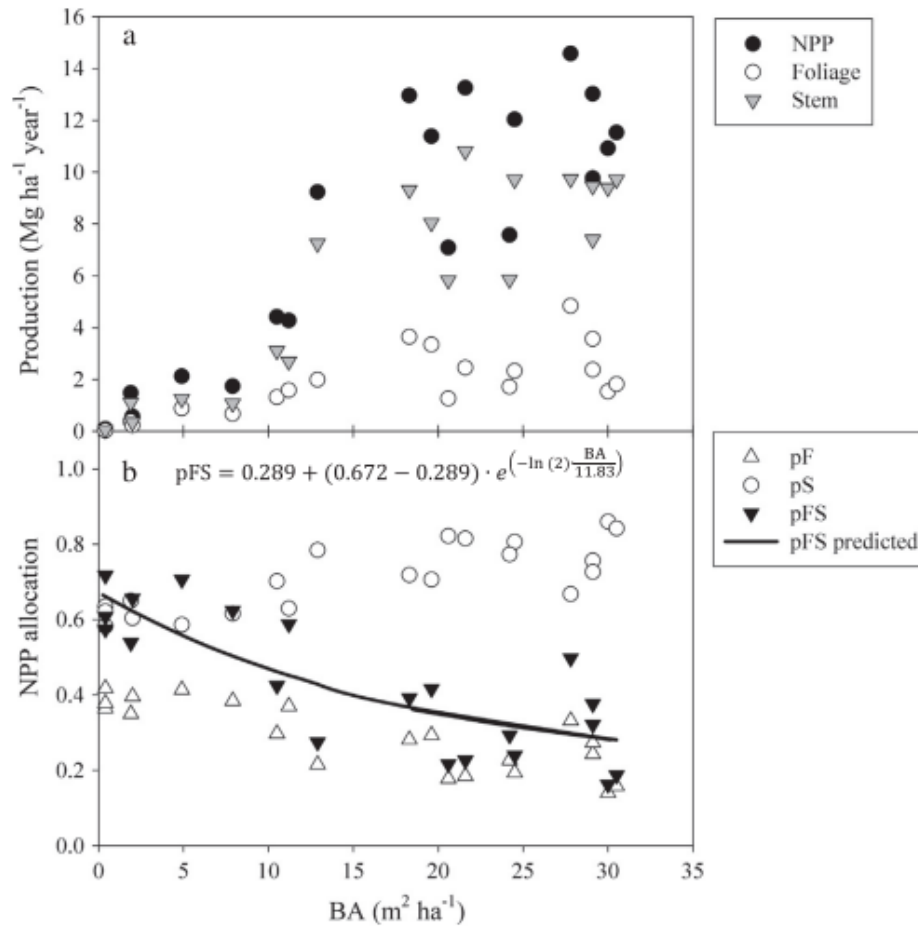


Figura 4 – Relação entre a área basal (BA) e (a) Produção Primária Líquida (NPP), quantidade de folhagem e tronco ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), e (b) distribuição de NPP para folhagem (pF), tronco (pS) e proporção de tronco para folhagem (pFS) em plantações de pinheiros de 2 e 34 anos de idades situados norte da Flórida. Fonte: Gholz e Fisher (1982).

Neste estudo, foram utilizados os dados referentes às medições realizadas no ano de 2020. Nesse contexto, foram integradas informações de 398 árvores, para as quais foram determinadas as estimativas da biomassa das diversas componentes por meio da aplicação da equação proposta por Gonzalez-Beneck et al. (2014). Essas estimativas foram então utilizadas para ajustar uma equação à curva que estabelece a relação entre a biomassa das partes lenhosas acima do solo estimada (Kg arv^{-1}) e o diâmetro das árvores observado (cm), conforme ilustrado na Figura 5. Usando o programa “solver” do Excel,

chegou-se aos valores 0,014217 e 2,992159 para a_s e n_s , respectivamente por minimização da soma de quadrados dos erros.

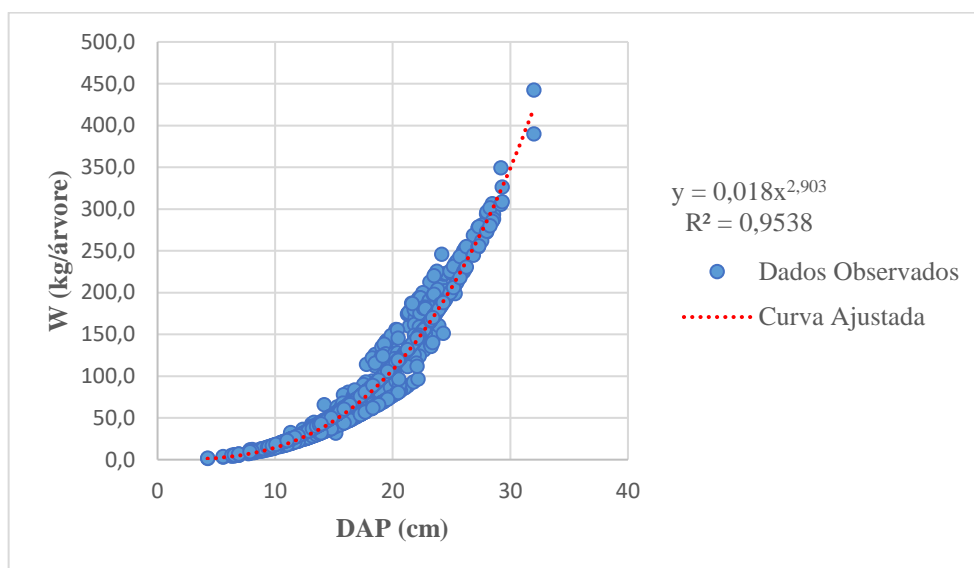


Figura 5 - Representação da biomassa lenhosa total acima do solo (WS), em kg por árvore, em função do diâmetro à altura do peito.

A fração máxima e mínima de NPP para raízes (n_{RX} n_{RN}) foi obtida através do trabalho de Gholz et al. (1986), que estudou a dinâmica da matéria orgânica de raízes finas em plantações de pinheiro (*P. elliottii*) no norte da Flórida. Os valores encontrados foram de 0,44 e 0,144, respectivamente.

5.10.1.2 Queda de Folhada e “root turnover”

O modelo 3-PG requer três parâmetros essenciais para regular a queda de serapilheira. Estes compreendem a taxa máxima de queda de serapilheira (γ_{Fx}), a taxa para povoamentos jovens (γ_{F0}), e a taxa intermediária entre a máxima e a de povoamentos jovens ($t_{\gamma F}$). Nesta pesquisa, não foi viável obter esses parâmetros diretamente dos dados de campo. Por esse motivo, optou-se por extrair estimativas desses valores da literatura.

No que diz respeito à espécie em análise à semelhança de Mello (2009), foram considerados os resultados dos estudos conduzidos por Porté et al. (2000) sobre a longevidade média das folhas na árvore para a *Pinus pinaster*, cuja longevidade foi estabelecida entre dois a três anos.

Esse período resulta em uma perda anual variando de 33% a 50%, correspondendo a taxas mensais de 0,0275 e 0,0417, respectivamente, quando expressas como frações mensais (0,33/12 e 0,5/12). Esses achados fundamentam a definição do parâmetro γ_{Fx} , representando a taxa de queda da serapilheira em plantios de *P. elliottii* em estágios adultos, assumindo o valor específico de 0,025. Essa escolha de parâmetro revela-se particularmente relevante, pois, ao adotar o valor de 0,025, o modelo demonstrou uma notável aproximação aos valores observados no processo de calibração efetuado neste estudo. Além de que 0,025 foi também o valor adotado na calibração do 3PG para o *P. pinaster* em Portugal.

Os parâmetros relevantes para a taxa inicial de queda de serapilheira em plantios florestais (γ_{F0}), e a idade média em que essa taxa atinge seu valor médio ($t_{\gamma F}$), estabelecidos em 0,001 e 24 anos, respectivamente, foram deduzidos a partir das análises conduzidas por Dye (2001). Este estudo, focalizado na modelagem do crescimento e uso de água em quatro distintos povoamentos de *Pinus patula*, empregou o modelo 3-PG como instrumento metodológico.

Por fim, optou-se por adotar um valor médio de 0,0183 para a taxa mensal de renovação das raízes (γ_R), conforme sugerido por Gholz et al. (1986).

5.10.2 Produtividade primária líquida

5.10.2.1 Modificador da temperatura

Conforme salienta Mello (2009), a definição dos parâmetros associados aos limites de temperatura (T_{min} , T_{opt} , T_{max}) devem ser baseadas em estimativas fundamentadas na compreensão aprofundada da distribuição geográfica da espécie e em suas exigências ambientais. No âmbito desta investigação, contudo, os valores específicos para os modificadores de temperatura foram extraídos de uma revisão abrangente da literatura. No estudo conduzido por Teskey et al. (1994), que examinou a influência do clima e da disponibilidade de nutrientes na fotossíntese líquida de *Pinus elliottii* adulto, foram identificados os seguintes valores: 5 °C, 25 °C e 40 °C para T_{min} , T_{opt} , T_{max} , respectivamente. Essa abordagem confere uma base robusta e empiricamente respaldada para a determinação desses parâmetros climáticos no contexto da modelagem do crescimento da espécie em questão.

5.10.2.2 Modificador da geada

Devido à sua sensibilidade atenuada, é possível designar um valor padrão para o parâmetro k_F . Em razão da pronunciada suscetibilidade da espécie a temperaturas baixas, optou-se por atribuir 1 dia de decréscimo na produção para cada dia de ocorrência de geada. O modelo em questão, conforme delineado por Landsberg e Gower (1997), restringe a influência da temperatura de maneira exclusiva às condições de geada, sob a suposição da falta de fotossíntese em temperaturas inferiores a zero. O procedimento análogo foi aplicado pelo autor Gonzalez-Benecke et al. (2014), na ausência de dados disponíveis para certos parâmetros em seu estudo, o que inviabilizou a determinação nesse momento. Portanto, este autor optou por adotar o mesmo valor reportado para *Pinus taeda*, uma espécie intimamente associada à subseção Australes do gênero *Pinus* (pinheiros do sul) (Bryars et al., 2013), que é de 1. Abordagem semelhante foi utilizada neste trabalho.

5.10.2.3 Modificadores da água do solo e condutância

Os pesquisadores Landsberg e Gower (1997) propõem a utilização de determinados valores para os parâmetros (c_θ) e (n_θ) do modificador da água do solo, com base no tipo de textura do solo. São estipulados valores para c_θ de 0,7; 0,6; 0,5 e 0,4 para areia, solo arenoso (sandy-loam), solo argiloso (clay-loam) e argila, respectivamente. Da mesma forma, são atribuídos a n_θ os valores 9, 7, 5 e 3 para os mesmos tipos de solo mencionados. Derivando desses valores, as curvas delineadas na Figura 6 constituem um exemplo gráfico que ilustra de maneira concreta essas proposições, as quais, de forma essencial, são análogas às observadas por Denmead e Shaw (1961) para a relação entre a taxa de transpiração relativa e o conteúdo volumétrico de água. O percurso da curva, ao evoluir de areia para argila, resulta em uma diminuição inicial mais pronunciada no solo argiloso, embora não tão abrupta quanto no solo arenoso. Essa variação salienta as disparidades nas propriedades hidráulicas entre solos que exibem distintas proporções de argila. Em uma determinada quantidade de água no solo, observa-se que o potencial hídrico dos solos argilosos é significativamente inferior em relação aos solos arenosos. Essa interpretação visual ressalta a complexidade das interações entre o tipo de solo, seu conteúdo de água e a transpiração, contribuindo para a compreensão abrangente desses processos no contexto do presente estudo.

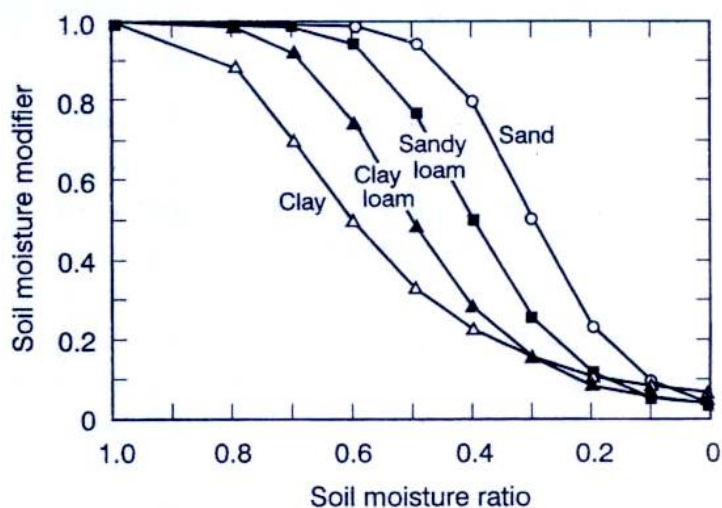


Figura 6 - Correlação entre o ajustador de umidade no solo e a proporção de umidade em quatro categorias de solo. Fonte: Landsberg e Gower (1997).

Contudo, conforme assevera Mello (2009), o modelo pode ser inicializado com a capacidade máxima de água, embora essa prática não seja compulsória. Os parâmetros (c_θ), e (n_θ) Tabela 9 são valores atribuídos por padrão, alinhados à textura do solo, e permanecem uniformes entre todas as espécies, sendo estabelecidos com base em fundamentos fisiológicos. Nesse contexto, os valores adotados neste estudo foram aqueles empregados por Gonzalez-Benecke et al. (2014), os quais se basearam nas conclusões de Bryars et al., (2013) sendo de 0,7 e 9, respectivamente para (c_θ) e (n_θ).

5.10.2.4 Efeitos da fertilidade e modificador de idade

Conforme delineado por Sithole (2011), a atribuição de valores específicos aos fatores do local constitui uma tarefa de notável complexidade. Tradicionalmente, os parâmetros associados a esse modificador são estabelecidos mediante a observação direta das características do solo. No entanto, a escassez de dados específicos nesse contexto motivou a obtenção dos valores pertinentes por meio de uma revisão abrangente da literatura.

Diante da falta de informações específicas, adotou-se a estratégia de utilizar os mesmos valores atribuídos à espécie *Pinus taeda*, conforme documentado nos estudos de Bryars et al. (2013) e Sampson et al. (2006). Em essência, optou-se por aplicar os valores relacionados à fertilidade e ao ajuste de idade previamente estabelecidos para essa espécie, dada a escassez de dados específicos sobre o local em questão. Assim, foram adotados os valores de m_0 , f_{N0} , n_{fN} como sendo 0, 0,3 e 1, respectivamente.

5.10.3 Mortalidade e auto-desbaste

A mortalidade de árvores no povoamento pode ocorrer de forma independente da densidade (eventos aleatórios ou estresse) ou dependente da densidade através do autodesbaste, seguindo uma trajetória imposta pela designada Lei dos $-3/2$, assegurando que a biomassa média do tronco não exceda o limite máximo estabelecido para cada nível de densidade (Sands, 2004). Por cada árvore que morre, é retirada uma fração (m_i) da biomassa média (w_i) do compartimento i da reserva total de biomassa. Em geral $m_i \leq 1$, principalmente devido à presença predominante de árvores dominadas que sucumbem. Pressupõe-se consistência nos valores de m_i , independentemente da densidade do povoamento.

Os valores destes parâmetros tais como taxa de mortalidade para idade avançada (γ_{N1}), taxa de mortalidade em jovens plantulas ($t=0$) (γ_{N0}), idade em que a taxa de mortalidade tem seu valor médio ($t_{\gamma N}$) e forma da resposta da mortalidade ($n_{\gamma N}$), mantiveram-se iguais aos valores por defeito do modelo original. Para os demais valores, foram empregadas as metodologias descritas no estudo de Gonzalez-Benecke et al. (2014). Com base em dados de parcelas permanentes e utilizando uma equação específica da espécie para biomassa do caule (WS), foram calculadas as projeções da biomassa máxima do caule de uma árvore individual em um povoamento com densidade de 1.000 árvores por hectare (w_{Sx1000}) e o parâmetro da regra de autodesbaste (n_N) para estimar a mortalidade de árvores condicionada à densidade. Compreendendo árvores de 2 a 25 anos, o conjunto de dados empregado no ajuste do modelo incluiu 4.332 observações de parcelas. A variação de WS, de 0,2 a 381 kg árvore⁻¹, foi observada em povoamentos com densidades (N) e índices de sítio (SI) oscilando entre 173 a 5.573 árvores por hectare e 17 a 31 m, respectivamente.

5.10.4 Estrutura da copa e processos fisiológicos

5.10.4.1 Área foliar específica

Os parâmetros relacionados à área foliar específica (SLA) destinados aos plantios em idade 0 (SLA_0) e aos plantios em idade adulta (SLA_1), bem como a determinação da idade (t_{SLA}) na qual a área foliar específica é definida como a média de (SLA_0) e (SLA_1), conforme apresentado na Tabela 9, deveriam ser obtidos mediante observação direta dos dados. Contudo, diante da ausência de informações sobre a área foliar, optou-se por empregar os resultados de Gonzalez-Benecke et al. (2014), provenientes de um estudo

prévio realizado com a mesma espécie. Nesse estudo, um decaimento exponencial para uma assíntota não nula foi ajustado a partir dos dados da Figura 7. O índice médio de área foliar específica (SNA) encontrado pelo referido autor para mudas foi aproximadamente $5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, decrescendo à medida que as árvores envelheciam, atingindo valores em torno de $3,4 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$

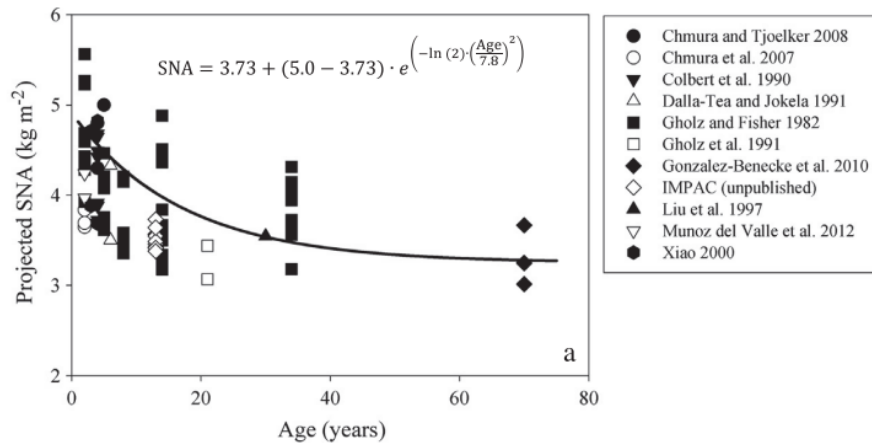


Figura 7 - Relação entre o índice médio de área foliar específica das agulhas (SNA), em kg m^{-2} , com a idade (anos). Ajuste do modelo para SNA's dependentes da idade obtidos por vários autores. Fonte: Gonzalez-Benecke et al. (2014).

5.10.4.2 Intercepção da radiação

Com base nas conclusões de Radtke e Burkhart (1999), não existe uma idade única para o fechamento do dossel (t_c) pois este varia de acordo com a espécie, dependendo da interação entre a densidade de plantação, a produtividade do local e a composição genética específica. Partindo desta permissa, Gonzalez-Benecke et al. (2014) utilizaram dados de 2 estudos em povoamentos de *P. elliotii* (mais detalhes na Tabela 1 do artigo dos autores), desenvolveram uma equação para calcular a área da copa da árvore individual e, com esta, determinaram a cobertura de copa (canopy cover) para todas as parcelas do referido estudo, envolvendo diferentes situações de idade, densidade e produtividade. Os autores confirmaram que a cobertura de copas aumenta naturalmente com a idade mas dependendo da densidade e produtividade, tendo observado que o fechamento total do dossel variou de 4 a 10 anos para grandes densidades e genéticas muito produtivas e baixas densidades e genéticas menos produtivas, respetivamente. Verificaram ainda que uma equação linear usando a área basal do povoamento como variável explicativa para estimar a área de cobertura das copas, acomodou os diferentes

contrastes de idade, densidade e produtividade. Os autores definiram um valor médio de 5 anos para se atingir o fechamento total do dossel. Foi este o valor assumido para este parâmetro neste estudo.

