

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**Monique Pimentel Lagemann**

**EFEITO DA UNIFORMIDADE DE PLANTIO E FERTILIZAÇÃO NA  
PRODUTIVIDADE DE UM CLONE DE *Pinus taeda* L.**

Santa Maria, RS  
2020

**Monique Pimentel Lagemann**

**EFEITO DA UNIFORMIDADE DE PLANTIO E FERTILIZAÇÃO NA  
PRODUTIVIDADE DE UM CLONE DE *Pinus taeda* L.**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr.nat.techn. Mauro Valdir Schumacher

Santa Maria, RS  
2020

Lagemann, Monique Pimentel

Efeito da uniformidade de plantio e fertilização na produtividade de um clone de Pinus taeda L. / Monique Pimentel Lagemann.- 2020.

63 p.; 30 cm

Orientador: Mauro Valdir Schumacher

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2020

1. Balanço nutricional 2. Biomassa 3. Nutrição florestal 4. Exportação de nutrientes I. Schumacher, Mauro Valdir II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MONIQUE PIMENTEL LAGEMANN, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Monique Pimentel Lagemann

**EFEITO DA UNIFORMIDADE DE PLANTIO E FERTILIZAÇÃO NA  
PRODUTIVIDADE DE UM CLONE DE *Pinus taeda* L.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

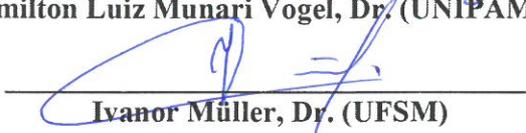
**Aprovado em 28 de fevereiro de 2020:**



\_\_\_\_\_  
**Mauro Valdir Schumacher, Dr.nat.techn. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



\_\_\_\_\_  
**Hamilton Luiz Munari Vogel, Dr. (UNIPAMPA)**



\_\_\_\_\_  
**Ivanor Müller, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2020

## DEDICATÓRIA

*Dedico:*

*Ao meu espírito*

*Aos meus pais Carmen e Erni,*

*Aos meus irmãos Venâncio e Lorenzo.*

*Aos meus avós Diva, Sérgio, Nelcinda e Vilimar.*

*A todos que adentraram de coração no meu caminho.*

*À Rainha da Floresta.*

*Ao Grande Espírito.*

## AGRADECIMENTOS

Por conseguir chegar ao final desse ciclo, com leveza, orgulho e felicidade, torna-se indispensável expressar com palavras os meus mais sinceros agradecimentos.

Primeiramente agradeço ao Grande Espírito, pela oportunidade da vida e com ela do aprendizado que existe em cada detalhe, em cada pessoa e em cada caminho.

Aos meus pais Carmen e Erni, agradeço por serem parte indissociável da minha vida, por todo amor, humildade, firmeza, alegria e empatia ensinados para mim. Agradeço por me ensinarem a ser um ser humano sincero em busca da essência verdadeira.

A minha coragem, força e sabedoria em escolher trilhar, aprender e finalizar esse processo. Agradecendo pela consciência de reconhecer todas as minhas falhas, capacidades e principalmente, o meu valor.

Aos meus irmãos Venâncio e Lorenzo pelo amor incondicional, amizade e alegria em cada reencontro. Obrigada pelos dias de gargalhadas, brincadeiras, música, poesia e por serem verdadeiros pilares que dão força a nossa família.

Aos meus familiares pela admiração, em especial aos meus avós Diva e Sérgio, pelo auxílio, apoio, respeito, por serem ouvintes atentos e professores da vida adulta.

Agradecendo assim a toda a minha ancestralidade, por todo o trabalho, provações e dificuldades que enfrentaram, reconhecendo a oportunidade do estudo e os méritos de chegar tão longe a vocês.

Aos meus amigos mais próximos nesse período marcante da minha vida: Beatriz, Phillipp e Tom. Obrigada por toda a transformação que cada um proporcionou em mim desde o dia em que me conheceu e que de forma inquestionável contribuiu pra eu me aproximar de quem eu realmente sou. Por serem a minha fortaleza, meu cais e minha ponte para o universo da cultura, da arte, da comunicação, da música e de tudo de mais incrível que existe. Obrigada por aceitarem e retribuírem meu amor.

À escola Nação Tutumbaiê por ser meu refúgio de paz, alegria, cura, crescimento, autoconhecimento e transformação. Expressando assim minha gratidão a nossa irmandade, por embelezarem a vida entregando o seu melhor e tornando vivo o sonho de um mundo verdadeiro.

Agradeço ao meu orientador Mauro V. Schumacher, pela oportunidade, pela confiança e por todo aprendizado que pude ter no Laboratório de Ecologia Florestal sob sua orientação,

expressando minha admiração pelo senhor seguir acreditando na pesquisa, se doar a esse propósito e por buscar novas parcerias, para que a ciência na área florestal possa prosseguir.

Ao CNPq pela bolsa de estudos, essencial para que todo estudante consiga desenvolver um trabalho no âmbito da pós-graduação.

Ao PPPIB/IPEF e a Klabin pelos dados para elaboração desta dissertação, pela parceria com o professor Mauro V. Schumacher e com UFSM, e por gerarem desenvolvimento social, econômico e ambiental alicerçada na pesquisa científica.

À Isabel Deliberali, coordenadora executiva do PPPIB/IPEF, por toda sua atenção, competência, auxílio, paciência e compreensão.

Ao professor Hamilton Luiz Munari Vogel por todo o auxílio durante a graduação e na pós-graduação, pela parceria, motivação e empenho. Obrigada por me ensinar sobre pesquisa e sobre o mundo acadêmico.

Ao Laboratório de Solos e Ecologia Florestal (UNIPAMPA), representados pelo professor Frederico Viera Costa Beber e técnica Rosângela Gonçalves Nunes, por me concederem a estrutura física, reorganizando seu planejamento para que eu pudesse realizar as análises químicas.

Ao Rudi Witschoreck pelo seu trabalho, persistência e por realizar cada análise com exímia qualidade. Agradeço pelo auxílio com as análises químicas e pela compreensão.

À Rosângela e ao Diego, por me receberem em sua casa e em seus corações sempre que precisei em São Gabriel, demonstro aqui minha imensa admiração pelas pessoas e profissionais que vocês são.