Quanto ao coeficiente médio de extinção luminosa (k), foi notificado um intervalo de valores entre 0,17 e 0,35 para *Pinus elliottii*, conforme destacado por Steinberg et al. (1994) e Delucia et al. (2002). Estes valores são significativamente inferiores em comparação com os relatados por Jarvis e Leverenz (1983) e Cropper e Gholz (1993), que registraram 0,62 e 0,468, respectivamente, para *Pinus elliotti*. Um valor de 0,5 demonstrou ser uma adequada adaptação para *Pinus patula*, conforme constatado por Dye (2001), e também foi empregado no estudo de Sithole (2011). Neste estudo, a determinação do k como sendo de 0,7156 ($n = 4$, $SE = 0,028$) baseou-se em dados fornecidos por Dalla-Tea e Jokela (1991), Gholz et al. (1991) e Cropper e Gholz (1993).

Por outro lado, os parâmetros relativos à proporção máxima de interceptação de chuva pelo dossel ($i_{Rx} = 0,2$) e ao índice de área foliar para interceptação máxima de chuvas ($L_{ix} = 5$) foram derivados do estudo de Sampson et al. (2006).

5.10.4.3 Produção/respiração e Condutância do dossel

Mello (2009) destaca que a obtenção dos parâmetros essenciais para calcular a produtividade primária líquida (PPL) é fundamentada no entendimento do comportamento da espécie em questão ou em valores de referência aplicáveis a diversas espécies.

Nesse estudo, os dados adotados para as estimativas de eficiência quântica do dossel (α_{Cx}), máxima condutância do dossel (g_{Cx}), LAI para máxima condutância do dossel (L_{Cx}) e resposta estomática ao VPD (k_D) foram obtidos da pesquisa conduzida por Gonzalez-Benecke et al. (2014). Os autores estimaram estes parâmetros a partir de dados do Projeto AMERIFLUX na Universidade da Flórida, obtidos de um estudo de longo prazo (>14 anos) de quantificação da produção líquida em povoamentos de *P. elliottii* e que incluiu medições de fluxos de CO_2 e H_2O , usando a metodologia de “Eddy-Covariance” (Covariância de Vórtices Turbulentos) (Bracho et al., 2012).

Detalhes complementares sobre os locais de estudo e as abordagens metodológicas empregadas podem ser consultados em Clark et al., (1999, 2004) e Bracho et al. (2012).

Quanto aos demais parâmetros tais como: relação PPL/PPG (Y), mínima condutância do dossel (MinCond) e condutância na camada limite do dossel (g_B) mantiveram-se iguais aos valores por defeito do modelo original de Landsberg e Waring, (1997).

5.10.5 Propriedades de madeira e suporte

5.10.5.1 Fração de ramos e casca

A alocação de biomassa para ramos e ritidoma (p_{BB}) representa uma parcela substancial dos compostos de carboidratos, especialmente em fases iniciais de desenvolvimento. Os parâmetros (p_{BB0}), (p_{BB1}) e (t_{BB}) (conforme detalhado na Tabela 9) foram derivados por meio de uma correlação elaborada com dados próprios do presente estudo, a partir do inventário florestal coletado em campo. Essa correlação foi estabelecida mediante a análise da relação entre o diâmetro das árvores e o diâmetro da casca, visando determinar a variação percentual da casca em função da idade. Inicialmente, essa análise foi conduzida em escala de parcela, sendo posteriormente extrapolada para o nível de talhão.

A abordagem em nível de talhão foi realizada mediante uma correlação, levando em consideração a média das idades e espessuras de casca conforme demonstrado na Figura 8, culminando em uma equação ajustada $y = 0,2755x - 0,36$. Ao aplicar essa equação à variável idade, foram obtidos 0,28 cm de casca para povoamentos mais jovens (1 ano de idade) e 0,07 cm para povoamentos mais antigos (50 anos de idade).

A partir dessas estimativas, calculou-se a diferença em relação aos valores padrão adotados para as espécies *Pinus pinaster* e *Pinus radiata*, estabelecidos em 0,5 para fracBB0 e 0,1 para fracBB1 . Esses valores de referência foram utilizados para avaliar a discrepância em relação às espessuras de cascas observados no campo.

Dessa análise, resultaram valores finais de 0,22 para fracBB0 , 0,03 para fracBB1 e 5 para t_{BB} no contexto do *P. elliotti*. Essa diferença entre os valores padrão e os obtidos no estudo de campo foi adotada para proporcionar uma estimativa mais equilibrada, evitando extremos, uma vez que essa abordagem demonstrou eficácia nas estimativas subsequentemente aplicadas na determinação do volume. Embora o coeficiente de determinação (R^2) obtido na simulação subsequente a nível de talhão, que foi de 0,5, não tenha alcançado nível elevado de precisão, os dados resultantes proporcionaram uma interpretação mais congruente sob uma perspectiva fisiológica em comparação com a

aplicação de uma relação identificada por Gonzalez-Benecke et al. (2014a), onde no estudo do referido autor, os valores foram derivados da relação entre a idade e o parâmetro p_BB, modelando uma função de decaimento exponencial com uma assíntota distintamente não nula.

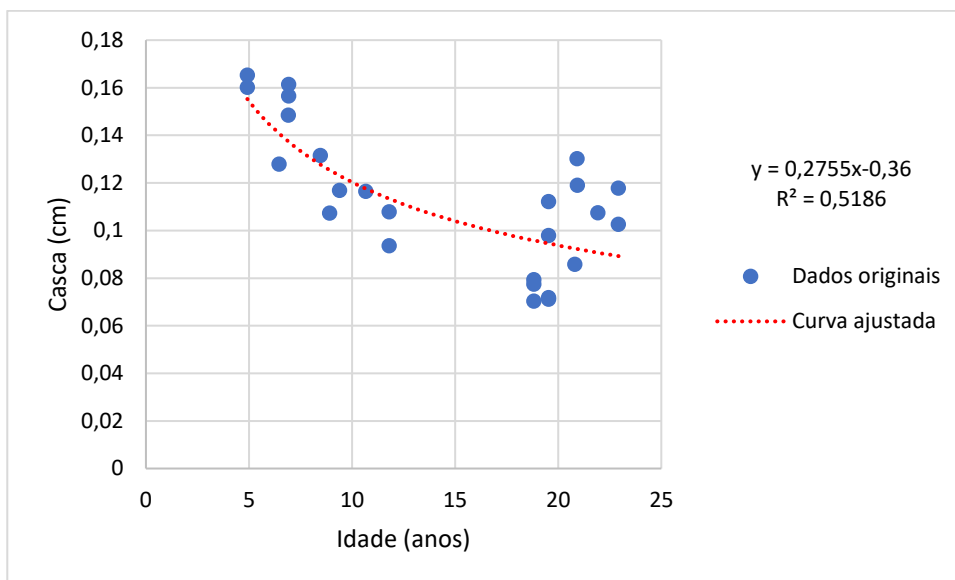


Figura 8 - Representação do ajustamento da correlação entre a casca (cm) e a idade (anos) a nível de talhão.

5.10.5.2 Densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira é um dos indicadores primordiais para a avaliação da qualidade do material lenhoso. Trata-se de um parâmetro quantitativo resultante das propriedades químicas e físicas inerentes à madeira. Conforme definido por Shimoyama e Barrichelo (1989) a sua definição é estabelecida como a relação entre o peso da madeira seca em estufa (anidra) e o volume correspondente obtido acima do ponto de saturação das fibras. No âmbito deste estudo, a seleção do valor de $0,44 \text{ g/cm}^3$, aliada a um período de crescimento de 4 anos, foi delineada considerando o intervalo de densidades de duas espécies reconhecidas: *P. pinaster* e *P. radiata*, com densidades variando entre $0,44 \text{ g/cm}^3$ e $0,48 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. No entanto, para preservar o princípio fisiológico subjacente, consultou-se a literatura, revelando uma densidade de $0,46 \text{ g/cm}^3$ para o *P. elliottii*, na altura do DAP, e de $0,45 \text{ g/cm}^3$ para o *P. taeda* (Mattos, et al., 2011).

Testes de sensibilidade foram conduzidos utilizando os parâmetros disponíveis em um estudo realizado por Gonzalez-Benecke et al. (2014), que incorpora uma estimativa variável dependente da idade. O modelo empregado para a estimativa da densidade básica (DB) segundo o autor indicou que a SG para mudas foi

aproximadamente $0,37 \text{ g/cm}^3$, com um aumento gradual à medida que as árvores atingiram idades em torno de $0,55 \text{ g/cm}^3$. Apesar de resultados semelhantes terem sido identificados por Sithole (2011) em seu estudo, no qual a densidade básica da madeira foi tratada como uma média de sete árvores de *P. elliottii* com 11 anos, sendo de 378 kg.m^{-3} (ou $0,378 \text{ t m}^{-3}$), os resultados obtidos a partir do teste de sensibilidade para os dados utilizados neste estudo não foram satisfatórios. Dese modo, preconizou-se à adoção do método proposto por Sands e Landsberg (2002) e Sampson et al., (2006), que preconiza o uso de um valor fixo para a densidade básica.

5.10.6 Outros parâmetros e factores de conversão

Os parâmetros Q_a , Q_b , gDM_{mol} e $\text{molPAR}_{\text{MJ}}$, a_H , n_{HB} , n_{HN} , a_V , n_{VB} , n_{VN} (tabela 9) são variáveis que assumem valores por defeito e não foram alteradas no presente trabalho.

5.11 Validação

A avaliação de um modelo constitui uma fase crucial em sua elaboração, abrangendo várias etapas, como verificação e validação. A validação, por conseguinte, implica na execução do modelo em condições semelhantes àquelas empregadas para a calibração, seguida pela comparação dos resultados com dados experimentais não utilizados no processo de calibração. No sentido de validar o conjunto de parâmetros obtidos, foram selecionados talhões com condições similares, nos quais foram aplicados desbastes.

Tabela 9 - Parâmetros iniciais utilizados para iniciar simulações de crescimento 3-PG em *Pinus elliottii* (Estimativa: E - Estimados, O - Observados, D - Padrão; Sensibilidade: H - Elevada, M - Média, L – Baixa)

Parâmetros padrões do 3-PG	Símbolos e nome 3-PG		Unidades	Classe de Sensibilidade	Classe de Estimativa
Partição de biomassa e rotatividade					
<i>Relações alométricas e partições</i>					
Partição folha:lenho para D=2cm	ρ_2	pFS2	-	H	D
Partição folha:lenho para D=20cm	ρ_{20}	pFS20	-	H	D
Constante de relacionamento entre massa de caule e diâmetro	a_S	stemConst	-	M	A
Potência de relacionamento entre massa de caule e diâmetro	n_S	stemPower	-	H	A
Fração máxima de PPL para as raízes	η_{Rx}	pRx	-	M	D
Fração mínima de PPL para as raízes	η_{Rn}	pRn	-	M	D
<i>Serrapilheira e renovação de raiz</i>					
Taxa de queda de serrapilheira para plantios em idades adultas	γ_{Fx}	gammaFx	mês ⁻¹	H	D
Taxa de queda de serrapilheira para plantios t=0	γ_{F0}	gammaF0	mês ⁻¹	L	D
Idade em que a taxa de serrapilheira tem seu valor médio	$t_{\gamma F}$	tgammaF	mês ⁻¹	L	D
Taxa média de ciclagem radicular	γ_R	gammaR	mês ⁻¹	H	D
PPB e modificadores da condutância					
<i>Modificador de temperatura (fT)</i>					
Temperatura mínima para crescimento	T_{min}	Tmin	°C	L	D
Temperatura ótima para crescimento	T_{opt}	Topt	°C	M	D
Temperatura máxima para crescimento	T_{max}	Tmax	°C	L	D
<i>Modificador de geada (fFRost)</i>					
Dias de produção perdidos por dia de geada	k_F	kF	Dias	L	D

Tabela 9 - Parâmetros iniciais utilizados para iniciar simulações de crescimento 3-PG em *Pinus elliottii* (Estimativa: E - Estimados, O - Observados, D - Padrão; Sensibilidade: H - Elevada, M - Média, L – Baixa) (Continuação)

Parâmetros padrões do 3-PG	Símbolos e nome 3-PG		Unidades	Classe de Sensibilidade	Classe de Estimativa
<i>Modificador de água do solo (fSW)</i>					
Déficit de proporção de umidade para $f_q = 0,5$	c_θ	SWconst	-	H	D
Déficit de proporção de poder de umidade	n_θ	SWpower	-	L	D
<i>Efeitos da fertilidade</i>					
Valor de m quando FR=0	m_0	m0	-	L	D
Valor de fNutr quando FR=0	f_{N0}	fN0	-	M	D
Potência de (1-FR) em fNutr	n_{fN}	fNn	-	L	D
<i>Modificador de Idade (fAge)</i>					
Máxima idade padrão usada no modificador	t_x	MaxAge	Years	L	D
Potencia da idade relativa em função da idade	n_{age}	nAge	-	L	D
Idade relativa para fAge=0,5	r_{age}	rAge	-	L	D
<i>Mortalidade de caule e self-thinning</i>					
Taxa de mortalidade para t grande	γ_{N1}	gammaNx	ano ⁻¹	L	D
Taxa de mortalidade de sementes (t=0)	γ_{N0}	gammaN0	ano ⁻¹	L	D
Idade em que a taxa de mortalidade tem seu valor médio	$t_{\gamma N}$	tgammaN	Ano	L	D
Forma de resposta da mortalidade	$n_{\gamma N}$	ngammaN	-	L	D
Máxima massa de caule por árvore 1.000 árvores hectares-1	w_{Sx1000}	wSx1000	kg/arv	L	D
Potência na regra self-thinning	n_N	thinPower	-	L	D
Fração média perdida de biomassa de folhas em árvores-simples por morte destas	m_F	mF	-	L	D
Fração média perdida de biomassa de raiz	m_R	mR	-	L	D

Tabela 9 - Parâmetros iniciais utilizados para iniciar simulações de crescimento 3-PG em *Pinus elliottii* (Estimativa: E - Estimados, O - Observados, D - Padrão; Sensibilidade: H - Elevada, M - Média, L – Baixa) (Continuação)

Parâmetros padrões do 3-PG	Símbolos e nome 3-PG		Unidades	Classe de Sensibilidade	Classe de Estimativa
Fração média perdida de biomassa de caule	m_S	mS	-	L	D
Estrutura do dossel e processos					
Área foliar específica					
Área foliar específica para plantios em idade 0	σ_0	SLA0	m ² /kg	L	D
Área foliar específica para plantios em idade adulta	σ_1	SLA1	m ² /kg	H	D
Idade em que a área foliar específica = (SLA0 + SLA1)/2	t_σ	tSLA	Years	L	D
Interceptação da luz					
Coefficiente de extinção da PAR pelo dossel	k	k	-	M	D
Idade de fechamento do dossel	t_c	fullCanAge	Anos	M	D
Proporção máxima de precipitação interceptada pelo dossel	i_{Rx}	MaxIntcptn	-	L	D
LAI em que ocorre a máxima interceptação da precipitação	L_{ix}	LAImaxIntcptn	m ² m ⁻²	L	D
Produção e respiração					
Eficiência quântica do dossel	α_{Cx}	alpha	molC/molPAR	H	D
Relação PPL/PPG	Y	Y	-	H	D
Condutância					
Mínima condutância do dossel		MinCond	m/s	L	D
Máxima condutância do dossel	g_{Cx}	MaxCond	m/s	H	D
LAI para máxima condutância do dossel	L_{Cx}	LAIg _{Cx}	-	L	D
Define a resposta estomática ao DPV	k_D	CoeffCond	1/mBar	L	D
Condutância na camada limite do dossel	g_B	BLcond	m s ⁻¹	L	D

Tabela 9 - Parâmetros iniciais utilizados para iniciar simulações de crescimento 3-PG em *Pinus elliottii* (Estimativa: E - Estimados, O - Observados, D - Padrão; Sensibilidade: H - Elevada, M - Média, L – Baixa) (Continuação)

Parâmetros padrões do 3-PG	Símbolos e nome 3-PG		Unidades	Classe de Sensibilidade	Classe de Estimativa
Madeira e produtividade padrão					
Fração de ramo e casca (FracBB)					
Fração de ramo e casca para plantios em idade inicial 0	p_{BB0}	fracBB0	-	L	A
Fração de ramo e casca para plantios em idade adulta	p_{BB1}	fracBB1	-	L	A
Idade em que a fração de ramo e casca é $p_{BB} = \frac{1}{2} (p_{BB0} + p_{BB1})$	t_{BB}	tBB	Anos	L	A
Densidade básica					
Densidade básica para árvores jovens	ρ_0	rhoMin	t m ⁻³	H	D
Densidade básica para árvores adultas	ρ_1	rhoMax	t m ⁻³	H	D
Idade em que a densidade básica = (rhoMin + rhoMax)/2	t_ρ	tRho	Anos	M	D
Altura do caule					
Constante de relacionamento entre altura e DAP	a_H	aH	-	H	D
Potência de relacionamento entre altura e DAP	n_{HB}	nHB	-	H	D
Potência de stocking na relação volume do caule	n_{HN}	nHN	-	H	D
Volume do caule					
Constante na relação de volume do caule	a_V	aV	-	H	D
Potência do DAP na relação volume do caule	n_{VB}	nVB	-	H	D
Potência de stocking na relação volume do caule	n_{VN}	nVN	-	H	D
Fatores de conversão					
Interceptação da relação entre rede e radiação solar	Q_a	Qa	W/m2	H	D
Inclinação da relação entre rede e radiação solar	Q_b	Qb	-	H	D
Peso molecular da matéria seca		gDM_mol	gDM/mol	H	D
Conversão de radiação solar em PAR		molPAR_MJ	mol/MJ	H	D

5.12 Avaliação das estimativas do modelo

A parametrização foi realizada de forma manual, prescindindo de métodos automatizados para a seleção de parâmetros. As projeções dos dados relativos aos povoamentos foram geradas mediante a utilização de um conjunto uniforme de parâmetros ajustados com o propósito de otimizar a conformidade do modelo. Todas as simulações foram iniciadas a partir do segundo ano de vida e encerradas no último ano de cultivo registrado para cada posição específica. As estimativas fornecidas pelo modelo 3-PG para a área basal, volume e biomassa do tronco, ramos e raízes das árvores foram contrastadas com as últimas observações registradas em cada povoamento, no caso do estudo, o inventário do ano de 2020.

Foram aplicadas as métricas de avaliação delineadas por Stape (2004) para analisar a eficácia do modelo em relação a cada conjunto de estimativas calculadas e observações. Estas métricas compreendem coeficientes de inclinação (a) e intercepto (b) na relação linear entre as previsões (P) e as observações (O), juntamente com o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro quadrático médio ($RMSE$), erro percentual ($RMSE\%$), erro médio absoluto (EMA), e o viés. O modelo ideal se define por R^2 aproximados a 1, $RMSE$ próximo de zero em relação às médias dos valores observados e previstos, a e b não significativamente distintos de 0 e 1, respectivamente (Stape, 2004). É crucial ressaltar que o R^2 , representando a proporção de variância entre os valores observados e estimados, foi escolhido como o indicador primordial da adequação do ajuste.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (43)$$

$$RMSE \% = \frac{RMSE}{\bar{y}_i} * 100 \quad (44)$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| * 100 \quad (45)$$

$$Viés = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (46)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (47)$$

Onde: n é o número total de observações; y_i é o valor real da i -ésima observação; \hat{y}_i é o valor estimado para a i -ésima observação; \bar{y}_i é a média dos valores reais.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Calibração

Os valores dos parâmetros do modelo 3-PG usados neste trabalho são reportados na Tabela 10. No processo de calibração, para que as estimativas do modelo se ajustassem melhor na região de Itararé, São Paulo, os valores dos parâmetros *stemConst*, *stemPower*, *gammaFx*, *gammaR* foram modificados em relação ao modelo original proposto por Gonzalez-Benecke et al. (2014).