Aos meus amigos unipampeanos Álvaro, Gabriela e Kellyn que me receberam com muita felicidade e disposição em minhas atividades em São Gabriel. Agradecendo por poder contar com amigos verdadeiros e leais.

Agradecendo aos colegas de laboratório, pelo apoio, pelas trocas de conhecimento e por todas as experiências compartilhadas no âmbito acadêmico, compartilhando um sentimento chamado ecologia florestal.

Aos meus colegas de pós-graduação Luana, Jânio, Alisson, Claudinei, Bruna, Roberta, Camila, Tásquilla, Edberto, entre outros pela parceria e companheirismo em cada disciplina e a cada encontro nos corredores, no Ru, no ônibus e nas manifestações.

Finalizo, agradecendo a todos aqueles que cruzaram meu caminho e me permitiram conhecer um pouco da sua essência, contribuindo nas reflexões necessárias para finalizar esse ciclo acadêmico.

O saber de todo mundo  
É um saber universal  
Aqui tem muita ciência  
Que é preciso se estudar

(Irineu Raimundo Serra)

## RESUMO

### EFEITO DA UNIFORMIDADE DE PLANTIO E FERTILIZAÇÃO NA PRODUTIVIDADE DE UM CLONE DE *Pinus taeda* L.

AUTORA: Monique Pimentel Lagemann  
ORIENTADOR: Mauro Valdir Schumacher

Com o aumento crescente na demanda por matéria-prima dos plantios de *Pinus taeda*, associado à redução das suas áreas de plantio e ao cenário de baixa produtividade dos sítios, faz-se necessário a avaliação de práticas silviculturais que desenvolvam a silvicultura da espécie promovendo produtividade e sustentabilidade. O objetivo deste trabalho foi avaliar se as diferentes práticas silviculturais afetam no crescimento, produtividade e aspectos ecológicos de *P. taeda* com 12 anos. Localizado em Telêmaco Borba, o experimento bifatorial (2x2) avaliou os fatores uniformidade de plantio e fertilização (4 tratamentos) seguindo o delineamento blocos ao acaso com três repetições, totalizando 12 parcelas com 576 m<sup>2</sup> cada. Os níveis do fator uniformidade de plantio foram homogêneo (Ho), com plantio de todas as mudas clonais em fevereiro de 2007, e heterogêneo (He), com o plantio de 1/3 das mudas em três períodos distintos: 0, 150 e 300 dias após o plantio inicial. Os níveis do fator fertilização foram com (F) e sem fertilização (S), sendo a fertilização realizada no plantio e nove anos depois. De 2009 a 2019 foram realizados inventários anuais com mensuração do diâmetro à altura do peito à 1,3 m (DAP), altura total (h) das três primeiras linhas e das oito árvores dominantes de maior DAP ( $h_{dom}$ ). Aos 11 anos, 12 árvores foram selecionadas para amostragem destrutiva de biomassa aérea e metade dos indivíduos para a amostragem de raízes ( $\varnothing > 10$  mm). O procedimento da amostragem de biomassa foi realizado seguindo a sequência: cubagem rigorosa de Smalian, separação dos componentes, pesagem a campo, secagem das amostras e determinação do teor de umidade. Após moagem, os teores de N, P, K, Ca e Mg foram determinados. Com os dados de biomassa, volume e dos teores foram geradas equações para estimar essas variáveis para as árvores não amostradas. Os resultados foram submetidos à ANOVA e teste Tukey ( $p < 0,05$ ). Ao final de 12 anos, a sobrevivência no plantio He obteve maior mortalidade de indivíduos (7,11%). A maior média de DAP (20,11 cm) foi no F. A F promoveu maior crescimento em h (17,16 m) e  $h_{dom}$  (19,20 m) em relação a S. Tanto o Ho (49,97 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) quanto no F (53,77 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) proporcionaram o maior acúmulo de área basal, com início da competição por área basal aos oito anos em He e F. Os maiores volumes e IMA foram obtidos em Ho (339,30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; 28,27 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e F (371,07 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; 30,92 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), sendo o índice PV50 superior nesses tratamentos. Tanto Ho (212,31 Mg ha<sup>-1</sup>) como F (231,89 Mg ha<sup>-1</sup>) apresentaram a maior produção de biomassa, porém somente em F houve maior alocação no lenho (53,78%). Nos teores de nutrientes e coeficiente de utilização biológica (CUB) houve diferença somente no fator fertilização. Já os maiores estoques totais e exportação nutricional, independente do cenário de colheita, foram obtidos nos tratamentos Ho e F. A colheita apenas do tronco é a opção de menor impacto ambiental, enquanto a exportação tronco+copa intensifica a remoção de nutrientes no tratamento S.