A determinação de um conjunto unificado de parâmetros para um modelo de base fisiológica, como investigado nesta pesquisa, é facilitada pela existência de um sólido entendimento do significado dos parâmetros e de sua sensibilidade, bem como dos processos fisiológicos que influenciam a produção de biomassa e sua alocação.

A magnitude dos parâmetros está intrinsecamente vinculada à idade da floresta, conforme indicado por Sands (2004). Os talhões empregados neste estudo apresentavam uma ampla variabilidade em termos de condições de crescimento, idade e delineamentos experimentais. Nenhum dos talhões foi especificamente designado para a calibração do modelo 3PG, devido à falta de determinadas informações de campo, conforme destacado no presente trabalho, o que impossibilitou a inclusão de grande parte dos dados observados. Dessa forma, não foram controladas as condições de fertilização e/ou irrigação.

Tabela 20 - Conjunto de parâmetros provisórios adotados para inicializar simulações de crescimento 3-PG para *P. elliottii*

	Símbolos	Unidades	Estação / Específico da espécie	<i>P. elliottii</i>
Relações alométricas e partições	pFS2	-	Espécie	0,67
	pFS20	-	Espécie	0,29
	stemConst	-	Espécie	0,014
	stemPower	-	Espécie	2,992
	pRx	-	Espécie	0,4
	pRn	-	Espécie	0,144
Serrapilheira e renovação de raiz	gammaFx	mês ⁻¹	Ambos	0,025
	gammaF0	mês ⁻¹	Ambos	0,001
	tgammaF	mês ⁻¹	Ambos	24
	gammaR	mês ⁻¹	Ambos	0,018
Modificador de temperatura (fT)	Tmin	°C	Espécie	5
	Topt	°C	Espécie	25
	Tmax	°C	Espécie	40
Modificador de geada (fFRost)	k	dias	Espécie	1
Modificador de água do solo (fSW)	SWconst	-	Estação	0,7
	SWpower	-	Estação	9
Efeitos da fertilidade	m0	-	Espécie	0
	fN0	-	Espécie	0,3
	fNn	-	Espécie	1
Modificador de idade (fAge)	MaxAge	years	Espécie	200
	nAge	-	Espécie	1,5
	rAge	-	Espécie	0,5
Mortalidade de caule e self-thinning	gammaNx	ano ⁻¹	Espécie	0
	gammaN0	ano ⁻¹	Espécie	0
	tgammaN	ano	Espécie	0
	ngammaN	-	Espécie	1
	wSx1000	kg/arv	Espécie	220
	thinPower	-	Espécie	1,53
	mF	-	Espécie	0
	mR	-	Espécie	0,2
	mS	-	Espécie	0,4

Tabela 10 - Conjunto de parâmetros provisórios adotados para inicializar simulações de crescimento 3-PG para *P. Elliottii* (Continuação)

	Símbolos	Unidades	Estação / Específico da espécie	<i>P. elliotii</i>
Área foliar específica	SLA0	m ² /kg	Espécie	5
	SLA1	m ² /kg	Espécie	3,43
	tSLA	years	Espécie	7,79
Intercaptação da luz	K	-	Espécie	0,715
	fullCanAge	anos	Espécie	5
	MaxIntcptn	-	Espécie	0,2
	LAImaxIntcptn	m ² m ⁻²	Espécie	5
Produção e respiração	Alpha	MolC/molPAR	Espécie	0,056
	Y	-	Nenhum	0,47
Condutância	MinCond	m/s	Espécie	0
	MaxCond	m/s	Espécie	0,036
	LAIgcx	-	Espécie	3
	CoeffCond	1/mBar	Espécie	0,0598
	BLcond	m s ⁻¹	Ambos	0,2
Fração de ramo e casca (FracBB)	fracBB0	-	Espécie	0,22
	fracBB1	-	Espécie	0,03
			Espécie	
Densidade de básica	tBB	anos		5
	rhoMin	t m ⁻³	Ambos	0,44
	rhoMax	t m ⁻³	Ambos	0,44
	tRho	anos	Ambos	4
Altura do caule	aH	-	Espécie	0
	nHB	-	Espécie	0
	nHN	-	Espécie	0
Volume do caule	aV	-	Espécie	0
	nVB	-	Espécie	0
	nVN	-	Espécie	0
Fatores de conversão	Qa	W/m2		-90
	Qb	-		0,8
	gDM_mol	gDM/mol		24
	molPAR_MJ	mol/MJ		2,3

Nota: pFS2: partição folha:lenho para D=2cm; pFS20: partição folha:lenho para D=20cm; stemConst: constante de relacionamento entre massa de caule e diâmetro; stemPower: potência de relacionamento entre massa de caule e diâmetro; pRx: fração máxima de PPL para as raízes; pRn: fração mínima de PPL para as raízes; gammaFx: taxa de queda de serrapilheira para plantios em idades adultas; gammaF0: taxa de queda de serrapilheira para plantios t=0 tgammaF: idade em que a taxa de serrapilheira tem seu valor médio; gammaR: taxa média de ciclagem radicular; Tmin: temperatura mínima para crescimento; Topt: temperatura ótima para crescimento; Tmax: temperatura máxima para crescimento; kF: dias de produção perdidos por dia de geada; Swconst: déficit de proporção de umidade para fq = 0,5; Swpower: déficit de proporção de poder de umidade; m0: valor de m quando FR=0; fN0: valor de fNutr quando FR=0;

fNn: potência de (1-FR) em fNutr; MaxAge: máxima idade padrão usada no modificador; nAge: potencia da idade relativa em função da idade; rAge: idade relativa para fAge=0,5; gammaNx: taxa de mortalidade para t grande; gammaN0: taxa de mortalidade de sementes (t=0); tgammaN: idade em que a taxa de mortalidade tem seu valor médio; ngammaN: forma de resposta da mortalidade; wSx1000: máxima massa de caule por árvore 1.000 árvores hectares-1; thinPower: potência na regra self-thinning; mF: fração média perdida de biomassa de folhas em árvores-simples por morte destas; mR: fração média perdida de biomassa de raiz; mS: fração média perdida de biomassa de caule; SLA0: área foliar específica para plantios em idade 0; SLA1: área foliar específica para plantios em idade adulta; tSLA: idade em que a área foliar específica = (SLA0 + SLA1)/2; k: coeficiente de extinção da PAR pelo dossel; fullCanAge: idade de fechamento do dossel; MaxIntcptn: proporção máxima de precipitação interceptada pelo dossel; LAImaxIntcptn: LAI em que ocorre a máxima interceptação da precipitação; alpha: eficiência quântica do dossel; Y: relação PPL/PPG; MinCond: mínima condutância do dossel; MaxCond: máxima condutância do dossel; LAIgcx: LAI para máxima condutância do dossel; CoeffCond: define a resposta estomática ao DPV; BLcond: Condutância na camada limite do dossel; fracBB0: fração de ramo e casca para plantios em idade inicial 0; fracBB1: fração de ramo e casca para plantios em idade adulta; tBB: idade em que a fração de ramo e casca é $p_{BB} = \frac{1}{2} (p_{BB0} + p_{BB1})$; rhoMin: densidade básica para árvores jovens; rhoMax: densidade básica para árvores adultas; tRho: idade em que a densidade básica = (rhoMin + rhoMax)/2; aH: constante de relacionamento entre altura e DAP; nHB: Potência de relacionamento entre altura e DAP; nHN: potência de stocking na relação volume do caule; aV: constante na relação de volume do caule; nVB: potência do DAP na relação volume do caule; nVN: potência de stocking na relação volume do caule; Qa: interceptação da relação entre rede e radiação solar; Qb: inclinação da relação entre rede e radiação solar; gDM_mol: peso molecular da matéria seca; molPAR_MJ: conversão de radiação solar em PAR.

Diante desse cenário e seguindo a metodologia preconizada por Sands (2004), procurou-se atribuir, na medida do possível, o maior número de parâmetros com base nos dados observados e em estações com condições semelhantes adotadas pela mesma espécie do estudo em questão. Os parâmetros derivados dos dados foram inicialmente definidos, independentemente de sua classe de sensibilidade, e mantidos inalterados ao longo do estudo. Esses parâmetros incluíram $pFS2$, $pFS20$, pRx , pRn , $wSx1000$.

Em seguida, foram atribuídos valores disponíveis na literatura aos parâmetros, tais como $SLA0$, $SLA1$, $tSLA$, $MaxIntcptn$ e $LAImaxIntcptn$, os quais não sofreram modificações posteriores.

Devido à escassez de dados relativos aos ajustadores da condutância, foram adotados diversos valores padrão de estudos anteriores para parâmetros como kF , $Swconst$, $Swpower$, $m0$, $fN0$, fNn , $MaxAge$, $nAge$, $rAge$. A falta desses valores nas medições realizadas ou em fontes bibliográficas específicas sobre *P. elliotii* levou à decisão de recorrer à analogia com outras espécies ou à atribuição de valores convencionais, quando a natureza da espécie não tinha um impacto significativo. Valores associados a processos fisiológicos amplamente reconhecidos, como a constante na equação de Penman-Monteith e o peso molecular da madeira, representam quantidades estequiométricas claramente independentes da espécie (Sands, 2004).

No âmbito deste estudo, a escolha recaiu sobre a *P. taeda* (Landsberg et al., 2001b; Landsberg et al., 2003) como a espécie mais análoga a *P. elliotii*. Esta escolha foi baseada em sua ecologia notavelmente similar à da espécie em análise, justificando, assim, sua aplicabilidade já que possui valores disponíveis. Este procedimento visa contribuir para

uma compreensão mais robusta e abrangente dos resultados obtidos na presente dissertação.

A abordagem metodológica adotada nesta pesquisa encontra ressonância com o trabalho de Mello (2009), que empregou um método semelhante na calibração do modelo 3-PG para povoamentos de pinheiro bravo (*P. pinaster*) em Portugal. No referido estudo, a autora optou por utilizar a espécie *P. radiata*, também conhecida como pinheiro de Monterey, como um ponto de referência. Essa congruência de métodos entre as duas pesquisas, embora aplicada a espécies distintas, destaca a relevância e eficácia dessa abordagem na adaptação de modelos para diferentes contextos florestais.

Os valores ajustados obtidos neste estudo para *stemConst* e *stemPower*, que foram de 0,014 e 2,99, respectivamente, mostraram-se coerentes com os resultados de Gower et al. (1996) de 0,040 e 2,65, calculados a partir de dados que abrangem diversas espécies de *Pinus* em diferentes estágios de crescimento e localidades. Essa similaridade entre os valores determinados no presente estudo e os encontrados na pesquisa do referido autor reforça a consistência e a validade das conclusões alcançadas.

Quanto a área específica média das agulhas, foram encontradas referências em estudos anteriores. Raison et al. (1992) relataram um valor de $9,6 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, enquanto Dalla-Tea e Jokela (1991) mencionaram $1/\pi$ desse valor ($3,1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) para a área foliar projetada em agulhas de *Pinus radiata* com dois anos de idade. Por sua vez, Jokela e Martin (2000) apresentaram um valor total de $10 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ (unilateral = $3,2 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) para *Pinus elliottii*. Sithole (2011) adotou um valor médio de $3,15 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ como padrão. Destaca-se que o valor aplicado neste estudo, ajustado por Gonzalez-Benecke et al. (2014), situa-se dentro da faixa dos valores identificados em outros trabalhos para a espécie em questão.

O valor da eficiência quântica do dossel (*alpha*) Gonzalez-Benecke et al. (2014) e aplicado neste estudo, encontra-se dentro da faixa de valores relatados para outras espécies. Em estudos conduzidos por Sands e Landsberg (2002), Whitehead et al. (2002), Almeida et al. (2004) e Coops et al. (2005), foram documentados valores de 0,070, 0,055, 0,068 e 0,045 $\text{mol C mol}^{-1} \text{ fóton}$, para *E. globulus*, *D. cupressium*, *E. grandis* e *P. ponderosa*, respectivamente.

O valor médio de 5 anos para se atingir o fechamento total do dossel, adotado nesta pesquisa, difere de estudos anteriores. Ao contrastar, distintos valores de t_c foram apresentados para diversas espécies, como destacado por Xenakis et al. (2008), Pérez-Cruzado et al. (2011) e Bryars et al. (2013), os quais registraram

t_c de 18, 3 e 2 anos para *Pinus sylvestris L.*, *E. nitens* e *P. taeda*, respectivamente. Por outro lado, algumas pesquisas, como as de Whitehead et al. (2002), Dye et al. (2004) e Sands (2004), optaram por um valor de t_c de 0 anos, destacando-se a notável variabilidade desses resultados quando contrastados com os obtidos no presente estudo. Num cenário ideal, a determinação dos parâmetros deveria ser fundamentada em valores observados de variáveis de estado, tais como biomassa de folhas, tronco, raízes e densidade do povoamento. Estas representam as principais variáveis que o modelo prevê e mantêm uma relação substancial com sua dinâmica interna. Neste estudo, contudo, não havia disponibilidade de dados concretos para as variáveis de biomassa, sendo os valores utilizados derivados de equações de estimativa de biomassa. Essa situação, por si só, pode condicionar os desfechos das estimativas.

Ainda sobre a análise dos dados de inicialização do modelo, é possível observar uma relação destacada entre a variação adotada nos valores do índice de fertilidade do solo e na quantidade máxima de água disponível de talhão para talhão, a qual foi estabelecida com base na classificação do índice de sítio. É importante ressaltar que para os talhões classificados como "inferior" foi definido como valor específico de quantidade máxima de água disponível no solo 200mm. Para os índices de fertilidade médios de 0,7 e 0,8, foi adotado o valor de 240 mm, enquanto para os índices de fertilidade superiores, variando entre 0,9 e 1, foi estabelecido um valor de 300 mm.

A seleção desses parâmetros revelou-se como um elemento de grande relevância no processo de ajuste da linha de tendência, exercendo uma influência significativa que se reflete diretamente no grau de concordância entre os dados simulados e os observados. Isso destaca a importância crítica dessas decisões iniciais na configuração do modelo, enfatizando a necessidade de uma abordagem cuidadosa e detalhada na definição dos valores iniciais.

Os gráficos apresentados nas Figuras 10, 11 e 12 fornecem uma visão abrangente dos resultados obtidos em dois cenários de simulação, destacando a biomassa do tronco, o volume de madeira e a área basal em relação à idade do povoamento, considerando diferentes índices de sítio (IS): Inferior Médio e Superior.

A biomassa do tronco, desempenha um papel crucial na avaliação da saúde e produtividade do povoamento florestal, refletindo de forma significativa a quantidade total de material lenhoso produzido. O volume de madeira é uma métrica-chave na engenharia florestal, usada para avaliar a produtividade e o crescimento das florestas ao longo do tempo. O volume é fundamental para otimizar práticas de manejo florestal,

melhorar a eficiência na colheita e promover o uso sustentável dos recursos florestais. A análise da área basal, fornece informações cruciais sobre a distribuição de espaço e recursos entre as árvores no povoamento, agindo como um importante indicador da densidade de árvores e da competição por luz e nutrientes. Uma área basal equilibrada é essencial para garantir o crescimento saudável e sustentável das árvores. É importante destacar que a variação destes parâmetros em relação aos diferentes índices de sítio (Inferior, Médio e Superior) destaca a influência significativa dos fatores da estação no desenvolvimento do povoamento florestal. O índice de sítio, como reflexo da qualidade do habitat para o crescimento das árvores, revela a interação complexa entre fatores como solo, clima e topografia. Esses resultados fornecem uma base sólida para tomadas de decisão informadas em práticas de manejo florestal, visando à maximização da produtividade e à resiliência do ecossistema florestal.

Diante do exposto, foram adotados dois cenários distintos para o início das simulações de calibração. No primeiro cenário, as estimativas foram inicializadas com base nos dados de SisPinus (A), quando as árvores atingiram dois anos de idade; no segundo cenário, as estimativas foram iniciadas a partir do primeiro ano do inventário realizado em 2020 (B). Estes pontos de partida distintos refletem diferentes estratégias de inicialização do modelo. A abordagem adotada com SisPinus busca um acompanhamento mais precoce do crescimento do povoamento, visando capturar, desde o estágio inicial do desenvolvimento florestal, a evolução dinâmica das variáveis estudadas, levando em consideração a precisão com que o modelo 3-PG simula os desbastes.

Por outro lado, a escolha de iniciar as estimativas a partir do primeiro ano do inventário de 2020 sugere uma ênfase na utilização de dados de campo mais recentes e mensuráveis. Esta abordagem, ancorada no inventário de 2020, busca oferecer uma perspectiva mais próxima das condições reais do povoamento, considerando dados observados e medidos em campo.

Ao analisar as referidas Figuras 9, 10 e 11 é evidente que a precisão das estimativas apresenta variações significativas em relação ao índice de sítio. Em áreas de qualidade de sítio classificadas como "superior", as simulações exibem uma tendência a serem menos precisas. Essa possível imprecisão pode ser atribuída à escolha de faixas mais amplas de índices de fertilidade do solo, variando de 1 para o talhão (302-A) até 0,9 para o talhão (420-A), associadas a uma quantidade máxima de água disponível no solo de 300 mm para ambos.

Contrastando essa situação, em áreas classificadas como de qualidade de sítio "inferior" e "média", as simulações tendem a se aproximar mais dos dados medidos. Esses resultados sugerem uma maior eficácia do modelo nessas condições específicas. A precisão aprimorada nas simulações em sítios de qualidade inferior pode indicar uma melhor adaptação do modelo às condições de solo menos favoráveis, destacando a robustez do 3-PG em cenários desafiadores. Esta observação enfatiza a importância de considerar as variações no índice de sítio ao avaliar a precisão do modelo, contribuindo para uma compreensão mais abrangente de sua aplicabilidade em diferentes contextos florestais.

Durante a calibração, observou-se que as simulações dos talhões com o modelo proposto partindo do SisPinus (Figura 9,10,11 (A)) mostraram, em geral, uma pequena subestimativa para a variável biomassa do tronco e volume, e uma sobrestimação para a variável área basal. No entanto, essas tendências aproximaram-se dos dados reais em idades mais avançadas. O modelo levando em consideração as medições do primeiro inventário (Figura 9,10,11 (B)), por outro lado, se aproximou de forma mais efetiva das variáveis analisadas (volume e biomassa do tronco), com tendência de se afastar mais dos dados reais em idades mais jovens.