**Palavras-chave:** Balanço nutricional. Biomassa. Nutrição florestal. Exportação de nutrientes.

## ABSTRACT

### EFFECT OF PLANTING UNIFORMITY AND FERTILIZATION ON THE PRODUCTIVITY OF A CLONE OF *Pinus taeda* L.

AUTHOR: Monique Pimentel Lagemann

ADVISOR: Mauro Valdir Schumacher

With the growing increase in demand for raw material from *Pinus taeda* plantations, associated with the reduction of their cultivated areas and the low productivity scenario of the sites, it is necessary to evaluate silvicultural practices that develop the forestry of the species promoting productivity and sustainability. The objective of this research is to evaluate whether the different silvicultural practices affect the growth, productivity and ecological aspects of *P. taeda* with 12 years. Located in Telêmaco Borba-PR, the bifactorial experiment (2x2) evaluated the factors planting uniformity and fertilization (4 treatments) following the randomized block design with three replications, totaling 12 plots with 576 m<sup>2</sup> each. The levels of the factor planting uniformity were homogeneous (Ho), with the planting of all clonal seedlings in February 2007, and heterogeneous (He), with the planting of 1/3 of the seedlings in three different periods: 0, 150 and 300 days after initial planting. The levels of the factor fertilization were with (F) and without fertilization (W), with fertilization being carried out at planting and nine years later. From 2009 to 2019, annual inventories were carried out, measuring the diameter at breast height at 1.3 m (DBH), total height (h) of the first three rows and of the eight dominant trees with the highest DBH (h<sub>dom</sub>). At age 11, 12 trees were selected for destructive sampling of aboveground biomass and half of the individuals for root sampling ( $\varnothing > 10$  mm). The biomass sampling procedure was carried out following the sequence: the volume calculation method Smalian, separation of the components, weighing in the field, drying of the samples and determination of the moisture content. After grinding, the levels of N, P, K, Ca and Mg were determined. With the biomass, volume and content data, equations were generated to estimate these variables for non-sampled trees. The results were submitted to ANOVA and Tukey test ( $p < 0.05$ ). At the end of 12 years, survival in the He planting obtained higher tree mortality (7.11%). The highest mean DAP (20.11 cm) was in F. The F treatment promoted greater growth in h (17.16 m) and h<sub>dom</sub> (19.20 m) in relation to W. Both Ho (49.97 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) and F (53.77 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) provided the largest accumulation of basal area, with competition for basal area starting at age eight in He and F. The highest volumes and MAI were obtained in Ho (339.30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; 28.27 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) and F (371.07 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; 30.92 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>), with the PV50 index being higher in these treatments. Both Ho (212.31 Mg ha<sup>-1</sup>) and F (231.89 Mg ha<sup>-1</sup>) had the highest biomass production, however only in F there was a greater allocation in the wood (53.78%). The nutrient concentrations and coefficient of biological use (CBU) differed only in the fertilization factor. The largest stocks of nutrients and nutritional exports were obtained in the Ho and F treatments. Harvesting only the stem is the option with the least environmental impact, while the export of stem+canopy intensifies the removal of nutrients in W.

**Keywords:** Nutritional balance. Biomass. Forest nutrition. Nutrients export.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Croqui da distribuição das unidades experimentais na área experimental em Telêmaco Borba – PR.....	23
Figura 2 – Distribuição da mudas clonais de <i>P. taeda</i> nas parcelas do nível heterogêneo do fator uniformidade de plantio, plantadas a 0, 150 e 300 dias do plantio inicial.....	24
Figura 3 – Distribuição da frequência relativa do diâmetro à altura do peito (DAP) de <i>P. taeda</i> aos 12 anos nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B).....	30
Figura 4 – Curvas de incrementos anuais em área basal por hectare (G) de <i>P. taeda</i> ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B).....	35
Figura 5 – Curvas de incrementos anuais de volume de <i>P. taeda</i> ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B).....	36
Figura 6 – Distribuição da produção de biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de <i>P. taeda</i> aos 11 anos nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B).....	41
Figura 7 – Distribuição relativa da produção de biomassa (%) de <i>P. taeda</i> aos 11 anos nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B).....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química do perfil de solo antes do plantio na área experimental, em Telêmaco Borba-PR.....	22
Tabela 2 – Sobrevivência, diâmetro à altura do peito (Dap), altura (H) e altura dominante ( $H_{dom}$ ) de <i>P. taeda</i> ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio e fertilização.....	28
Tabela 3 – Equações alométricas para estimativas de volume ( $m^3 \text{ árv}^{-1}$ ) e fator de forma artificial ( $f$ ) de <i>P. taeda</i> aos 11 anos.....	33
Tabela 4 – Área basal por hectare (G), volume com casca ( $V_{cc}$ ), incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA) de <i>P. taeda</i> ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio e fertilização.....	34
Tabela 5 – Índice de uniformidade PV50 de <i>P. taeda</i> ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio e fertilização.....	37
Tabela 6 – Equações alométricas para estimar a produção de biomassa ( $kg \text{ árv}^{-1}$ ) dos diferentes componentes de <i>P. taeda</i> aos 11 anos.....	40
Tabela 7 – Concentração de nutrientes ( $g \text{ kg}^{-1}$ ) nas amostras de biomassa nos diferentes componentes da biomassa de <i>P. taeda</i> aos 11 anos.....	45
Tabela 8 – Equações alométricas para estimar as concentrações de nutrientes ( $g \text{ kg}^{-1}$ ) dos diferentes componentes da biomassa de <i>P. taeda</i> aos 11 anos.....	47
Tabela 9 – Concentração de nutrientes nos componentes de <i>P. taeda</i> aos 11 anos, nos tratamentos heterogêneo (He), homogêneo (Ho), sem fertilização (S) e com fertilização (F).....	48
Tabela 10 – Quantidade de nutrientes ( $kg \text{ ha}^{-1}$ ) nos componentes das árvores de <i>P. taeda</i> aos 11 anos, nos tratamentos heterogêneo (He), homogêneo (Ho), sem fertilização (S) e com fertilização (B).....	50
Tabela 11 – Coeficiente de utilização biológica (CUB) de nutrientes em <i>P. taeda</i> aos 11 anos, nos tratamentos heterogêneo (He), homogêneo (Ho), sem fertilização (S) e com fertilização (F).....	53
Tabela 12 – Cenários de exportação de nutrientes ( $kg \text{ ha}^{-1}$ ) nos tratamentos heterogêneo (He), homogêneo (Ho), sem fertilização (S) e com fertilização (F).....	54

.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	13
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1	CONJUNTURA DOS PLANTIOS DO GÊNERO <i>Pinus</i> .....	15
2.2	SILVICULTURA DO <i>Pinus taeda</i> .....	16
2.2.1	<b>Uniformidade de plantio</b> .....	17
2.2.2	<b>Fertilização</b> .....	18
2.3	ASPECTOS ECOLÓGICOS EM PLANTIOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	22
3.1	ÁREA EXPERIMENTAL.....	22
3.2	DENDROMETRIA, PRODUTIVIDADE E UNIFORMIDADE.....	24
3.3	PRODUÇÃO DE BIOMASSA.....	25
3.4	ANÁLISE NUTRICIONAL.....	26
3.5	ESTIMATIVAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	27
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	28
4.1	DENDROMETRIA, PRODUTIVIDADE E UNIFORMIDADE.....	28
4.2	PRODUÇÃO DE BIOMASSA.....	39
4.3	ASPECTOS NUTRICIONAIS.....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	56
<b>6.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	57
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o último relatório, os plantios florestais no Brasil possuem uma área de 7,83 milhões de hectares, dos quais 1,57 milhões de hectares são do gênero *Pinus*, com produtividade nacional no patamar de  $30,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  no ano de 2018 (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019). No entanto, de acordo com o relatório, nos últimos seis anos houve um decréscimo de 6,64% a produtividade média ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) do *Pinus* pela redução das áreas plantadas do gênero, devido sua substituição por plantios de eucalipto.

Essa substituição ocorre devido à produtividade mais expressiva de clones de *Eucalyptus*, associada à ampla adaptação desse gênero sob as mais variadas condições edafoclimáticas e ao investimento em décadas de pesquisa no desenvolvimento de tecnologias para a espécie (COLODETTE et al., 2014). Apesar da existência dessa tendência, a substituição do gênero *Pinus* por outras espécies é limitada pela sua rusticidade, que garante seu desenvolvimento em condições edafoclimáticas desfavoráveis em comparação a outras espécies, como locais com altas cotas de altitude e alta ocorrência de geadas (GOMES et al., 2016).

Ainda assim, a silvicultura do *Pinus* se tornou um sistema socioeconômico que contribui na manutenção do desenvolvimento no Sul do Brasil, sendo a espécie utilizada nos setores madeireiro, moveleiro, de papel e celulose, de chapas reconstituídas, de produção de carvão vegetal e consumo na siderurgia (VASQUES et al., 2007). No cenário econômico, a tendência é de aumento crescente na demanda por matéria-prima produzida a partir dos cultivos de *Pinus*, aliada a valorização do preço nominal da madeira em tora (+6,7% por ano) e celulose de fibra longa (+3,1% por ano) geradas nesses cultivos (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019).

É clara a importância da espécie no âmbito nacional e internacional, porém cabe destacar as razões responsáveis por configurar esse cenário desfavorável para a produtividade da espécie. Os primeiros plantios de *Pinus* foram estabelecidos através dos incentivos fiscais na década de 70, por meio de recursos voltados à implantação dos cultivos em áreas de menor potencial produtivo (VASQUES et al., 2007), com solos com baixa disponibilidade de nutrientes. A baixa exigência nutricional do gênero favoreceu sua adaptabilidade nesses locais (SCHNEIDER, 2011), e ainda, mesmo que sob as condições restritas, os resultados produtivos do gênero foram superiores aos valores obtidos na sua região de origem

(CARDOSO et al., 2013), fatores esses que responsáveis pelo cenário de baixo investimento em pesquisas voltadas as práticas silviculturais do gênero no Brasil. Por exemplo, ao considerar não haver necessidade de fertilização, tendo em vista que mesmo em solos de baixa fertilidade as árvores apresentavam rápido crescimento sem apresentar sintomas de deficiência nas primeiras rotações (BATISTA et al., 2015), os aspectos relacionados ao manejo nutricional, exportação e reposição de nutrientes foram pouco explorados.

Assim, no contexto atual de redução produtiva do gênero (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019) aliada aos problemas relacionados à deficiência nutricional (CHAVES; CÔRREA, 2003), ressaltam a necessidade do seu desenvolvimento silvicultural. Desse modo, para definir o desempenho de uma prática silvicultural, torna-se necessária sua avaliação no crescimento, na produtividade e nos aspectos ecológicos, no que se refere à ciclagem de nutrientes (LONDERO et al., 2011).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar se as diferentes práticas silviculturais afetam no crescimento, produtividade e aspectos ecológicos de *Pinus taeda* ao longo da rotação completa de plantio.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Verificar se há interação entre fertilização e uniformidade de plantio no crescimento, produtividade e aspectos ecológicos;
- b) Avaliar se há efeito da fertilização no crescimento, produtividade e aspectos ecológicos;
- c) Avaliar se há resposta da uniformidade de plantio no crescimento, produtividade e aspectos ecológicos;

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os sistemas de cultivo do *P. taeda* no Brasil se caracterizam pela baixa utilização de insumos, o que torna a produtividade da espécie estritamente relacionada com as condições de sítio, alcançando produtividade de 25 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> nos sítios de menor produtividade, o que

requer ciclos mais longos para alcançar maior rentabilidade da produção (FLORIANO et al., 2009). Ao mesmo tempo, o aumento crescente da necessidade de produtos florestais somado ao declínio da produtividade dos povoamentos ao longo das rotações, torna necessária a avaliação de práticas silviculturais, sobretudo com o objetivo de aumentar a disponibilidade de recursos e proporcionar maior crescimento (ALBAUGH, 1998).

Existe limitação quanto a comprovação da eficiência de práticas silviculturais, principalmente a longo prazo, para *P. taeda* no Brasil. A resposta à adubação, por exemplo, apresenta resultados positivos nas idades iniciais (VOGEL et al., 2005), mas pouco se sabe sobre qual será o comportamento do crescimento mediante essa prática ao longo do tempo. Assim, configura-se um cenário de informações limitadas e respostas incertas envolvendo a adubação, o que acarreta a realização de outras práticas com menor custo, como preparo do solo, controle da formiga e controle da matocompetição (FLORIANO et al., 2009). Desse modo, o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao tema se justifica pela necessidade da avaliação dessa prática silvicultural visando à produção e o planejamento sustentável (VASQUES et al., 2007).

Estudos voltados à fertilização da espécie devem ser desenvolvidos no âmbito regional tendo em vista a não realização desta prática, a colheita exportando nutrientes e a ausência de reposição nutricional. Também é essencial a avaliação de outras práticas silviculturais a fim de subsidiar o aprimoramento da silvicultura de *P. taeda*, para que se proporcione produção satisfatória nos sítios de baixa fertilidade e assegure o fornecimento dessa matéria-prima.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONJUNTURA DOS PLANTIOS DO GÊNERO *Pinus*

A atividade florestal apresenta potencial de conciliar proteção e produção, através da cobertura de solos frágeis como também na geração de renda utilizando-se da exploração racional, sobretudo em áreas de solos degradados e impróprias à agricultura (SCHNEIDER et al., 2014). Considerando os locais destinados à silvicultura, os plantios do gênero *Pinus* estão nos locais com condições limitadas de sítio, pela boa adaptabilidade da espécie nessas condições somada a sua baixa exigência nutricional (SCHNEIDER, 2011). E mesmo nesse cenário, sua produtividade proporciona que a espécie tenha um dos menores tempos de rotação, média de 10 anos, em relação a outros países produtores do gênero (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019).