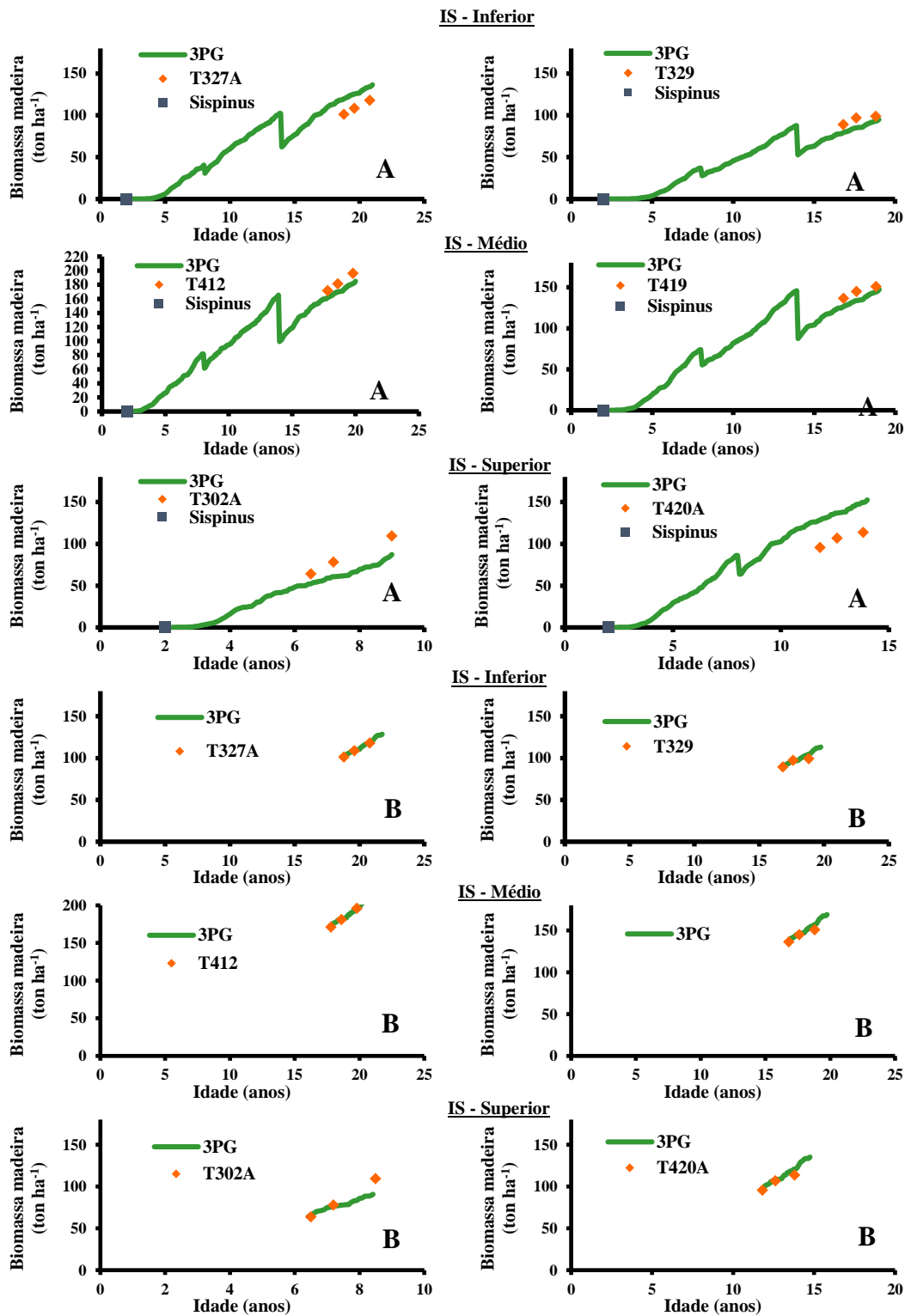


Figura 9 - Biomassa do tronco predita e observada para talhões com diferentes classes de índice de sítio (IS), com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus) (A) e primeiro ano de inventário medido (2020) (B).

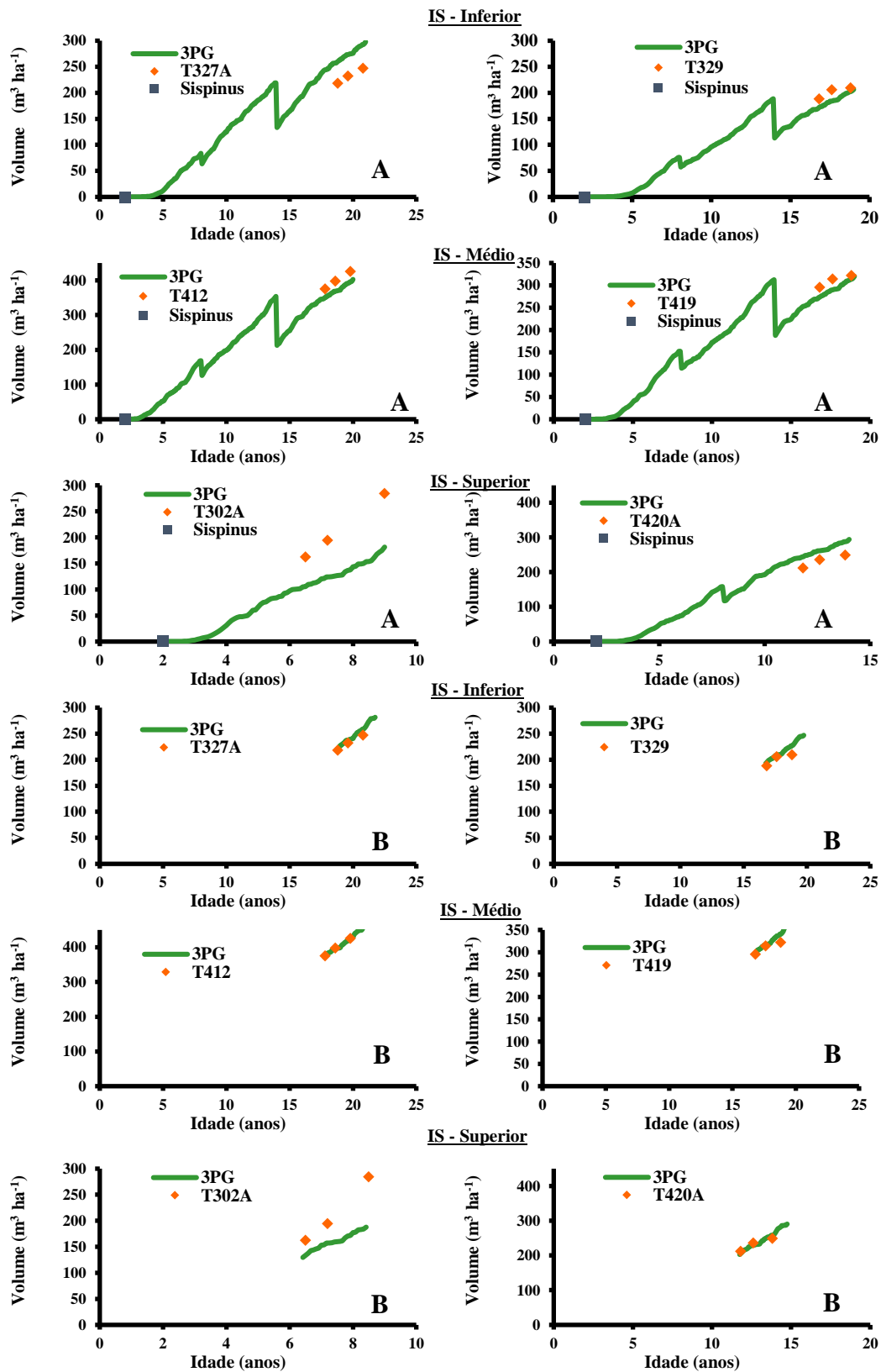


Figura 10 - Volume predito e observado para talhões com diferentes classes de índice de sítio (IS), partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus) (A) e primeiro ano de inventário medido (2020) (B).

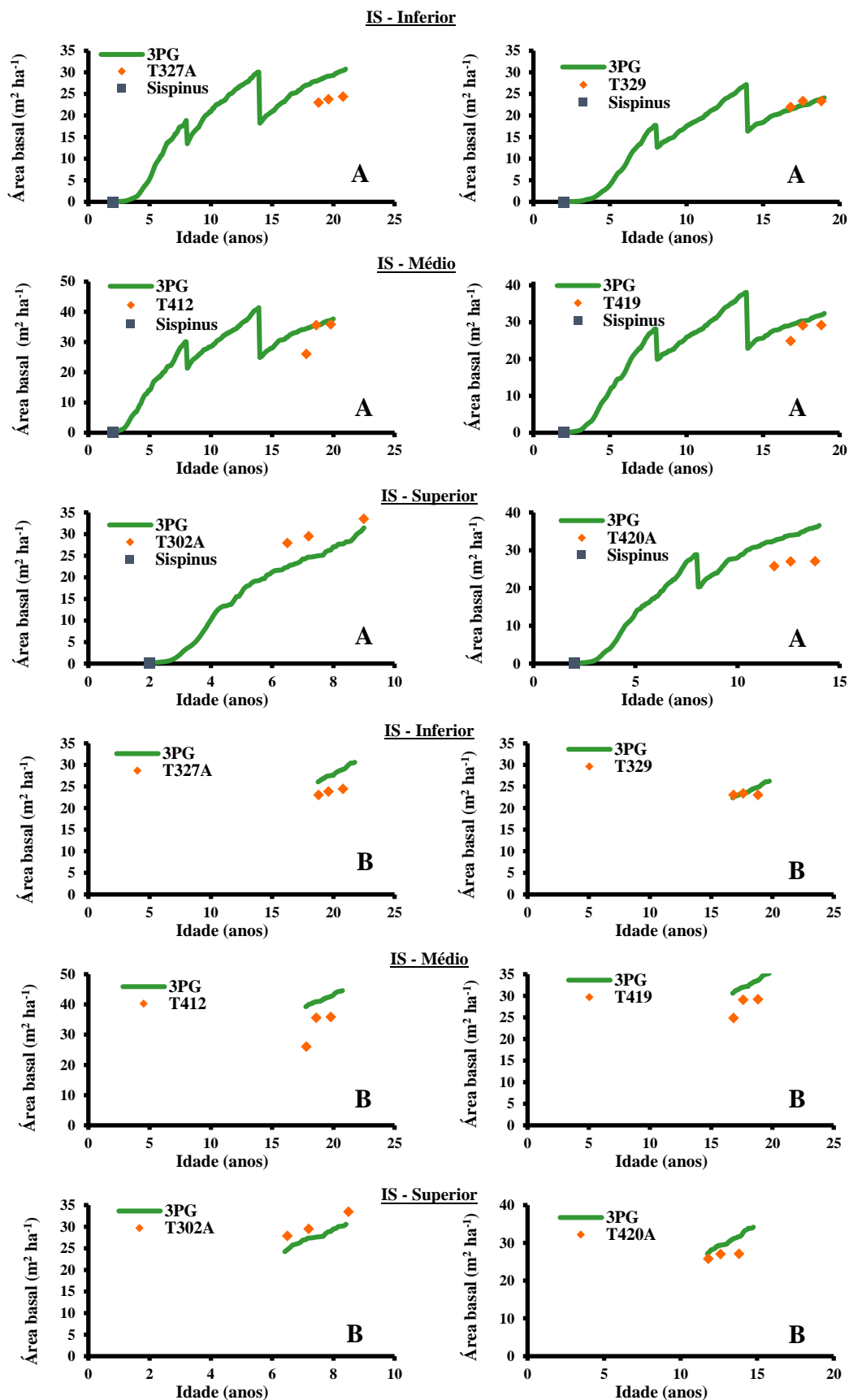


Figura 11 - Área basal predita e observada para talhões com diferentes classes de índice de sítio (IS), partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus) (A) e primeiro ano de inventário medido (2020) (B).

Comparando as duas abordagens de simulação (Figura 9,10,11 (A)) e (Figura 9,10,11 (B)), a precisão do modelo é geralmente melhor quando a simulação começa com o inventário do primeiro ano, o que sugere que a utilização de dados de campo recentes e específicos do sítio para inicializar o modelo pode resultar em estimativas mais precisas. Isso pode ser devido à incorporação de informações mais atualizadas e específicas sobre as condições de crescimento das árvores e do sítio.

No geral, esses resultados sublinham a crucial importância de incorporar dados atualizados e pormenorizados de inventário sobre as condições de crescimento das árvores e do sítio ao inicializar o 3PG para melhorar a precisão das predições do modelo. Conforme enfatizado por Mello (2009), tanto para fins de calibração quanto de validação, é imperativo realizar um número substancial de medições em cada ensaio, estabelecendo assim uma base sólida ao longo do tempo. Embora as simulações fundamentadas no SisPinus possam gerar estimativas aceitáveis, a abordagem que integra dados de campo mais recentes parece conferir maior precisão e confiabilidade à gestão florestal.

Este cenário realça, igualmente, a relevância de considerar a qualidade do sítio como um fator determinante na modelagem do crescimento florestal, uma vez que essa variável pode impactar de maneira significativa a acurácia das simulações. A escolha da abordagem de simulação mais adequada dependerá dos objetivos específicos da gestão florestal, dos recursos disponíveis para a coleta de dados e da importância de obter uma previsão precisa do volume de madeira para suportar as decisões de manejo. Este entendimento aprimorado sobre a influência da qualidade do sítio e a preferência por dados mais recentes e detalhados fornecem orientações valiosas para otimizar as práticas de modelagem e gestão, promovendo uma abordagem mais eficaz e precisa na avaliação do crescimento florestal.

A Figura 12 e a Tabela 11 proporcionam uma análise minuciosa da correlação entre os dados dendrométricos, abrangendo tanto as observações quanto as simulações do modelo. As estatísticas detalhadas enriquecem a compreensão da inter-relação entre biomassa do tronco observada e prevista, área basal e volume do povoamento, estabelecendo uma base robusta para a discussão subsequente.

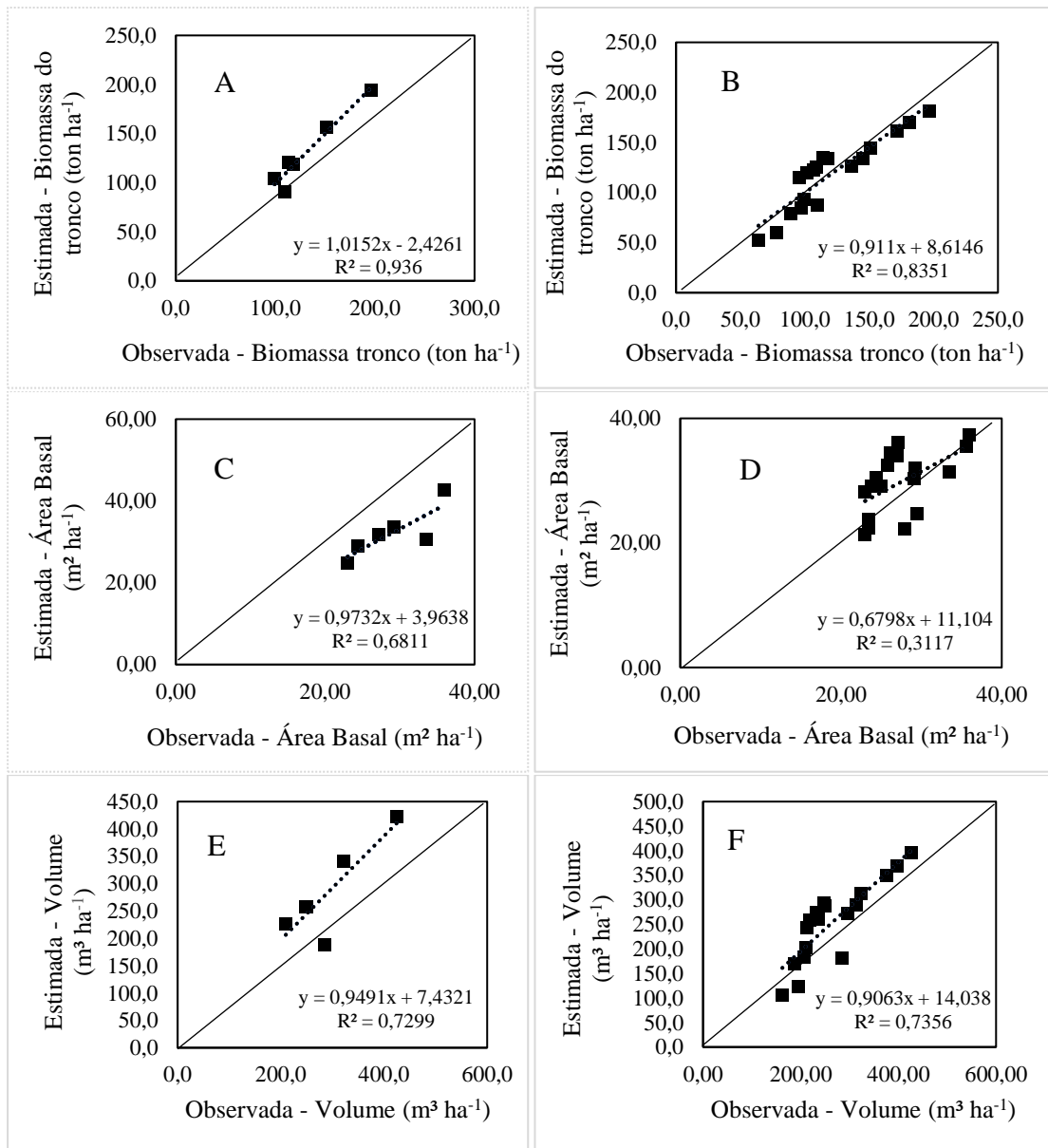


Figura 12 - Relação entre os dados de biomassa do tronco, área basal e volume observado e simulado pelo modelo 3PG a partir do primeiro ano de inventário (2020) (A, C, E) e partindo do SisPinus (2 anos) (B, D, F) para a região de Itararé.

Tabela 11 - Estatísticas que descrevem a relação entre biomassa do tronco observada e estimada (ton ha⁻¹), área basal (m² ha⁻¹), e volume do povoamento (m³ ha⁻¹) para 6 talhões estudados

Calibração/Simulação	Atributos	RMSE	RMSE (%)	EMA (%)	VIÉS (%)
Primeiro inventário (2020)	Biomassa do tronco	8,83	6,72	5	-0,3
SisPinus (2 anos)	Biomassa do tronco	14,7	12,25	12	-1,7
Primeiro inventário (2020)	Área basal	4,44	15,38	14	11,1
SisPinus (2 anos)	Área basal	4,86	17,76	15	8,6
Primeiro inventário (2020)	Volume	41,22	14,23	9	-2,5
SisPinus (2 anos)	Volume	42,11	15,89	13	-4,1

Nota: RMSE = Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio; RMSE= Erro Percentual; EMA = Erro Médio Absoluto.

Os valores das estatísticas geradas na comparação Figura 12 e Tabela 11 demonstram que o modelo, ao iniciar as estimativas a partir do primeiro inventário (2020), geralmente apresenta um desempenho superior. Isso se reflete em maiores coeficientes de determinação, erros menores e maiores índices de concordância para as variáveis analisadas, em comparação com o modelo quando se iniciam as estimativas aos 2 anos de idade.

A preferência pela inicialização a partir do primeiro inventário destaca a relevância da escolha do ponto inicial para as estimativas do modelo. No Gráfico A, observa-se uma forte correlação, evidenciada pela equação de regressão $y=1.0152x-2.461$ e um elevado coeficiente de determinação (R^2) de 0,936. Esse valor expressivo sugere uma certa precisão do modelo, explicando cerca de 93,6% da variação nos dados observados de biomassa do tronco. O intercepto ($a=2,461$) representa o valor esperado de biomassa do tronco quando a variável independente (x) é zero. Já o coeficiente angular ($b=1,0152$) indica que, para cada unidade de aumento em x (variável independente, possivelmente relacionada ao tempo ou a algum fator de crescimento), espera-se um aumento de 1,0152 unidades na biomassa do tronco.

O Gráfico B apresenta uma correlação moderada para a biomassa do tronco, com R^2 de 0,8351, indicando uma menor precisão em comparação ao Gráfico A, com cerca de 83,51% da variação nos dados observados explicada. No Gráfico C, verifica-se uma correlação baixa entre a área basal observada e simulada. Neste caso, a precisão do modelo captura aproximadamente 68,11% da variação na área basal observada. O Gráfico D revela a correlação mais fraca entre os dados observados e simulados, com uma equação de regressão $y=0,6798x+11,104$ e um R^2 de apenas 0,3117. Este valor sugere que o modelo enfrenta desafios na previsão da área basal, explicando somente 31,17% da variação observada.

Os gráficos E e F para a variável volume, exibem semelhanças notáveis, uma vez que ambos possuem coeficientes de determinação (R^2) comparáveis, registrando valores de 0,72 e 0,73, respectivamente. Estes resultados indicam uma correlação moderada entre os volumes estimados e observados pelos dois processos. Tal conclusão sugere que o modelo apresentou uma capacidade razoável de capturar as variações nos dados, mas ainda há espaço para melhorias visando uma representação mais precisa. Essa correlação média entre as estimativas e observações alinha-se com descobertas anteriores. Em um estudo de análise de sensibilidade utilizando o modelo 3PG em *Eucalyptus grandis*,

conduzido por Esprey et al. (2004), foi observada uma notável sensibilidade do volume do povoamento. Os resultados obtidos por estes autores destacaram que o volume do povoamento era sensível a diversos fatores, incluindo a relação entre produção primária líquida e bruta, densidade básica da madeira, e outras categorias de parâmetros além daquelas relacionadas às dimensões de diâmetro e altura. Essa evidência reforça a complexidade das interações que influenciam a dinâmica do crescimento e ressalta a importância de considerar múltiplos fatores para aprimorar a precisão do modelo.