Entre as espécies do gênero *Pinus*, o crescimento de *P. taeda*, em comparação à *Pinus elliottii* L., sofre maior influência das condições limitantes de solo, por exemplo, arenização e degradação (SCHNEIDER et al., 2014). Mas mesmo sob condições edafoclimáticas restritivas, não impedem o seu desenvolvimento, apesar de conferir crescimento reduzido (FALLEIROS; ZENNI; ZILLER, 2011).

O planejamento das atividades florestais, por meio da execução de um programa silvicultural, envolve a avaliação de todas as atividades que repercutem na produtividade e nos custos, para garantir os objetivos dos plantios (SANQUETTA et al., 2004). Entre as finalidades industriais da madeira do gênero *Pinus*, a maior proporção é destinada a indústria madeireira (56,1%), seguindo em ordem decrescente pelas indústrias de celulose e papel (20,7%), painéis reconstituídos (14,9%) e lenha industrial (8,0%) (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019).

No setor florestal, o cenário econômico demonstra crescimento da produção interna de celulose e madeira reconstituída para atender a demanda do mercado externo, uma vez que o consumo interno dessas matérias-primas se encontra estabilizado (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019). O relatório aponta que além da demanda crescente por matéria-prima florestal, os produtos a base de *Pinus* se encontram valorizados pelo aumento nos valores nominais da madeira em tora e da celulose de fibra longa.

Na conjuntura atual, a baixa produção do gênero *Pinus* comprometeria o fornecimento dessa matéria-prima. Uma baixa oferta da matéria-prima aumentaria os custos às indústrias,

aumentando o preço dos produtos e diminuindo a competitividade dos produtos para exportação. Porém aumento em produtividade não pode ser mais baseado na implantação de novas áreas, localizadas em solos degradados e de baixa fertilidade natural e, por conseguinte, baixa produtividade, principalmente quando uma série de questões voltadas à silvicultura da espécie carece de pesquisas.

## 2.2 SILVICULTURA DO *Pinus taeda*

O crescimento das plantas é afetado pelos fatores luz, temperatura, água, nutrientes, dióxido de carbono e clorofila, que atuam de forma inter-relacionada mesmo que exista um fator específico limitante. A silvicultura visa através das práticas silviculturais, fornecer ou reduzir o impacto desses fatores limitantes. A partir de pesquisas desenvolvidas para a espécie se geraram dados norteadores que podem ser adotados no planejamento silvicultural visando assegurar qualidade e desempenho dos plantios.

Na implantação, considerando a adoção das técnicas adequadas à produção de mudas, mudas de raiz nua com diâmetro do colo entre 4 e 5 mm asseguraria maior sobrevivência, enquanto que para mudas produzidas em recipientes o diâmetro de colo independe (PEZUTTI; CALDATO, 2011). Em termos de espaçamento, os primeiros plantios de *P. taeda* eram adotados espaçamentos de 2 m x 2 m, que com o avanço de pesquisas permitiram a adoção espaçamentos mais amplos (INOUE et al., 2011). Buscando conciliar maior ocupação do espaço, crescimento em diâmetro e área basal, os espaçamentos que fornecem um espaço vital entre 4 m<sup>2</sup> e 6 m<sup>2</sup> por árvore são os mais indicados (INOUE et al., 2011).

A identificação das propriedades do solo que estão correlacionadas no crescimento é abordada em alguns estudos, e imprescindível para a silvicultura da espécie. Entre elas estão as propriedades morfológicas como profundidade e espessura do horizonte A (HORST et al., 2018), físicas como macroporosidade, disponibilidade de água no solo (BOGNOLA et al., 2010), resistência a penetração de raízes, química do solo como soma de bases, K, Ca, Mg e P (BELLOTE; DEDECEK, 2006), e mineralogia como teores de areia e argila (BOGNOLA et al., 2010).

Recentemente, a utilização das informações solo e clima tem se tornado essencial na definição de unidades de manejo, tanto para o planejamento florestal quanto às atividades operacionais da silvicultura (GOMES et al., 2016). Desse modo, sabendo-se que o crescimento é fortemente associado às classes de solo, alcançando os maiores desempenhos

em Latossolo, seguido por Cambissolo e Neossolo, a perspectiva é definir, com base nessas informações, de áreas com diferentes intervenções conforme suas necessidades (HORST et al., 2018).

Os sítios de menor crescimento podem ter sua produtividade aumentada pela realização de práticas silviculturais como podas, desbastes, fertilização e descompactação do solo (BELLOTE E DEDECEK, 2006). O controle da matocompetição é outra prática com relevância em resposta de crescimento, não pela sua ação isolada, mas em conjunto com a fertilização, por auxiliar no maior aproveitamento dos nutrientes (ALBAUGH et al., 2012).

### **2.2.1 Uniformidade de plantio**

A uniformidade de plantio, como prática silvicultural, diferenciada em plantio homogêneo (plantio no mesmo período) e heterogêneo (plantio em diferentes períodos), este último apresenta uma dinâmica operacional pouco usual, mas gerando efeitos que representam situações reais que proporcionam essas diferenças nos plantios. A uniformidade de plantio nesse trabalho apresenta conceito diferente ao empregado a supressão de árvores menores em plantios já estabelecidos (MUNHOZ, 2015).

Enquanto a homogeneidade de plantio representa a seleção de materiais genéticos com alto grau de melhoramento (MUNHOZ, 2015), a heterogeneidade de plantio cria um efeito claro de dominância (BINKLEY et al., 2010) que em condições de campo representariam o comportamento dos diferentes materiais genéticos. Ainda a heterogeneidade representaria a dinâmica do replantio gerando diferentes espaçamentos e diferenciação no aproveitamento de recursos.

O efeito claro de dominância gerado pela heterogeneidade de plantio parte da ideia de que, as árvores dominantes têm maior crescimento pelo crescimento marginal das árvores dominadas, contribuindo para um maior crescimento de determinadas árvores (BINKLEY et al., 2010). De acordo com os autores, a realização de desbastes sob essa dinâmica poderia se aumentar o crescimento das árvores dominantes e prolongar o tempo de rotação do plantio.