A análise das estatísticas relacionadas à biomassa do tronco, área basal e volume do povoamento, apresentadas na Tabela 11, revelam diferenças significativas entre os resultados obtidos pelo primeiro inventário em 2020 e as simulações realizadas ao longo de dois anos pelo método SisPinus.

Relativamente à previsão da biomassa do tronco, verifica-se que o primeiro inventário em 2020 apresenta métricas mais favoráveis em comparação com o método SisPinus. O RMSE e RMSE% para o primeiro inventário são notavelmente inferiores (8,83 ton ha⁻¹ e 6,72%, respectivamente), enquanto o SisPinus mostra valores mais elevados (14,7 ton ha⁻¹ e 12,25%). Esses indicadores representam a média das diferenças entre as previsões e as observações, o que sugere uma maior precisão nas previsões do primeiro inventário em relação à biomassa do tronco. Adicionalmente, considerando o parâmetro EMA (Erro Médio Absoluto) que mede a média das diferenças absolutas entre as previsões e as observações, e o viés, que se refere à tendência do modelo de prever valores que são sistematicamente diferentes dos valores reais, é notável que, para a mesma variável, o EMA do primeiro inventário é de 5%, enquanto o SisPinus apresenta um EMA mais elevado de 12%. Da mesma forma, o viés mostra uma tendência para subestimação no SisPinus (-1,7%), enquanto o primeiro inventário exibe um viés próximo de zero (-0,3%).

Quanto a área basal, ambas as abordagens exibem desempenhos similares, mas a simulação considerando o primeiro inventário mantém uma ligeira vantagem. Os valores de RMSE e RMSE% para o primeiro inventário são de 4,44 m² ha⁻¹ e 15,38%, respectivamente, enquanto o SisPinus apresenta ligeiro aumento (4,86 m² ha⁻¹ e 17,76%). Assim, verifica-se uma precisão um pouco inferior nas simulações do SisPinus em comparação com o primeiro inventário, uma vez que valores mais baixos indicam um melhor ajuste do modelo aos dados. O EMA do primeiro inventário é de 14%, enquanto o SisPinus apresenta um EMA de 15%. Por outro lado, o viés é mais pronunciado no

primeiro inventário, com um valor de 11,1%, em comparação com o viés de 8,6% no SisPinus.

No que diz respeito à estimativa do volume, também se evidencia uma vantagem do primeiro inventário. Os valores de RMSE e RMSE% para o primeiro inventário são de 41,22 m³ ha⁻¹ e 14,23%, enquanto o SisPinus mostra um desempenho ligeiramente inferior (42,11 m³ ha⁻¹ e 15,89%). Novamente, os resultados sugerem uma precisão globalmente maior nas previsões do primeiro inventário em relação ao volume. O primeiro inventário mantém uma vantagem no EMA (9%) em comparação com o SisPinus (13%). O viés também favorece o primeiro inventário, exibindo uma subestimação menor (-2,5%) em comparação com o SisPinus (-4,1%), dado que idealmente, o viés deve ser próximo de zero.

Em síntese, os resultados indicam a superioridade das simulações realizadas a partir do primeiro inventário em 2020 na precisão da estimativa tanto da biomassa do tronco quanto da área basal e volume, em comparação com o SisPinus partindo da idade de 2 anos. Estes resultados estão de acordo com Tomé et al. (2005), cujo estudo, aplicando a calibração padrão para povoamentos de Eucalipto na região central de Portugal, indicou que modelos inicializados com dados dos povoamentos apresentam um ajuste melhor do que aqueles iniciados com biomassa da planta. Contudo, é importante ressaltar que ambas as metodologias utilizadas apresentam limitações, evidenciando a necessidade de considerações adicionais para melhorar a precisão das previsões e, conseqüentemente, a gestão eficiente dos recursos florestais

6.2 Validação

Com o intuito de avaliar a habilidade de generalização do uso do modelo, confrontaram-se estimativas por ele geradas com a parametrização resultante da fase de calibração com dados observados provenientes de parcelas próximas, mas independentes das utilizadas nas fases anteriores da pesquisa.

Embora as simulações realizadas durante a fase de calibração tenham favorecido o método iniciado a partir do primeiro inventário, optou-se por prosseguir na etapa de validação utilizando o método que inicia a simulação a partir dos 2 anos de idade. Essa decisão foi motivada pelo objetivo inicial do estudo, que incluía considerar as simulações de desbaste, enquanto o método iniciado a partir do primeiro inventário fornecia apenas dados pós-desbaste

Ass Figuras 13, 14 e 15 apresentam uma análise detalhada entre as estimativas e os dados observados da biomassa do tronco, área basal e volume na fase de validação. É observável que o modelo proposto tende a subestimar de forma geral todas as variáveis analisadas. Destaca-se que o modelo com a parametrização proposta, continua a evidenciar consistência nas estimativas produzidas quando aplicado a novas parcelas, com boa aproximação aos dados reais, sobretudo no caso da biomassa de madeira. Estes resultados fornecem percepções valiosas sobre a robustez e aplicabilidade dos modelos em contextos não previamente considerados, ampliando assim a compreensão de suas características de desempenho.

No geral, os resultados obtidos nesta fase de validação indicam que o conjunto de parâmetros calculados e ajustados nas etapas de parametrização e calibração permitiu que o modelo proposto reproduzisse ao longo do tempo os padrões de crescimento observados nos plantios de *P. elliottii* na região estudada do Brasil. Esses resultados estão alinhados com outros estudos sobre *Pinus* spp., que também demonstraram previsões realistas utilizando o modelo 3-PG. Em particular, estudos de Landsberg et al. (2000 e 2003); Sands e Landsberg (2002); e Tintura (2001, comunicação pessoal) corroboram essa consistência nas estimativas do modelo.

Ao examinar as Figuras 13, 14 e 15, torna-se evidente que a precisão das estimativas varia significativamente em relação ao índice de sítio. Nas áreas classificadas como de qualidade "superior", a realização de simulações revelou-se inviável, uma vez que não foram identificados cenários análogos com Índice de Fertilidade (FR) do solo aproximados a 1 e 0,9. No entanto, destaca-se o talhão 503B, caracterizado por um FR de 0,8, como aquele que mais se aproximou dessa perspectiva.

Ao analisar graficamente a precisão das estimativas de área basal, observa-se que esta pode ser ligeiramente menor em comparação com as outras duas variáveis (biomassa do tronco e volume), especialmente para o talhão 418b com índice de sítio inferior. No entanto, mesmo nesse caso, ainda reflete uma boa aderência do modelo aos dados observados. Essa observação ressalta a capacidade do modelo em se ajustar e realizar previsões mesmo em condições desafiadoras.

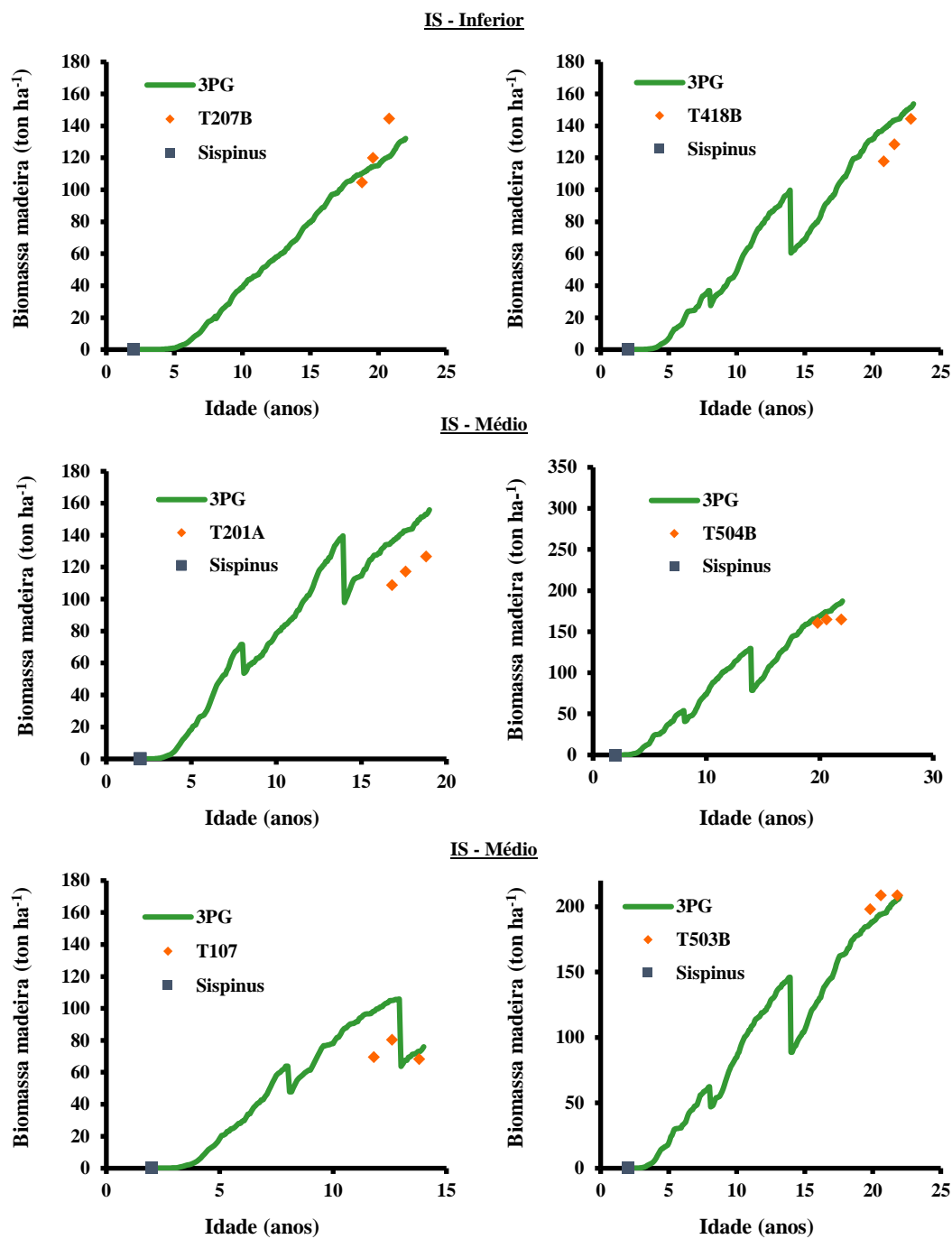


Figura 13 - Biomassa do tronco predita e observada para os talhões com diferentes classes de índice de sítio, partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus).

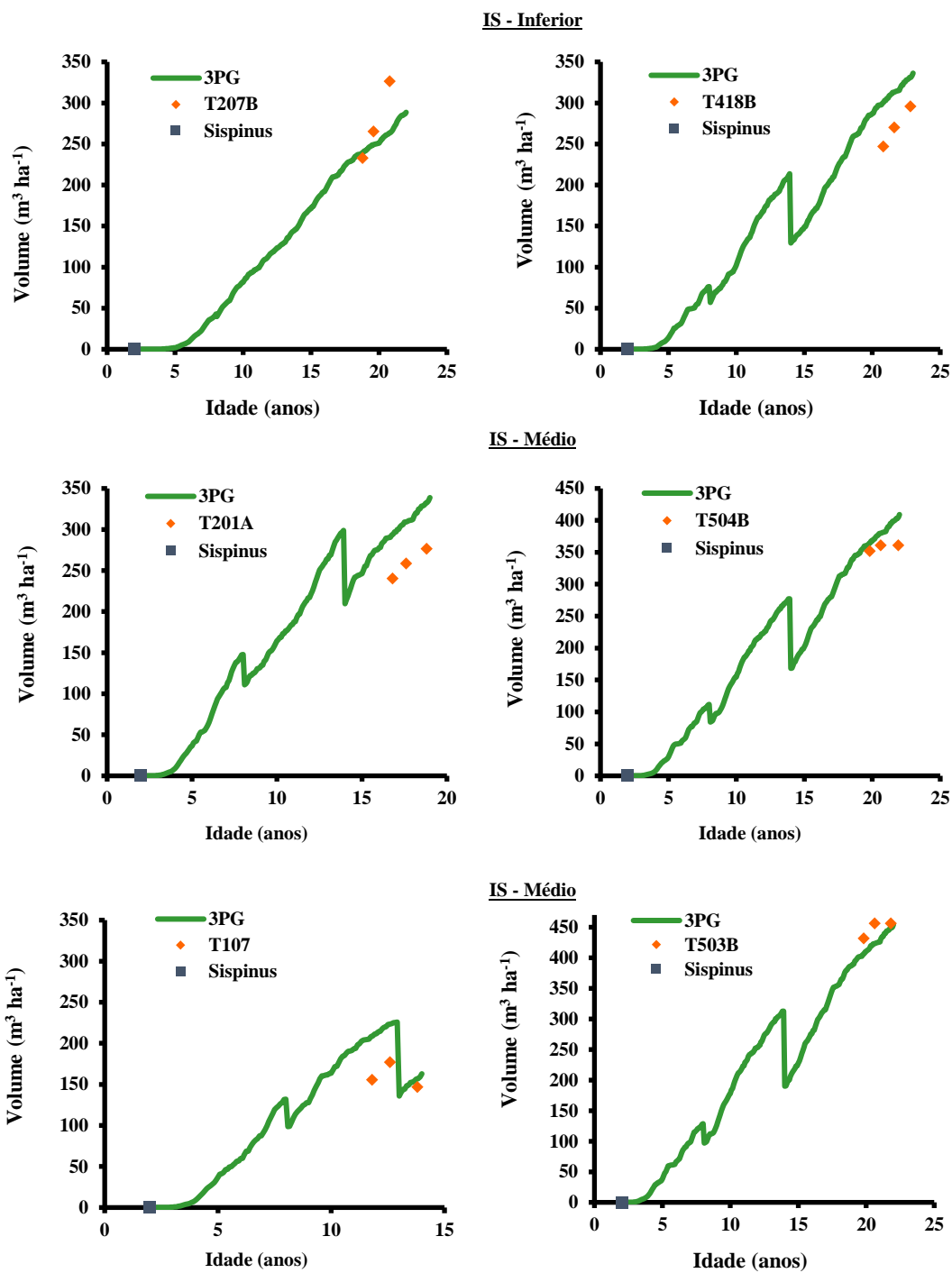


Figura 14 - Volume predito e observado para os talhões com diferentes classes de índice de sítio, partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus).

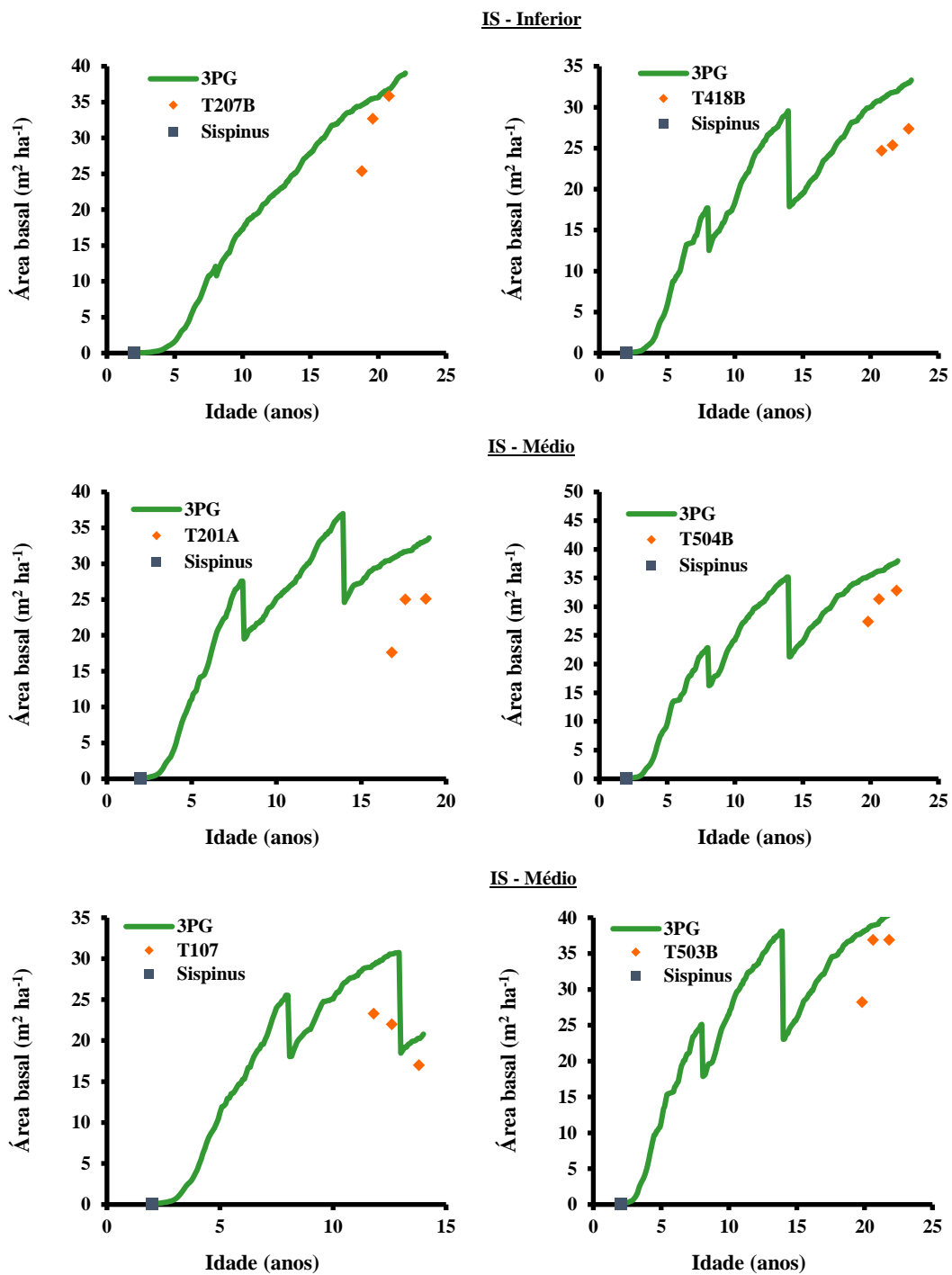


Figura 15 - Área basal predita e observada para os talhões com diferentes classes de índice de sítio, partindo com estimativas aos 2 anos de idade (SisPinus).

Quanto as análises estatísticas observadas na Figura 16 e na Tabela 12, as previsões de biomassa do tronco e volume foram relativamente boas, com R^2 de 0,8472 e 0,8192, respectivamente. No entanto, observa-se novamente uma subestima da área basal em todos os talhões estudados (Figura 16). O R^2 foi de 0,7477, indicando uma correlação moderada, explicando o modelo cerca de 74,77% da variação nos dados observados.

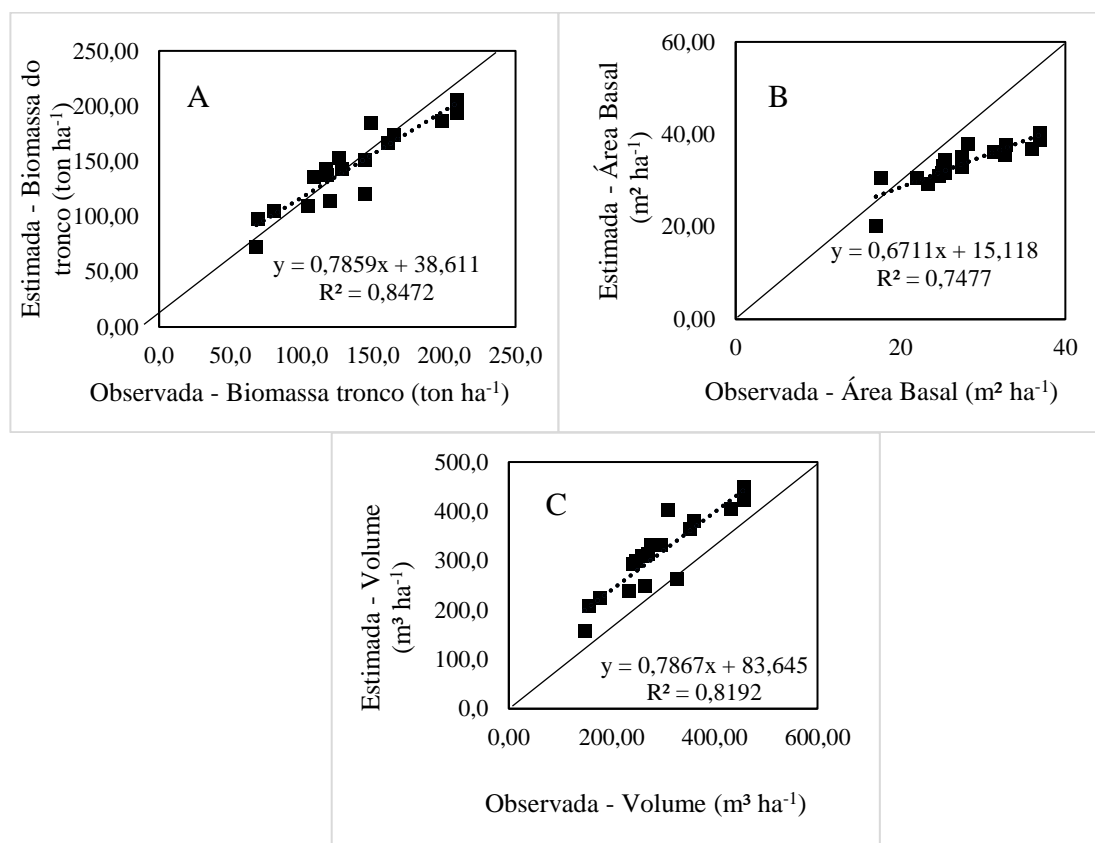


Figura 16 - Correlação entre os dados de biomassa do tronco, área basal e volume observado e simulado pelo modelo 3-PG partindo do SisPinus (2 anos) (A, B, C) para a região de Itararé.

Tabela 12 - Estatísticas que descrevem a relação entre biomassa do tronco observado e previsto (ton ha^{-1}), área basal (m^2ha^{-1}), e volume do povoamento ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) para 6 talhões estudados

Validação	Atributos	RMSE	RMSE (%)	EMA (%)	VIÉS (%)
SisPinus (2 anos)	Biomassa do tronco	19,9	16,5	14	-0,6
	Área basal	5,5	20,38	16	10,2
	Volume	44,05	15,08	13	7,3

Comparando os ajustes do modelo proposto entre as variáveis estudadas, observa-se que as estimativas para o volume (Tabela 12) apresentaram um melhor ajuste, com um erro máximo de $\pm 15,08\%$ (RMSE%) e um erro médio absoluto (EMA) de 13%. A raiz quadrada do erro quadrático médio (RSME) é uma medida da magnitude média dos erros entre as previsões e observações, sendo que um RMSE menor indica um modelo de melhor qualidade.

A avaliação da biomassa neste estudo revela um RMSE de 19,9 ton/ha (Tabela 12), indicando uma considerável variação absoluta entre as previsões do modelo e os valores reais. No entanto, o RMSE expresso em porcentagem, que alcança 16,5%, sinaliza uma precisão relativamente boa nas estimativas. Essa métrica percentual oferece uma visão mais equilibrada da acurácia do modelo, considerando a escala da variável em questão. Os autores Lands e Waring (1997) também identificaram uma excelente correspondência entre a biomassa acumulada de fuste simulada e as medições em seus estudos realizados em Haupapa, Nova Zelândia, e Tumut, New South Wales, ao longo de um período de 30 anos para a espécie *P. radiata* com densidades iniciais na ordem de 1500 árvores ha⁻¹. Segundos os mesmos, esses resultados fornecem uma base sólida para a confiança na utilidade prática do modelo. A consistência ao longo de um período substancial e em diferentes localidades, especialmente em condições similares às deste estudo, sugere que o modelo pode ser adotado como uma ferramenta confiável para previsões e tomadas de decisão práticas.

Para a área basal, o RMSE de 5,5 m² ha⁻¹ também sugere boas previsões do modelo, embora o RMSE (%) de 20,38 indique uma variabilidade percentual significativa. O erro médio absoluto (EMA) é semelhante ao RMSE, mas sem elevar os erros ao quadrado, oferecendo uma visão clara da magnitude média dos erros. Os valores de 14 ton ha⁻¹ para biomassa e 16 m² ha⁻¹ para área basal indicam que o modelo tem uma precisão média.

Por outro lado, o viés mede a tendência do modelo em prever valores consistentemente mais altos ou mais baixos do que os reais. Idealmente, o viés deve ser zero, indicando que não há erro sistemático nas previsões. No entanto, os valores de viés apresentados são -0,6 para biomassa, 10,2 para área basal e 7,3 para volume, o que sugere que o modelo tende a subestimar a biomassa do tronco e sobrestimar a área basal e o volume. Apesar disso, os valores de viés não são excessivamente altos, sugerindo que as previsões do modelo não estão fortemente enviesadas em uma direção específica. No entanto, o viés negativo na biomassa significa que o modelo tende a ser conservador

nessas estimativas, enquanto o viés positivo na área basal e volume indica uma tendência de superestimação nesse parâmetro. Esse padrão de comportamento é similar ao observado por Sithole (2011), cujos resultados indicaram uma superprevisão significativa no crescimento (DAP e altura) do talhão Kwambonambi, especialmente após o oitavo ano, ao empregar o modelo 3-PG.

É importante ressaltar que o modelo prevê a biomassa das folhas e das raízes. No entanto, esse aspecto não foi abordado neste contexto devido à insatisfatória precisão dos resultados.

7 CONCLUSÕES

Em conclusão, a análise estatística para validar os parâmetros dendrométricos do modelo 3-PG para a *P. elliottii* revelou uma boa capacidade preditiva para biomassa do tronco e volume, porém com um desempenho ligeiramente inferior na área basal. Apesar do desafio na estimativa desta última, a biomassa destaca-se como um elemento-chave. A obtenção precisa dessa variável é crucial, permitindo derivar outras e aplicar equações para modelar o ecossistema florestal de maneira eficiente. Mesmo diante das limitações na estimativa da área basal, o modelo 3-PG demonstra uma aplicação prática relevante, fornecendo insights valiosos e contribuindo para uma gestão mais eficaz dos ecossistemas florestais. A sugestão de ajustes no modelo, baseada no viés observado, ressalta a contínua busca pela melhoria da precisão preditiva.

Na abordagem metodológica adotada, algumas restrições se evidenciam, especialmente na minimização das combinações de parâmetros ajustáveis. Este desafio se torna complexo devido às interações e dependências entre os fatores que impactam a produção. Superar essa limitação exigiria uma quantidade mais substancial e variada de informações. No entanto, devido às limitações mencionadas anteriormente, não é possível afirmar com certeza que o conjunto de parâmetros obtido seja aplicável de forma abrangente ao país. Embora os resultados sejam encorajadores, é imperativo realizar mais estudos e medições, especialmente focados na biomassa e queda de folhada da *P. elliottii*, a fim de alcançar uma base de dados mais completa e definitiva.

Por se tratar de um projeto piloto, as limitações de dados disponíveis impediram uma análise mais aprofundada dos fatores que afetam as taxas de crescimento das árvores ao utilizar o 3-PG. Isso se deve ao foco exclusivo deste estudo na elaboração de parâmetros específicos do modelo 3-PG para melhorar a previsão das predições de *P. elliottii* na região sudeste do Brasil, onde nenhuma investigação prévia havia sido realizada para esta espécie. Além disso, a categorização de diâmetros individuais para diferentes usos mantém-se em aberto para investigações futuras; no entanto, foi possível simular de maneira mais precisa os impactos dos desbastes nas florestas de *P. elliottii*.

Em resumo, este estudo destaca a capacidade do modelo 3-PG na previsão da biomassa e volume da *P. elliottii*, embora tenha apresentado um desempenho ligeiramente inferior na estimativa da área basal. Embora algumas limitações metodológicas tenham sido identificadas, os resultados ainda fornecem insights valiosos para a gestão florestal. Este projeto piloto representa um avanço significativo na compreensão e previsão do

crescimento das árvores com o modelo 3-PG, especialmente para a *P. elliottii* na região sudeste do Brasil. Logo, são necessários estudos adicionais para abordar lacunas, como a categorização de diâmetros individuais e a expansão do conjunto de dados disponíveis.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

É consensual que a precisão nas previsões dos volumes de florestas é crucial para os planejadores florestais, e o modelo 3-PG apresenta potencial promissor para suprir essa necessidade. No entanto, para alcançar essa precisão nas projeções, este estudo enfatiza a importância de basear os dados iniciais nos valores registrados, evitando, na medida do possível, estimativas desses dados.

Adicionalmente, este estudo destacou a importância de seguir diretrizes específicas para obter sucesso na modelagem com o 3-PG. Estas incluem:

1. Utilizar integralmente todos os dados de entrada para configurar as previsões. Recomenda-se a seguinte abordagem:
 - Coletar dados de solo in loco para cada povoamento a ser prognosticado. Informações sobre a profundidade, textura e teor de carbono orgânico do solo frequentemente estão disponíveis em estudos anteriores; e adquirir dados de biomassa no campo sempre que possível;
 - Obter mais medições ao longo do tempo, no mínimo seis, para obter uma boa calibração. Avaliar a densidade de árvores por hectare e altura média é crucial após o declínio das taxas pós-planejamento e durante o estabelecimento total das árvores jovens. Para garantir uma biomassa inicial realista, recomenda-se iniciar as previsões no momento de um inventário de campo inicial, com o povoamento apresentando uma idade mais precoce. Esses dados iniciais permitiriam assegurar a precisão da biomassa inicial e ofereceriam insights precoces sobre a qualidade do local, orientando as estimativas de fertilidade e da máxima quantidade de água disponível no solo;
 - Em áreas florestais sem desbaste, realizar projeções até ao término da rotação; já em áreas com desbaste, empregar levantamentos prévios ao desbaste para reiniciar a simulação.
2. Desenvolver expertise na calibração do modelo 3-PG envolve explorar variados locais:

- Esse processo exige tempo, à medida que novos compartimentos são incorporados ao modelo, permitindo a comparação entre as previsões e as observações de campo. A abordagem progressiva visa aprofundar a compreensão dos fatores locais que afetam o crescimento, oferecendo novas percepções ao esclarecer discrepâncias e encontrar explicações.
3. O modelo 3-PG oferece diversas aplicações práticas integráveis às atividades florestais, proporcionando informações valiosas, tais como:
- Realizar uma análise anual dos incrementos de crescimento em diversas áreas, permitindo a atualização contínua das projeções de rendimento e melhorando o planejamento estratégico do abastecimento de madeira para as indústrias.
 - Antecipar o desenvolvimento desde as medições de meia rotação até a fase de colheita, eliminando a necessidade de levantamentos prévios à colheita.
 - Avaliar o crescimento das árvores em novas áreas florestais sem histórico de plantio, utilizando uma descrição precisa do solo e dados meteorológicos para previsões realistas de crescimento e rendimento, além de avaliação do risco de seca.
4. Apreciação concreta de espécies e parâmetros locais:
- É essencial implementar novos métodos para medir parâmetros específicos de locais para *P. elliotii*, devido à sua importância econômica no Brasil. Esses estudos teriam o potencial de simplificar e aprimorar a obtenção de um conjunto único de parâmetros que se adequaria à grande maioria das situações no país, ao restringir o número de ajustes necessários, estudos esses que sobretudo, fortaleçam o entendimento dos processos fisiológicos.

8 REFERÊNCIAS

- Abraf, A. E. D. A. 2013. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. *Anuario Estatístico da ABRAF. Tech. Rep.*
- Abreu, E. C. R. 2000. *Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para Eucalyptus grandis*. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras.
- Aguiar, A. V., Valdares, A. S., & Shimizu, J. Y. 2011. *Cultivo de Pinus, Sistemas de Produção* (N. 5). Embrapa Florestas.
- Almeida, A. C. 2003. *Application of a process-based model for predicting and explaining growth in Eucalyptus plantations*. Australian National University. Thesis Doctor of Philosophy, The Australian National University.
- Alvares, C. A., de Almeida, B. O., Vaz, R. C., Vasconcelos, T. S., & Cabral, L. C. 2018. Modelagem de áreas propensas à geada para o Eucalipto em São Paulo Modeling of frost-prone areas for Eucalyptus in São Paulo.
- Battaglia, M., & Sands, P. 1997. Modelling site productivity of Eucalyptus globulus in response to climatic and site factors. *Functional Plant Biology*, 24(6), 831-850.
- Battaglia, M., & Sands, P. 1998. Application of sensitivity analysis to a model of Eucalyptus globulus plantation productivity. *Ecological Modelling*, 111(2-3), 237-259.
- Battaglia, M., Sands, P., White, D., & Mummery, D. 2004. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 251-282.
- Beets, P. N., & Whitehead, D. 1996. Carbon partitioning in Pinus radiata stands in relation to foliage nitrogen status. *Tree physiology*, 16(1-2), 131-138.
- Borges, J. S. 2009. Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. Dissertação Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa.
- Bracho, R., Starr, G., Gholz, H. L., Martin, T. A., Cropper, W. P., & Loescher, H. W. 2012. Controls on carbon dynamics by ecosystem structure and climate for southeastern US slash pine plantations. *Ecological Monographs*, 82(1), 101-128.
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and forest meteorology*, 31(2), 159-166.
- Bryars, C., Maier, C., Zhao, D., Kane, M., Borders, B., Will, R., & Teskey, R. 2013. Fixed physiological parameters in the 3-PG model produced accurate estimates of loblolly pine growth on sites in different geographic regions. *Forest ecology and management*, 289, 501-514.
- Burkhart, H. E., & Tomé, M. 2012. *Modeling forest trees and stands*. Springer Science & Business Media.
- Campos, J. C. C., & Leite, H. G. 2006. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. UFV.
- Carneiro, C. D. R., Bistrichi, C. A., Ponçano, W. L., & de Almeida, M. A. 1981. *Mapa*

Geomorfológico do Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia.

- Clark, K. L., Gholz, H. L., & Castro, M. S. 2004. Carbon dynamics along a chronosequence of slash pine plantations in north Florida. *Ecological Applications*, 14(4), 1154-1171.
- Clark, K. L., Gholz, H. L., Moncrieff, J. B., Cropley, F., & Loescher, H. W. 1999. Environmental controls over net exchanges of carbon dioxide from contrasting Florida ecosystems. *Ecological Applications*, 9(3), 936-948.
- Coops, N. C., Waring, R. H., & Landsberg, J. J. 1998. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management*, 104(1-3), 113-127.
- Cropper Jr, W. P., & Gholz, H. L. 1993. Simulation of the carbon dynamics of a Florida slash pine plantation. *Ecological Modelling*, 66(3-4), 231-249.
- Dalla-Tea, F., & Jokela, E. J. 1991. Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stands. *Forest Science*, 37(5), 1298-1313.
- Davis, L. S., Johnson, K. N., Bettinger, P., & Howard, T. (2001). Forest Management: To Sustain Ecological, Economic, and Social Values.
- De Lucia, E. H., George, K., & Hamilton, J. G. 2002. Radiation-use efficiency of a forest exposed to elevated concentrations of atmospheric carbon dioxide. *Tree Physiology*, 22(14), 1003-1010.
- de Mello Alexandre, P. M. 2009. *Calibração do modelo 3-PG para povoamentos de pinheiro bravo Pinus pinaster em Portugal* Master dissertation, Universidade Tecnica de Lisboa Portugal.
- De Oliveira, E. B. 2018. Série " Plus" de novos softwares da Embrapa para simulação simultânea de múltiplos regimes de manejo de florestas plantadas.
- Denmead, O. T., & Shaw, R. H. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions 1. *Agronomy journal*, 54(5), 385-390.
- do Brasil, I. D. T., & Territoriais, L. 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 1 de julho de 2008. Acesso em, 10 de nov.
- Dorman, K. W., & Squillace, A. E. 1974. *Genetics of slash pine*. USDA Forest Service Research Paper WO-20, 20 p.
- Dorman, K. W., Zobel, B., & Zobel, B. J. 1973. *Genetics of slash pine* (Vol. 19). US Department of Agriculture, Forest Service.
- Dye, P. J. 2001. Modelling growth and water use in four *Pinus patula* stands with the 3-PG model. *Southern African Forestry Journal*, 2001(191), 53-64.
- Dye, P. J., Jacobs, S., & Drew, D. 2004. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve Eucalyptus plantation stands in Zululand, South Africa. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 197-218.
- Esprey, L. J., Sands, P. J., & Smith, C. W. 2004. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 235-250.

- Ferreira, M. 2000. O histórico da introdução de espécies florestais de interesse econômico e o estado de sua conservação no Brasil. In *Workshop Sobre Conservação E Uso De Recursos Genéticos Florestais* (pp. 19-66).
- Gholz, H. L., & Fisher, R. F. 1982. Organic matter production and distribution in slash pine *Pinus elliottii* plantations. *Ecology*, 63(6), 1827-1839.
- Gholz, H. L., Hendry, L. C., & Cropper Jr, W. P. 1986. Organic matter dynamics of fine roots in plantations of slash pine *Pinus elliottii* in north Florida. *Canadian Journal of Forest Research*, 16(3), 529-538.
- Gholz, H. L., Vogel, S. A., Cropper Jr, W. P., McKelvey, K., Ewel, K. C., Teskey, R. O., & Curran, P. J. 1991. Dynamics of canopy structure and light interception in *Pinus elliottii* stands, North Florida. *Ecological Monographs*, 61(1), 33-51.
- Girardin, M. P., Raulier, F., Bernier, P. Y., & Tardif, J. C. 2008. Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: a comparison of empirical, process-based, and hybrid modelling approaches. *Ecological modelling*, 213(2), 209-228.
- Gower, S. T., McMurtrie, R. E., & Murty, D. 1996. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *Trends in Ecology & Evolution*, 11(9), 378-382.
- Gonzalez-Benecke, C. A., Jokela, E. J., Cropper Jr, W. P., Bracho, R., & Leduc, D. J. 2014. Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliottii* stands using alternative methods to estimate fertility rating, biomass partitioning and canopy closure. *Forest Ecology and Management*, 327, 55-75.
- Gonzalez-Benecke, C. A., Gezan, S. A., Albaugh, T. J., Allen, H. L., Burkhart, H. E., Fox, T. R., ... & Samuelson, L. J. 2014a. Local and general above-stump biomass functions for loblolly pine and slash pine trees. *Forest Ecology and Management*, 334, 254-276.
- Harlow, W.M., E.S. Harrer and F.M. White. 1979. *Textbook of Dendrology*. McGraw-Hill, Inc. 510pp.
- HÓRUS. Instituto Hórus de Desenvolvimento e Conservação Ambiental. 1948. Recuperado em: <http://i3n.institutohorus.org.br/www/>.
- Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). 2022. *Relatório anual IBÁ 2022, ano base 2021*. Brasília.
- Jarvis, P. G., & Leverenz, J. W. 1983. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In *Physiological Plant Ecology IV: Ecosystem Processes: Mineral Cycling, Productivity and Man's Influence* (pp. 233-280). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Jokela, E. J., & Martin, T. A. 2000. Effects of ontogeny and soil nutrient supply on production, allocation, and leaf area efficiency in loblolly and slash pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(10), 1511-1524.
- Jokela, E. J., Martin, T. A., & Vogel, J. G. 2010. Twenty-five years of intensive forest management with southern pines: Important lessons learned. *Journal of Forestry*, 108(7), 338-347.
- Kronka, F. J., Bertolani, F., & Ponce, R. H. 2005. *A cultura do Pinus no Brasil*. Sociedade Brasileira de Silvicultura.
- Lamprecht, H. 1990. Silvicultura nos Tropicos: ecossistemas florestais e respectivas

especies arboreas; possibilidades e metodos de aproveitamento sustentado.