O espaço vital disponibilizado a cada árvore, definido pelo espaçamento, é determinante no crescimento inicial das árvores, interferindo no desempenho das variáveis dendrométricas das árvores e do povoamento (INOUE et al., 2011). O espaçamento torna-se uma variável estratégica do ponto de vista silvicultural na implantação, e que em função do avanço da tecnologia industrial, abre a possibilidade de utilização de árvores de diferentes

diâmetros (INOUE et al., 2011). Pelo manejo do espaço fornecido as plantas, pode-se permitir o planejamento da produção madeireira diferenciada, onde as árvores de menor diâmetro são destinadas a produção de biomassa papel e celulose, e as árvores de maior diâmetro para serraria, laminação e multiprodutos (PACHECO et al., 2015).

Considerando o conceito de uniformidade de plantio como prática silvicultural, sua avaliação já ocorre em plantios do gênero *Eucalyptus* (BINKLEY et al., 2010), ainda inexplorada para *P. taeda*.

### 2.2.2 Fertilização

A limitação nutricional é uma das causas responsáveis por afetar o crescimento de *P. taeda* (ALBAUGH, 1998). Com essa afirmação, a prática da fertilização no Sul dos EUA, na década de 90 até 2004, aumentou em povoamentos da espécie, utilizando-se N e P em virtude dos efeitos positivos no aspecto econômico e biológico (ALBAUGH; ALLEN; FOX, 2007).

No sudeste dos EUA, o suprimento de N e P via fertilização aliada à prática de calagem fornecendo Ca, corroborou como resultado positivo dessa prática no crescimento aos 21 anos, alcançando a máxima resposta aos 33 anos de plantio (FOX et al., 2005), evidenciando o potencial da prática a longo prazo. A fertilização como meio de suprir as demandas nutricionais, tem promovido não somente efeitos positivos no crescimento, como no volume de madeira, aumento na biomassa acima do solo e raízes grossas (ALBAUGH, 1998).

No âmbito nacional, a fertilização de *P. taeda* é uma prática incomum para os silvicultores, mas que deve ser questionada diante de alguns cenários. Em uma classificação dos plantios em unidades de manejo no Oeste de Santa Catarina, ao considerar a hipótese de resposta da produtividade ao melhoramento nutricional, cerca de 40% das unidades seriam realocadas em classificações inferiores (GOMES et al., 2016). De acordo com essa classificação e sabendo que não há reposição nutricional, os tetos de produtividade para esses locais seriam menores em comparação a hipótese nula de resposta ao melhoramento nutricional (GOMES et al., 2016). Outra evidência de que o crescimento pode estar sendo limitado pelos aspectos nutricionais, pode ser citada a correlação positiva entre crescimento e características químicas do solo, como teores de K, P (BELLOTE; DEDECEK, 2006), Ca, Mg, Mn e Cu (CASTELO et al., 2008).

Desse modo a fertilização repercutiria em melhores produtividades, na qualidade e estabelecimento de plantios florestais (CARLOS et al., 2014), assegurando o aumento e/ou manutenção da produtividade à longo prazo (VOGEL et al., 2005), sem gerar degradação e exaurimento do solo após a colheita (ALBAUGH, 1998). Mesmo que sem a realização da fertilização se obtenham bons resultados produtivos, ao considerar os efeitos positivos da adubação, os resultados de produtividade poderiam ser ainda superiores (SCHUMACHER; VIERA; WITSCHORECK, 2008).

Nesse sentido, alguns trabalhos abordam os efeitos da fertilização no crescimento da espécie. No desenvolvimento inicial, doses estimadas em 64 kg ha<sup>-1</sup> e 87 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, nessa ordem, promoveram o maior crescimento volumétrico de *P. taeda*, com destaque à adubação fosfatada, efeitos não evidenciados pela aplicação de N (VOGEL et al., 2005). A combinação de diferentes doses NPK demonstra que a aplicação de P, a partir de 75 kg ha<sup>-1</sup>, combinado ou não com N e K, foi indispensável ao crescimento em espessura e altura, refletindo no máximo incremento corrente anual (MORO et al., 2014). Ao longo do ciclo, os efeitos positivos da fertilização fosfatada são notáveis (MUNIZ; BALDANZI; NETTO, 1975), uma vez que o potencial produtivo é decrescente com sucessivas rotações pela redução dos teores de P no solo e sua limitação nos solos tropicais (GATIBONI et al., 2017).

Entretanto a adubação para o gênero ainda é um tema controverso. Os primeiros estudos envolvendo a temática revelam o efeito negativo da aplicação de N, principalmente, e K, com relação direta com as doses aplicadas, em *P. taeda* e *P. elliottii* aos sete anos de idade (MUNIZ; BALDANZI; NETTO, 1975). Seguindo nessa linha, a aplicação N acima de 140 kg ha<sup>-1</sup> já estaria promovendo efeitos negativos no crescimento da espécie (MORO et al., 2014).

Ainda há a abordagem relacionando os efeitos negativos no crescimento associado às fontes de N, no qual a ureia também estaria modificando características fisiológicas, reduzindo a disponibilização de água para as acículas e produzindo efeitos similares aos proporcionados pela seca (FAUSTINO; MORETTI; GRACIANO, 2015). De acordo com os autores, a influência negativa das fontes de N sob a produção de massa seca segue a ordem ureia > nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) > amônia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

Além da adubação mineral, a aplicação de resíduo celulósico como fonte de nutrientes para *P. taeda* promove resultados de crescimento na dose de 80 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduo celulósico aplicado no preparo de solo, contendo 168 kg ha<sup>-1</sup> de N, 592 kg ha<sup>-1</sup> de P e 72 kg ha<sup>-1</sup> de K, em comparação quando não foi aplicado (RODRIGUEZ et al., 2018). Já a aplicação de cinzas não

interferiu no crescimento e na produção de biomassa de mudas da espécie (MAEDA; SILVA; CARDOSO, 2008).

Assim, em determinadas situações a fertilização se faz necessária na manutenção da adequada nutrição e evita a perda prematura de acículas (MORO et al., 2014), em outros momentos requer cautela com a prática, pois pode reduzir o crescimento de *P. taeda* quando não há limitação relacionada à deficiências nutricionais (FAUSTINO; MORETTI; GRACIANO, 2015). O cenário configura-se na incerteza quanto à prática da adubação, com o número restrito de trabalhos avaliando tal prática no Sul do Brasil. Reforçando tal cenário, as recomendações existentes de adubação para *P. taeda* são genéricas, em função do conjunto de dados restrito pela prática ser pouco usual (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO RS/SC, 2016). Independente da escolha entre adubar ou não, uma questão se faz necessária: atentar as questões do manejo de fertilidade nos plantios de *P. taeda* a longo prazo (MAEDA; SILVA; CARDOSO, 2008).

### 2.3 ASPECTOS ECOLÓGICOS EM PLANTIOS DE *Pinus taeda*

Os aspectos ecológicos são fundamentais para o entendimento da manutenção dos sistemas de cultivo de *Pinus*, buscando também auxiliar no desenvolvimento da silvicultura da espécie.

De forma geral as espécies do gênero *Pinus* são conhecidas pela sua baixa exigência nutricional (REISSMANN; WISNEWSKI, 2005), crescendo em solos extremamente pobres, no entanto a espécie apresenta bom desenvolvimento e adaptação sob condições de escassos recursos naturais (SCHUMACHER; VIERA; WITSCHORECK, 2008). Nesse sentido, o aspecto ecológico dos plantios, relacionado à ciclagem de nutrientes, permite entender como os plantios se mantêm em locais onde não seria possível realizar o cultivo de culturas agrícolas (VIERA; SCHUMACHER, 2010). Portanto considerar a ciclagem de nutrientes, através das entradas e saídas de nutrientes é fator essencial na previsão de futuros problemas nutricionais (FERREIRA et al., 2001).

Como entrada de nutrientes no sistema pode-se citar a serapilheira como mecanismo de reposição de nutrientes ao solo, contribuindo na redução do déficit nutricional dos solos onde se encontram os povoamentos de *P. taeda*, onde ocorre acentuada exportação nutricional através da colheita (SCHUMACHER; VIERA; WITSCHORECK, 2008). Através da deposição da serapilheira de *Pinus*, quantidades de 28,7 kg ha<sup>-1</sup> de Ca e de 27,3 kg ha<sup>-1</sup>N

retornam ao solo anualmente, correspondendo à 80% dos macronutrientes, contribuindo na manutenção dos nutrientes nos plantios (SCHUMACHER; VIERA; WITSCHORECK, 2008). Como fonte de nutrientes, a serapilheira é explorada através das raízes finas (< 2 mm) do *Pinus*, no entanto as raízes finas apresentam alta taxa de renovação pela sua susceptibilidade ao aumento de temperatura, gerando um gasto energético que poderia ser convertido em biomassa de madeira (REISSMANN e WISNEWSKI, 2005).

Outra forma de contribuição na nutrição é a precipitação pluviométrica, que arrasta partículas suspensas na atmosfera, arrastando também partículas retidas na copa e lixiviando elementos constituintes das árvores ao atravessar o dossel (VALENTE et al., 2016). Em povoamento de *P. taeda*, o aporte anual de íons anual pela precipitação pluviométrica incidente na floresta foram de 4,54 kg ha<sup>-1</sup> de N, 0,84 kg ha<sup>-1</sup> de P, 18,04 kg ha<sup>-1</sup> de K, 9,83 kg ha<sup>-1</sup> de Ca, 3,43 kg ha<sup>-1</sup> de Mg e 17,02 kg ha<sup>-1</sup> de S (LOPES, 2013). Conforme o autor, a precipitação interna foi enriquecida em 309% de K com uma redução de 50% das quantidades de N e P que foram absorvidos pelas acículas.

A colheita florestal é o principal meio de exportação de nutrientes, devendo esta ser levada em consideração na reposição de nutrientes para manutenção da produtividade dos sítios a médio e longo prazo, sob condições de baixo suprimento nutricional do solo (FERREIRA et al., 2001). No entanto, com sistemas mais intensivos com a colheita da árvore inteira, a remoção de nutrientes poderia alcançar 127% a mais do que apenas retirando a madeira (SCHUMACHER et al., 2013). Através da utilização da madeira com casca, a exportação de nutrientes foi superior em 50% (Cu, B, S e Zn) do total contido na biomassa, evidenciando a necessidade a reposição nutricional na manutenção da fertilidade (VIERA; SCHUMACHER; BONACINA, 2011).

Somando as entradas de nutrientes via serapilheira e precipitação pluviométrica ao longo de 27 anos de plantio, os valores quase se equiparam aos valores exportados pela colheita da madeira e da casca (VIERA; SCHUMACHER; BONACINA, 2011). De acordo com os autores, as contribuições de nutrientes pela precipitação pluviométrica são variáveis conforme o índice pluviométrico e a presença das partículas suspensas no ar. Mesmo com o conhecimento das quantidades de nutrientes exportados, há ausência de informações dos efeitos da exportação nutricional na sustentabilidade dos plantios a longo prazo (GOMES et al., 2016). Dessa forma, a eficiência ou não de uma prática silvicultural, como a fertilização, deve considerar os aspectos ecológicos relacionados à ciclagem de nutrientes no sistema, através do fluxo contínuo de entradas e saídas dos nutrientes (LONDERO et al., 2011).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA EXPERIMENTAL

A área experimental de 1,4 ha encontra-se instalada no município de Telêmaco Borba – PR em área pertencente à empresa Klabin S/A, nas coordenadas 24°3' latitude Sul e 50°4' longitude Oeste a 820 m de altitude em relação ao nível do mar. O clima do município, segundo a classificação de Köppen, é Cfb, subtropical úmido sem estação seca e com verão temperado, apresentando precipitação pluviométrica anual de 1443 mm e a temperatura do ar média anual de 18,6°C (ALVARES et al., 2013).

O solo do experimento é um Latossolo Vermelho distrófico típico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2018) com textura muito argilosa, baixa atividade da fração argila, baixa saturação por bases e alta saturação por alumínio (Tabela 1) A vegetação primária do local era a tipologia Floresta Ombrófila Mista.