- Landsberg, J. J., & Gower, S. T. 1997. *Applications of physiological ecology to forest management*. Elsevier.
- Landsberg, J. J., & Waring, R. H. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest ecology and management*, 95(3), 209-228.
- Landsberg, J. J., Johnsen, K. H., Albaugh, T. J., Allen, H. L., & McKeand, S. E. (2001). Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. *Forest Science*, 47(1), 43-51.
- Landsberg, J. J., Waring, R. H., & Coops, N. C. 2001. The 3-PG forest model: matters arising from evaluation against plantation data from different countries. *Models for the Sustainable Management of Temperate Plantation Forests*, 31.
- Landsberg, J. J., Waring, R. H., & Coops, N. C. 2003. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management*, 172(2-3), 199-214.
- Larcher, W. (2000). *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos: RiMa, 531 p. ISBN 85-86553-03-8.
- Lemos, C. C. Z. D. 2012. *Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de Eucalyptus no nordeste do estado de São Paulo* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Maestri, R. (2003). *Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de Eucalyptus grandis considerando variáveis ambientais*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná.
- Mäkelä, A., Landsberg, J., Ek, A. R., Burk, T. E., Ter-Mikaelian, M., Ågren, G. I., ... & Puttonen, P. 2000. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree physiology*, 20(5-6), 289-298.
- Marchiori, J. N. C. 1996. *Dendrologia das gimnospermas*. UFSM.
- Mattos, B. D., Gatto, D. A., Stangerlin, D. M., Calegari, L., De Melo, R. R., & Santini, E. J. 2011. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 6(1), 121-126.
- Nutto, L., Tonini, H., Borsoi, G. A., Moscovich, F. A., & Spathelf, P. 2001. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 42, 110-122.
- Pérez-Cruzado, C., Muñoz-Sáez, F., Basurco, F., Riesco, G., & Rodríguez-Soalleiro, R. 2011. Combining empirical models and the process-based model 3-PG to predict *Eucalyptus nitens* plantations growth in Spain. *Forest Ecology and Management*, 262(6), 1067-1077.
- Perez-Garcia, J., Joyce, L. A., McGuire, A. D., & Xiao, X. 2002. Impacts of climate change on the global forest sector. *Climatic change*, 54, 439-461.
- Pienaar, L. V., & Rheney, J. W. 1993. Yield prediction for mechanically site-prepared

- slash pine plantations in the southeastern coastal plain. *Southern Journal of Applied Forestry*, 17(4), 163-173.
- Pienaar, L.V., Shiver, B.D., Rheney, J.W. 1996. Yield prediction for mechanically site prepared slash pine plantations in the southeastern coastal plain. *PMRC Technical Report 1996-3*. 57 p
- Porté, A., Bosc, A., Champion, I., & Loustau, D. 2000. Estimating the foliage area of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown. *Annals of Forest Science*, 57(1), 73-86.
- Radtke, P. J., & Burkhart, H. E. 1999. Basal area growth and crown closure in a loblolly pine spacing trial. *Forest science*, 45(1), 35-44.
- Raison, R. J., Myers, B. J., & Benson, M. L. 1992. Dynamics of *Pinus radiata* foliage in relation to water and nitrogen stress: I. Needle production and properties. *Forest Ecology and Management*, 52(1-4), 139-158.
- Rizzo, L.T., Marinho, M.A. 1986. *Caracterização do meio físico e classificação da capacidade de uso dos solos da Fazenda Ibiti, Município de Itararé, São Paulo*. Relatório Técnico, Rizzo Projetos Agropecuários S/C LTDA.
- Sampson, D. A., Waring, R. H., Maier, C. A., Gough, C. M., Ducey, M. J., & Johnsen, K. H. 2006. Fertilization effects on forest carbon storage and exchange, and net primary production: A new hybrid process model for stand management. *Forest Ecology and Management*, 221(1-3), 91-109.
- Sands, P. J. 2004. Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. *CRC Sustainable Production Forestry, Hobart*, 34.
- Sands, P. J. 2010. 3PG PJS user manual. *Technical Report 16*, 1-27.
- Sands, P. J., & Landsberg, J. J. 2002. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*, 163(1-3), 273-292.
- Sanquetta, C. R., Brena, D. A., Angelo, H., & Mendes, J. B. (1996). Matriz de transição para simulação da dinâmica de florestas naturais sob diferentes intensidades de corte. *Ciência Florestal*, 6, 65-78.
- Scolforo, J. R. S., & do Amaral Machado, S. 1988. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus elliotti* nos estados do Paraná e Santa Catarina. *Floresta*, 18(1/2).
- Shimizu, J. Y. 2008. *Pinus na silvicultura brasileira* (pp. 49-73). Colombo: Embrapa Florestas.
- Shimoyama, V. D. S., & Barrichello, L. E. G. 1989. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. *Série técnica IPEF*, 6(20), 1-22.
- Silva, G. C. C. 2021. Uso de redes neurais artificiais na predição de parâmetros e calibração do modelo 3-PG. Tese Doutorado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa.
- Sithole, Z. 2011. *Parameterisation of the 3-PG process-based model in predicting the growth and water use of Pinus elliottii in South Africa* (Doctoral dissertation).
- Stackhouse, Jr. P. POWER Data Methodology. NASA POWER, 2020. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

- Stape, J. L., Ryan, M. G., & Binkley, D. 2004. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* × *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 219-234.
- Stenberg, P., Kuuluvainen, T., Kellomäki, S., Grace, J. C., Jokela, E. J., & Gholz, H. L. 1994. Crown structure, light interception and productivity of pine trees and stands. *Ecological Bulletins*, 20-34.
- Teskey, R. O., Gholz, H. L., & Cropper Jr, W. P. 1994. Influence of climate and fertilization on net photosynthesis of mature slash pine. *Tree Physiology*, 14(11), 1215-1227.
- Tomé, M., Amaral, A., Salas-Gonzalez, R., Páscoa, F., Tomé, J., & Soares, P. 2005. Aplicação do modelo de crescimento florestal 3PG a povoamentos de Eucalipto na Região centro de Portugal.
- Vanclay, J. K. *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. Cab International, 1994.
- Walter, H., & Lieth, H. 1967. Klimadiagram-Weltatlas (translated: Climate Diagrams-World Atlas): Jena, Germany, VEB Gustav Fischer Verlag. [See “climate diagrams,” accessed September 2, 2005, at <http://www.zoolex.org/walter.html>].
- Waring, R. H., Landsberg, J. J., & Williams, M. 1998. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production?. *Tree physiology*, 18(2), 129-134.
- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw Jr, J. A., & Vanclay, J. K. 2011. *Forest growth and yield modeling*. John Wiley & Sons.
- Whitehead, D., Hall, G. M., Walcroft, A. S., Brown, K. J., Landsberg, J. J., Tissue, D. T., ... & Norton, D. A. 2002. Analysis of the growth of rimu (*Dacrydium cupressinum*) in South Westland, New Zealand, using process-based simulation models. *International journal of biometeorology*, 46, 66-75.
- Xenakis, G., Ray, D., & Mencuccini, M. 2008. Sensitivity and uncertainty analysis from a coupled 3-PG and soil organic matter decomposition model. *ecological modelling*, 219(1-2), 1-16.
- Yin, R., Pienaar, L. V., & Aronow, M. E. 1998. The productivity and profitability of fiber farming. *Journal of Forestry*, 96(11), 13-18.
- Zeigler, B. P., Praehofer, H., & Kim, T. G. 2000. *Theory of modeling and simulation*. Academic press.
- Ziller, S. R. Instituto Hórus de Desenvolvimento e Conservação Ambiental (Florianópolis-SC). Disponível em: <<http://www.institutohorus.org.br>>. Acesso em: 19 setembro. 2023.

APÊNDICE A - Interface de configuração da plataforma SisPinus para estimativas dendrométricas.

SisPinus - Nova Simulação

Arquivo Gráfico Manual Análise econômica Outros

Entrada de Dados

Pinus elliottii

Descrição: Talhão329

Índice de Sítio (m): 21,7 (Verif. Manual)

Inventário: Número de árvores plantadas: 1666
 Percentual de sobrevivência inicial (1 ano): 95%

Listagens: Gerar resultados para as idades de 1 a 20, de 1 em 1 ano(s)

Desbastes: aos 14, 8 anos

Equações:

Sítio: Embrapa

Volume: Embrapa

Sortimento: Embrapa

Verificar

Calcular

Resultado

SisPinus - Nova Simulação

Arquivo Gráfico Manual Análise econômica Outros

Entrada de Dados

Inventário

Número de árvores plantadas por hectare

Densidade (árvores por hectare): 1666

Percentagem inicial de sobrevivência: 95

Número de árvores por hectare em determinada idade

Densidade (árvores por hectare):

Idade com condições conhecidas:

Número de árvores por hectare e área basal ou diâmetro quadrático médio

Densidade (árvores por hectare):

Idade com condições conhecidas:

Área basal:

Diâmetro médio:

Nível de homogeneidade do plantio (1 a 10): 5

Homogeneidade baixa = 1 a 4

Homogeneidade média = 5 a 8

Homogeneidade alta = 9 e 10

Resultado

SisPinus - Nova Simulação

Arquivo Gráfico Manual Análise econômica Outros

Entrada de Dados

Itens

- Simulação
 - Inventário
 - Opções de Listagens
 - Desbastes
 - Idade 8
 - Idade 14
 - Equações
 - Sítio
 - Volume
 - Sortimento
 - Diâmetro de toras e sortimento
 - Catálogos com outras opções
 - Produtos
 - Fórmulas

Novo

Abriu

Salvar

Salvar Como

Imprimir

Ocultar Itens

Embrapa

Opções de Listagem

Por intervalo de idades

Idade inicial:

Idade final:

Intervalo:

Por lista de idades

Idades:

Intervalo de Classes de Diâmetro para a Produção:

Resultado

SisPinus - Nova Simulação

Arquivo Gráfico Manual Análise econômica Outros

Entrada de Dados

Itens

- Simulação
 - Inventário
 - Opções de Listagens
 - Desbastes
 - Idade 8
 - Idade 14
 - Equações
 - Sítio
 - Volume
 - Sortimento
 - Diâmetro de toras e sortimento
 - Catálogos com outras opções
 - Produtos
 - Fórmulas

Novo

Abriu

Salvar

Salvar Como

Imprimir

Ocultar Itens

Embrapa

Desbastes

◀ ▶ + - ↻

Idade	Tipo	Árv. remanescentes	Área basal reman.	Linha desba
▶ 14	Sistemático	600	0,0	
8	Seletivo	1000	0,0	

Resultado

SisPinus - Nova Simulação

Arquivo Gráfico Manual Análise econômica Outros

Entrada de Dados

Resultado

SisPinus

TABELA DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO (Pinus elliottii)

Descrição: Talhão329
Índice de Sítio: 21,7
Densidade (árvores por hectare): 1666
Porcentagem de sobrevivência (1º ano): 95 %

Idade	Alt. Dominante	Árvores/Ha	Diâmetro Médio	Alt. Média	Área Basal	Volume Total	I.M.A.	tCO2
1	0,0	1583	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,4	1583	0,9	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0
3	3,7	1583	4,0	3,3	1,9	2,6	0,9	1,7
4	6,1	1583	7,7	5,6	7,3	16,6	4,2	10,9
5	8,5	1583	10,9	7,9	14,9	46,7	9,3	30,8
6	10,6	1582	13,6	9,9	22,8	90,0	15,0	59,3
7	12,5	1581	15,6	11,6	30,3	141,4	20,2	93,1
8	14,2	1578	17,3	13,2	37,1	196,7	24,6	129,6

O povoamento foi desbastado pela remoção de 578 árvores.

Idade	Alt. Dominante	Árvores/Ha	Diâmetro Médio	Alt. Média	Área Basal	Volume Total	I.M.A.	tCO2
9	16,0	999	20,0	14,9	31,2	186,2	26,7	122,7
10	17,3	997	21,3	16,1	35,5	228,7	28,3	150,7
11	18,6	993	22,4	17,3	39,2	270,5	29,5	178,2
12	19,7	989	23,4	18,3	42,5	311,0	30,4	204,9
13	20,8	984	24,3	19,2	45,4	349,6	31,1	230,3
14	21,7	977	25,0	20,1	48,0	386,1	31,5	254,4

Embrapa

SisPinus - Nova Simulação

Arquivo Gráfico Manual Análise econômica Outros

Entrada de Dados

Resultado

O povoamento foi desbastado pela remoção de 377 árvores.

Idade	Alt. Dominante	Árvores/Ha	Diâmetro Médio	Alt. Média	Área Basal	Volume Total	I.M.A.	tCO2
15	22,4	599	26,0	20,9	31,7	265,5	31,3	174,9
16	23,2	598	26,8	21,7	33,6	290,9	30,9	191,6
17	24,0	596	27,5	22,3	35,3	315,3	30,5	207,7
18	24,7	594	28,1	23,0	36,8	338,5	30,1	223,0
19	25,4	592	28,7	23,6	38,2	360,7	29,7	237,7
20	26,0	590	29,2	24,2	39,5	381,9	29,3	251,6

Equação de Sítio: Embrapa
Equação de Volume: Embrapa
Equação de sortimento: Embrapa
tCO2 do Volume = (Volume)x(Dens. Básica: 0,36)x(C: 0,50)x(CO2: 3,66)

DESBASTES

Idade	Volume Removido	tCO2	Volume Remanescente
8	54,3	35,8	142,4
14	149,0	98,2	237,1

SORTIMENTO PARA ÁRVORES REMOVIDAS NO DESBASTE (8 ANOS)

Classes DAP	Árv/ha	Altura Média	Volume Total	Serraria I	Serraria II	Celulose	Energia
10,0-12,0	11	12,0	0,5	0,0	0,0	0,4	0,1
12,0-14,0	87	12,4	6,0	0,0	0,0	5,4	0,6
14,0-16,0	313	12,8	28,5	0,0	0,0	27,0	1,5
16,0-18,0	136	12,0	15,1	0,0	0,0	14,5	0,5

Embrapa

APÊNDICE B - Dados climáticos da área de estudo situada no Município de Itararé utilizada para calibração e validação do modelo ecofisiológico 3-PG.

Ano	Mês -	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Precipitação corrente (mm/mês)	Radiação Solar (MJ/m ² /dia)	Dias Chuva (dias/mês)	Dias Geada (dias/mês)
2000	Jan	27,73	17,41	213,9	21,20	31	0
	Fev	25,91	17,55	247,7	19,08	29	0
	Marc	25,08	16,39	118,9	17,57	31	0
	Abril	26,05	14,04	7,6	17,46	16	0
	Mai	22,73	11,11	19,6	13,70	27	3
	Jun	22,24	11,46	107,7	11,49	24	2
	Jul	18,86	6,38	53,0	12,91	20	12
	Ago	21,30	9,54	125,4	13,31	27	4
	Set	21,57	12,11	176,7	13,64	30	0
	Out	26,08	15,43	148,2	21,04	30	0
	Nov	25,88	15,41	170,6	20,85	30	0
	Dez	26,42	16,57	186,5	22,57	28	0
2001	Jan	26,76	18,22	165,0	21,67	30	0
	Fev	25,73	18,71	235,9	18,42	28	0
	Marc	25,84	18,29	150,5	18,97	31	0
	Abril	25,26	16,49	68,4	16,28	29	0
	Mai	19,44	11,29	170,7	11,86	28	1
	Jun	18,98	10,29	114,7	10,86	26	5
	Jul	19,59	9,86	117,3	12,49	25	3
	Ago	21,64	11,88	60,8	15,10	19	0
	Set	22,26	12,64	130,2	15,47	28	2
	Out	23,69	13,38	162,7	21,21	24	0
	Nov	25,99	15,97	114,6	19,23	28	0
	Dez	25,36	16,13	174,1	21,18	31	0
2002	Jan	26,44	17,83	236,2	19,75	31	0
	Fev	25,46	16,62	147,5	20,16	27	0
	Marc	27,78	18,29	116,3	20,10	29	0
	Abril	26,83	16,84	64,0	16,71	26	0
	Mai	22,41	13,84	140,7	11,90	26	0
	Jun	22,61	11,55	16,3	12,16	20	0
	Jul	20,55	9,97	68,6	11,67	22	0
	Ago	24,11	12,43	76,4	14,80	25	0
	Set	23,24	10,98	133,7	17,40	26	3
	Out	29,06	16,35	115,1	17,39	29	0
	Nov	26,57	16,14	178,1	19,28	30	0
	Dez	27,64	17,58	163,9	20,73	31	0
2003	Jan	26,94	18,21	258,3	16,95	31	0
	Fev	27,25	18,94	126,5	21,02	27	0
	Marc	25,59	17,27	133,5	18,51	28	0
	Abril	24,36	14,65	128,6	16,28	23	0
	Mai	21,29	10,75	36,8	14,42	19	2
	Jun	22,35	11,89	43,6	12,24	22	0
	Jul	20,66	10,64	113,0	11,75	25	1
	Ago	21,27	8,70	26,4	15,63	23	4
	Set	24,08	11,34	93,2	16,89	27	1
	Out	25,92	13,82	93,2	18,83	26	0
	Nov	26,86	14,79	125,5	20,18	28	0
	Dez	26,77	16,90	188,0	19,30	31	0

2004	Jan	26,55	16,66	229,2	19,23	31	0
	Fev	25,58	16,42	129,7	20,83	29	0
	Marc	25,56	15,72	124,7	18,67	28	0
	Abril	24,99	16,14	83,9	13,53	29	0
	Mai	19,25	11,18	197,2	10,27	29	0
	Jun	19,00	9,75	62,5	10,90	23	2
	Jul	18,40	10,38	107,5	10,99	29	1
	Ago	21,67	10,34	7,5	16,87	13	3
	Set	27,00	14,08	30,4	16,83	21	0
	Out	24,21	13,26	166,2	17,34	28	0
	Nov	25,47	15,03	141,3	19,51	30	0
	Dez	26,29	15,90	139,6	20,47	31	0
2005	Jan	26,24	17,67	212,9	16,60	29	0
	Fev	28,41	16,89	34,1	21,70	27	0
	Marc	29,32	17,33	43,3	18,83	30	0
	Abril	27,42	16,76	63,0	15,13	28	0
	Mai	24,77	13,29	121,1	13,29	23	0
	Jun	22,47	12,43	49,6	11,14	22	0
	Jul	20,40	9,97	56,8	12,70	22	3
	Ago	24,48	11,05	93,1	15,71	15	0
	Set	20,91	11,36	202,3	12,09	30	1
	Out	24,18	15,42	211,5	13,84	31	0
	Nov	24,33	14,28	88,5	21,18	26	0
	Dez	26,23	15,33	103,1	21,29	29	0
2006	Jan	28,16	18,22	208,5	22,04	27	0
	Fev	26,57	17,79	136,9	19,40	26	0
	Marc	27,44	18,13	103,5	17,89	31	0
	Abril	25,18	13,96	31,4	16,44	21	0
	Mai	22,20	10,25	8,3	14,16	22	0
	Jun	22,41	11,18	34,0	11,87	21	0
	Jul	24,02	10,95	33,3	13,75	18	0
	Ago	24,88	11,02	37,3	15,41	16	2
	Set	22,78	10,96	155,1	15,86	25	3
	Out	26,15	14,44	106,0	17,70	29	0
	Nov	27,36	15,56	98,6	19,33	29	0
	Dez	27,95	17,88	100,7	19,75	31	0
2007	Jan	26,89	18,35	255,5	18,23	31	0
	Fev	26,24	17,87	204,0	20,26	26	0
	Marc	27,07	17,61	101,2	20,49	30	0
	Abril	25,60	16,39	99,0	15,06	30	0
	Mai	20,51	11,07	119,9	12,70	29	3
	Jun	21,59	10,22	48,0	13,41	30	3
	Jul	18,75	8,12	218,5	12,03	30	7
	Ago	21,59	10,91	30,4	14,75	19	0
	Set	25,71	13,62	42,1	17,47	20	0
	Out	27,45	15,26	83,9	17,98	26	0
	Nov	25,90	15,13	159,9	20,50	25	0
	Dez	26,51	16,59	229,3	21,81	30	0
2008	Jan	25,25	17,09	193,0	17,14	31	0
	Fev	26,96	17,55	90,5	18,95	29	0
	Marc	26,68	16,70	96,9	18,17	25	0
	Abril	24,61	14,73	131,4	13,61	27	0
	Mai	21,21	11,24	67,8	12,67	24	0
	Jun	19,69	9,91	73,5	10,66	26	2

	Jul	22,29	10,31	41,2	14,18	14	0
	Ago	21,99	11,74	155,5	13,10	26	0
	Set	22,45	10,85	78,5	17,15	26	0
	Out	24,60	14,78	146,6	15,36	30	0
	Nov	25,29	14,98	104,3	19,68	30	0
	Dez	28,42	15,32	88,6	23,79	28	0
2009	Jan	25,87	16,97	256,6	18,19	30	0
	Fev	26,36	18,05	149,0	18,10	28	0
	Marc	27,72	17,74	60,2	19,51	28	0
	Abril	26,49	15,06	36,1	16,81	26	0
	Mai	23,28	12,81	85,4	12,02	23	0
	Jun	19,46	8,66	79,8	11,41	22	4
	Jul	18,47	10,99	339,9	8,69	29	0
	Ago	20,81	11,13	69,6	14,23	25	0
	Set	22,55	14,07	266,7	12,44	28	0
	Out	23,39	13,73	182,3	16,87	30	0
	Nov	26,40	18,13	225,4	19,95	28	0
	Dez	25,48	17,64	193,0	19,19	28	0
2010	Jan	25,20	18,81	322,6	16,64	31	0
	Fev	26,05	18,82	128,4	19,44	28	0
	Marc	24,90	17,45	217,1	17,09	31	0
	Abril	22,19	14,60	154,6	14,27	26	0
	Mai	19,80	11,82	90,9	11,92	28	0
	Jun	18,70	10,35	75,3	11,97	16	1
	Jul	19,66	11,33	87,1	11,93	19	0
	Ago	19,38	9,22	36,2	15,16	17	3
	Set	22,29	12,33	63,2	14,77	21	0
	Out	22,45	12,64	181,8	17,49	25	0
	Nov	24,22	14,20	107,7	22,06	24	0
	Dez	24,98	16,62	243,8	18,89	31	0
2011	Jan	26,28	18,87	235,1	19,81	31	0
	Fev	25,58	18,58	196,2	18,49	28	0
	Marc	24,03	16,49	105,6	13,94	30	0
	Abril	23,21	15,40	100,8	14,32	27	0
	Mai	20,11	11,67	16,0	13,44	22	0
	Jun	18,47	8,53	108,3	11,89	27	4
	Jul	19,85	10,40	135,2	10,83	25	2
	Ago	20,25	10,64	140,2	13,17	25	3
	Set	22,31	11,07	19,7	17,21	26	0
	Out	24,11	14,23	191,9	17,82	28	0
	Nov	24,33	13,48	86,2	21,73	23	0
	Dez	26,84	15,47	107,4	21,77	28	0
2012	Jan	26,03	16,61	166,8	20,35	30	0
	Fev	28,02	18,36	155,9	20,92	25	0
	Marc	27,91	16,16	73,2	20,75	18	0
	Abril	24,91	15,51	112,5	14,97	26	0
	Mai	21,88	12,92	46,5	12,10	31	1
	Jun	19,28	11,36	183,3	8,46	29	0
	Jul	19,13	9,84	67,0	11,17	21	4
	Ago	23,27	11,94	9,0	16,99	13	0
	Set	26,28	12,76	63,6	18,03	20	1
	Out	28,19	15,18	106,2	18,27	26	0
	Nov	27,29	15,18	78,5	20,40	30	0
	Dez	29,82	19,21	196,0	20,03	31	0

2013	Jan	26,59	16,56	103,4	19,10	30	0
	Fev	26,00	17,69	220,6	17,43	28	0
	Marc	24,72	16,61	114,0	14,84	28	0
	Abril	23,53	13,98	100,4	16,51	26	0
	Mai	22,11	12,17	81,3	11,79	28	1
	Jun	19,90	11,86	263,6	8,79	28	0
	Jul	18,66	9,38	98,8	11,93	30	3
	Ago	20,13	9,67	22,1	15,38	28	3
	Set	22,49	11,69	124,0	15,48	26	1
	Out	23,22	13,32	117,7	19,22	26	0
	Nov	25,63	14,98	102,4	18,62	27	0
	Dez	28,65	17,32	69,5	21,97	29	0
2014	Jan	28,47	18,49	135,4	22,52	31	0
	Fev	30,08	18,55	113,2	20,64	25	0
	Marc	26,77	17,47	115,1	16,30	31	0
	Abril	25,15	15,96	73,1	13,34	28	0
	Mai	22,50	12,66	100,9	11,50	25	0
	Jun	19,96	11,53	164,5	10,39	27	1
	Jul	19,42	10,06	51,5	11,69	21	3
	Ago	22,85	10,28	43,2	15,53	15	1
	Set	24,94	13,32	153,1	15,69	25	0
	Out	27,80	14,68	27,5	20,92	23	0
	Nov	26,68	15,76	131,1	19,30	25	0
	Dez	27,15	17,42	183,8	19,48	31	0
2015	Jan	28,64	19,08	112,0	21,74	31	0
	Fev	26,04	17,98	255,1	18,62	28	0
	Marc	24,55	17,16	197,9	16,30	30	0
	Abril	23,64	15,07	68,5	15,60	25	0
	Mai	20,93	13,07	89,3	11,35	26	0
	Jun	20,34	10,81	32,6	11,00	22	1
	Jul	19,83	11,89	118,8	10,05	26	0
	Ago	23,58	12,22	34,7	16,50	17	0
	Set	25,12	14,29	155,3	16,28	23	0
	Out	25,77	15,59	178,8	15,63	30	0
	Nov	25,38	16,67	202,8	14,30	30	0
	Dez	25,94	18,48	241,6	16,62	31	0
2016	Jan	25,71	17,76	195,4	20,00	27	0
	Fev	25,71	19,29	249,7	17,73	29	0
	Marc	25,02	16,97	130,5	17,57	28	0
	Abril	25,24	16,67	61,0	17,54	19	0
	Mai	20,08	12,13	136,0	9,99	30	1
	Jun	17,57	8,28	97,9	10,75	24	6
	Jul	19,96	9,51	60,2	12,81	20	2
	Ago	20,90	10,48	141,6	14,22	27	1
	Set	22,26	11,00	39,6	18,67	21	1
	Out	24,03	14,01	120,5	17,40	29	0
	Nov	25,85	14,88	98,1	19,65	26	0
	Dez	26,84	16,97	144,8	19,16	31	0
2017	Jan	26,27	18,65	275,2	18,96	31	0
	Fev	27,59	18,83	96,3	21,54	28	0
	Marc	25,36	17,55	136,3	16,58	31	0
	Abril	23,07	14,56	121,2	13,92	30	0
	Mai	21,87	13,83	156,4	11,00	31	0
	Jun	19,75	10,82	165,0	11,04	29	2

	Jul	19,22	9,93	3,4	13,52	22	2
	Ago	20,86	11,20	87,5	13,78	27	0
	Set	26,84	13,72	31,6	19,65	18	0
	Out	25,43	14,71	219,4	16,29	30	0
	Nov	24,82	14,50	144,5	20,33	25	0
	Dez	27,16	17,29	232,6	17,85	31	0
2018	Jan	25,17	17,79	229,7	17,77	31	0
	Fev	24,79	16,48	138,0	19,26	28	0
	Marc	25,94	18,37	235,8	16,39	31	0
	Abril	24,04	15,65	21,9	17,78	25	0
	Mai	22,23	12,84	36,8	14,25	24	1
	Jun	20,21	11,57	57,7	9,42	26	0
	Jul	22,97	11,29	17,4	13,53	19	0
	Ago	21,31	10,08	67,4	14,28	27	2
	Set	25,45	13,33	63,5	16,10	26	0
	Out	24,30	14,72	216,9	14,93	29	0
	Nov	26,74	15,59	84,1	18,29	29	0
	Dez	29,34	17,55	119,2	23,83	28	0
2019	Jan	29,28	19,55	168,7	22,11	30	0
	Fev	27,57	17,93	183,4	17,99	28	0
	Marc	25,97	17,64	129,7	17,50	30	0
	Abril	26,07	16,28	101,3	14,54	30	0
	Mai	23,57	14,89	159,5	11,01	30	0
	Jun	21,40	12,19	67,4	12,50	16	0
	Jul	20,28	9,74	41,1	13,54	21	4
	Ago	22,60	10,61	30,3	15,17	28	0
	Set	25,27	13,27	90,5	15,05	26	0
	Out	30,00	15,62	44,7	20,69	28	0
	Nov	27,05	15,62	207,3	20,22	28	0
	Dez	28,13	16,71	99,7	19,94	27	0
2020	Jan	29,11	17,85	123,2	19,08	30	0
	Fev	27,96	17,37	126,6	17,55	29	0
	Marc	28,47	16,34	56,4	21,15	30	0
	Abril	26,88	13,60	29,4	18,69	28	0
	Mai	23,84	10,47	37,9	14,55	26	0
	Jun	22,00	12,09	163,5	10,25	29	0
	Jul	22,05	10,24	31,9	13,33	29	1
	Ago	22,24	11,17	141,2	14,71	31	2
	Set	28,03	14,60	14,7	17,94	26	0
	Out	28,44	14,98	90,2	18,86	30	0
	Nov	28,01	14,76	80,8	22,61	28	0
	Dez	29,48	17,64	105,9	19,40	31	0
2021	Jan	28,14	18,39	143,6	16,83	31	0
	Fev	29,39	17,51	81,5	22,03	26	0
	Marc	28,14	18,05	121,1	17,47	31	0
	Abril	25,83	14,61	20,9	16,76	28	0
	Mai	23,35	11,72	63,5	12,99	28	0
	Jun	21,00	10,71	61,4	11,15	30	2
	Jul	20,21	7,49	35,3	14,40	29	8
	Ago	23,44	11,63	29,2	14,43	25	0
	Set	28,30	13,78	50,8	16,64	25	0
	Out	23,92	13,70	224,3	13,85	31	0
	Nov	27,93	15,14	72,4	22,50	29	0
	Dez	28,95	15,93	92,9	23,24	31	0

2022	Jan	28,63	17,99	172,4	19,96	31	0
	Fev	29,64	17,92	64,4	23,41	28	0
	Marc	27,87	18,14	134,5	16,53	31	0
	Abril	26,15	14,92	56,5	15,24	30	0
	Mai	22,23	10,87	74,1	13,31	29	4
	Jun	19,82	10,49	103,1	11,04	29	2
	Jul	23,26	11,55	16,8	13,58	28	1
	Ago	20,94	10,51	102,8	13,22	25	2
	Set	20,67	11,00	173,9	12,23	29	0
	Out	24,34	14,18	175,2	16,54	31	0
	Nov	23,44	12,98	113,5	21,98	29	0
	Dez	26,33	16,84	133,0	19,52	31	0

Fonte: Plataforma Power Data Access Viewer da NASA (2022).

APÊNDICE C - Ilustração das variáveis de inicialização que é necessário fornecer ao modelo 3-PG.

<p>Title : T201A Site : Talhão 201-A Interm Species : P. elliottii Climate data : ClimateData Met station : Brasil Sul Eli Run type : SingleSite</p>																																																																							
<p>Site factor data</p> <p>Latitude = -24,27 Fertility rating = 0,7 Soil class = sl Maximum ASW = 240 Minimum ASW = 0 Atmospheric CO₂ = 350</p> <p>Stand initialization data</p> <p>Date planted = 2003/10 Initial gear = 2005 Initial month = October End age = 18,8 Initial WF = 0,00 Initial VR = 0,00 Initial VS = 0,01 Initial stocking = 1583 Initial ASW = 240</p>			<p>Optional parameter block</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parameters</th> <th>Fontes</th> <th>L&W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>pFS2 = 0,67</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>pFS20 = 0,29</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>aS = 0,014</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>nS = 2,992</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>pRw = 0,4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>pRn = 0,144</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>gammaFw = 0,025</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>gammaF0 = 0,001</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>tgammaF = 24</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>gammaR = 0,018</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Tmin = 5</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Topt = 25</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Tmax = 40</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>kF = 1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>SWconst = 0,7</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>SWpower = 9</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>fAlpha700 = 1,4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>fCg700 = 0,7</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>m0 = 0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>fN0 = 0,3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>fNn = 1</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Parameters	Fontes	L&W	pFS2 = 0,67			pFS20 = 0,29			aS = 0,014			nS = 2,992			pRw = 0,4			pRn = 0,144			gammaFw = 0,025			gammaF0 = 0,001			tgammaF = 24			gammaR = 0,018			Tmin = 5			Topt = 25			Tmax = 40			kF = 1			SWconst = 0,7			SWpower = 9			fAlpha700 = 1,4			fCg700 = 0,7			m0 = 0			fN0 = 0,3			fNn = 1		
Parameters	Fontes	L&W																																																																					
pFS2 = 0,67																																																																							
pFS20 = 0,29																																																																							
aS = 0,014																																																																							
nS = 2,992																																																																							
pRw = 0,4																																																																							
pRn = 0,144																																																																							
gammaFw = 0,025																																																																							
gammaF0 = 0,001																																																																							
tgammaF = 24																																																																							
gammaR = 0,018																																																																							
Tmin = 5																																																																							
Topt = 25																																																																							
Tmax = 40																																																																							
kF = 1																																																																							
SWconst = 0,7																																																																							
SWpower = 9																																																																							
fAlpha700 = 1,4																																																																							
fCg700 = 0,7																																																																							
m0 = 0																																																																							
fN0 = 0,3																																																																							
fNn = 1																																																																							

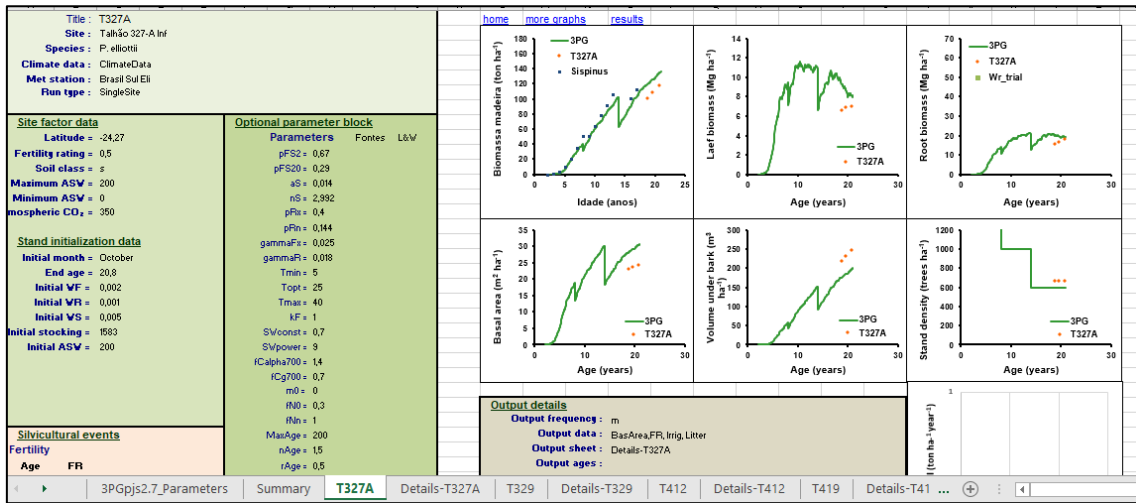
<u>Silvicultural events</u>				
Fertility				
Age	FR			
2005	0,7			
Thinning				
Age	Stocking	F	R	S
8	1000	0,75	0,75	0,75
14	600	0,75	0,75	0,75
Irrigation				
Age	MI/ha/yr			

MaxAge = 200
nAge = 1,5
rAge = 0,5
gammaNx = 0
gammaN0 = 0
tgammaN = 0
ngammaN = 1
wSx1000 = 220
thinPower = 1,53
mF = 0
mR = 0,2
mS = 0,4
SLA0 = 5
SLA1 = 3,43
tSLA = 7,79

APÊNDICE D - Demonstração da aplicabilidade do evento de desbastes para aplicação no modelo.

<u>Silvicultural events</u>				
Fertility				
Age	FR			
2001	0,5			
Thinning				
Age	Stocking	F	R	S
8	1000	0,75	0,75	0,75
14	600	1	1	1
Irrigation				
Age	MI/ha/yr			

APÊNDICE E - Representação da interface do multisite utilizado para calibração e validação da espécie de *Pinus elliottii* no modelo 3-PG.



		Loss functions																																
		0.0032 0.0853 0.0327 0.0243 0.0408 0.0538																																
		Observed					Simulated by 3PG					Residuals					Simulated by Stepinus																	
t	N	Wf	Wt	Wt_trial	V	G	N	Wf	Wt	Vwg	V	G	N	Wf	Wt	Vwg	V	G	Litter	t	N	Wf	Wt	Wt_trial	Vwg	V	G							
2	1583	0.0015	0.0009		0.0048	0	0	1583	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.04		2	1583	0.0005	0.0009		0.0048	0	0						
3	1583	0.0067	0.0753		0.4302	0.8	0.8	1583	0.0347	0.0570		3.410	5.9	3.6							3	1583	0.0067	0.0753		0.4302	0.8	0.8						
4	1583	0.0347	0.0570		3.410	5.9	3.6	1583	0.0347	0.0570		3.410	5.9	3.6							4	1583	0.0347	0.0570		3.410	5.9	3.6						
5	1583	1.0114	1.7232		10.0241	16.3	8	1583	3.2832	3.4895		20.6829	37.7	13							5	1583	1.0114	1.7232		10.0241	16.3	8						
6	1583	3.2832	3.4895		20.6829	37.7	13	1583	4.3496	5.8166		34.9994	62.2	18.2							6	1583	3.2832	3.4895		20.6829	37.7	13						
7	1583	6.4399	6.4071		51.2472	88.9	23.1	1583	6.4399	6.4071		51.2472	88.9	23.1							7	1583	6.4399	6.4071		51.2472	88.9	23.1						
8	1000	5.9306	8.1832		50.2727	85.7	19.5	1000	7.076	10.3031		63.7452	107.6	22.7							8	1000	5.9306	8.1832		50.2727	85.7	19.5						
9	1000	8.1056	12.5368		77.9916	129.7	25.6	1000	8.1056	12.5368		77.9916	129.7	25.6							9	1000	8.1056	12.5368		77.9916	129.7	25.6						
10	1000	9.0269	14.6538		91.6075	151.9	28.3	1000	9.0269	14.6538		91.6075	151.9	28.3							10	1000	9.0269	14.6538		91.6075	151.9	28.3						
11	399	9.0704	16.3067		101.0794	162.5	24.7	399	9.0704	16.3067		101.0794	162.5	24.7							11	399	9.0704	16.3067		101.0794	162.5	24.7						
12	600	8.3038	15.3260		112.0687	178.2	28.2	600	8.3038	15.3260		112.0687	178.2	28.2							12	600	8.3038	15.3260		112.0687	178.2	28.2						
13	600	8.8683	17.6084					600	8.8683	17.6084											13	600	8.8683	17.6084										
14	600	8.8683	17.6084					600	8.8683	17.6084											14	600	8.8683	17.6084										
15	600	8.8683	17.6084					600	8.8683	17.6084											15	600	8.8683	17.6084										
16	600	8.8683	17.6084					600	8.8683	17.6084											16	600	8.8683	17.6084										
17	600	8.8683	17.6084					600	8.8683	17.6084											17	600	8.8683	17.6084										
18.8	664	6.5938	15.7088		101.2365	218.3	23	600	9.29	20.06		119.41	175.70	28.13	64.00	-2.70	-4.35	-18.11	42.60	-5.13														
19.6	664	6.8629	16.8289		108.7062	232.2	23.8	600	8.68	19.66		125.55	184.47	29.09	64.00	-1.82	-2.83	-16.84	47.73	-5.29														
20.8	664	6.9842	18.2032		118.0380	247.3	24.4	600	8.13	19.33		134.33	196.82	30.43	64.00	-1.15	-1.13	-16.29	50.38	-6.03														
									Wf-Vwg	Wt																								
									0.01	0.00																								
									0.52	0.06																								
									3.83	0.56																								
									11.84	1.72																								
									23.97	3.49																								
									39.95	5.82																								
									57.74	8.41																								
									96.20	8.18																								