Tabela 1 - Caracterização química do perfil de solo antes do plantio na área experimental, em Telêmaco Borba-PR

Hz	Profundidade (cm)	pH KCl (1:2,5)	Argila ----- (%) -----	N -----	Ca <sup>2+</sup> -----	Mg <sup>2+</sup> (mg dm <sup>-3</sup> ) -----	Na <sup>+</sup> -----
AP	00-24	3,7	43	0,11	0,1	0,1	0,01
AB	24-42	3,9	42	0,05	0,1	0,1	0,00
BA	42-63	4,0	42	0,05	0,1	0,1	0,00
Bw 1	63-107	4,3	49	0,04	0,1	0,1	0,01
Bw 2	103-157	4,7	51	0,03	0,1	0,1	0,01
Bw 3	157-176	5,0	49	0,03	0,1	0,1	0,01
Hz	Profundidade (cm)	Al <sup>3+</sup> ----- (mg dm <sup>-3</sup> ) -----	K <sup>+</sup> -----	P <sup>5+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	V ----- (%) -----	m	C/N
AP	00-24	2,8	31,28	2,2	2	90	17
AB	24-42	1,3	15,64	1,0	3	87	15
BA	42-63	1,1	7,82	0,8	4	85	13
Bw 1	63-107	0,6	7,82	0,7	5	75	13
Bw 2	103-157	0,4	3,91	0,6	6	67	10
Bw 3	157-176	0,3	0,00	0,4	6	60	9

Fonte: PPPIB-IPEF, 2007<sup>1</sup>

<sup>1</sup> PPPIB-IPEF. Ficha de instalação de experimento, 2007 [mensagem pessoal],

Em que: Hz= Horizonte; V= Saturação por bases; m: saturação por alumínio.

Para o preparo da área foram realizadas as seguintes atividades silviculturais de pré-plantio: controle e combate à formiga, preparo do solo através de subsolagem, aplicação de herbicida pré e pós-emergente. O plantio foi realizado em fevereiro de 2007 utilizando mudas clonais de *P. taeda*, clone não comercial de procedência Arborgen GE34, em espaçamento 3 m x 2 m.

O experimento bifatorial (2 x 2) consistiu na combinação dos fatores uniformidade de plantio e fertilização, onde cada fator possui dois níveis: homogêneo e heterogêneo, sem fertilização e com fertilização, respectivamente. A combinação dos fatores resultou em quatro tratamentos: heterogêneo sem fertilização (HeS), heterogêneo com fertilização (HeF), homogêneo sem fertilização (HoS) e homogêneo com fertilização (HoF). Os quatro tratamentos seguiram o delineamento blocos ao acaso com três repetições, totalizando 12 unidades experimentais, cada parcela com 96 plantas em uma área de 576 m<sup>2</sup> (Figura 1).

No fator fertilização, os níveis foram sem fertilização e com fertilização, sendo que a primeira aplicação de insumos ocorreu no plantio (2007) com 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário, 400 kg ha<sup>-1</sup> de super fosfato, 80 kg ha<sup>-1</sup> de ureia, 80 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio e 80 kg ha<sup>-1</sup> de micronutrientes, e a segunda adubação (cobertura) após nove anos de plantio (novembro/2016) com a aplicação de 800 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 17:06:24.

Figura 1 - Croqui da distribuição das unidades experimentais na área experimental em Telêmaco Borba- PR



Fonte: PPPIB-IPEF, 2007.

Em relação à uniformidade de plantio, o nível homogêneo consistiu no plantio de todas as mudas de *P. taeda* no mesmo dia (fevereiro/2007), enquanto que no nível heterogêneo o plantio foi efetuado em três períodos diferentes no ano de 2007, com 1/3 das mudas plantadas em fevereiro, 1/3 em julho e 1/3 em dezembro, respectivamente, 0, 150 e 300 dias após o plantio (Figura 2). A construção artificial de heterogeneidade de plantio foi induzida para gerar efeito de dominância.

Figura 2 – Distribuição das mudas clonais de *P. taeda* nas parcelas do nível heterogêneo do fator uniformidade de plantio, plantadas a 0, 150 e 300 dias do plantio inicial

RowPlant	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
R01	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0
R02	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150
R03	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300
R04	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0
R05	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150
R06	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300
R07	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0
R08	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150
R09	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300
R10	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0
R11	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150
R12	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300	0	150	300

Fonte: PPPIB-IPEF, 2007.

### 3.2 DENDROMETRIA, PRODUTIVIDADE E UNIFORMIDADE

Anualmente, entre 2009 e 2019, as variáveis dendrométricas de todas as árvores da parcela (n=96) foram mensuradas. As variáveis avaliadas foram diâmetro à altura do peito (DAP), a 1,3 m acima do nível do solo, de todas as árvores e a altura total (h) das três primeiras linhas e das oito árvores dominantes, com maior DAP, de cada parcela.

Para estimar a altura das demais árvores, utilizou-se dos modelos de relação hipsométrica por idade através das eq. 1 e eq. 2. A escolha de modelo considerou os critérios descritos no item 3.5.

$$\ln(h) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) \quad (1)$$

$$\ln(h) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{DAP}\right) \quad (2)$$

Em que: Ln = logaritmo natural; h = altura total (m); DAP = diâmetro à altura de 1,30m (cm);  $\beta_0$  e  $\beta_1$  = coeficientes.

Considerando os dados obtidos através do inventário foi possível calcular a sobrevivência de indivíduos (%), diâmetro médio (cm), altura total média (m), altura dominante ( $H_{dom}$ , m) e área basal ( $G$ ,  $m^2 ha^{-1}$ ) por parcela e por idade. Com os dados de diâmetro foi realizada uma distribuição de frequências, sendo o número de classes definido pela fórmula de Sturges.

As equações de volume, volume comercial e fator de forma foram obtidas por meio de modelagem com os dados obtidos pela cubagem rigorosa de Smalian (item 3.3). Com base nos dados de volume foram calculados o incremento médio anual (IMA,  $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ ) e incremento corrente anual (ICA,  $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ ) para cada parcela e por idade.

Para análise de uniformidade do plantio, utilizou-se o índice PV50 (eq. 3), que significa o percentual de volume acumulado em 50% das árvores de menor volume da parcela, incluindo falhas (STAPE; ROCHA; DONATTI, 2006).

$$PV50 = \frac{\sum V50_{ji}}{\sum Vt_{ji}} \quad (3)$$

Em que: PV50 = Percentual de volume acumulado em 50% das árvores da parcela (%);  $V50_{ji}$  = Volume ( $m^3$ ) em 50% das menores árvores, incluindo falhas, da parcela  $j$  na idade  $i$ ;  $Vt_{ji}$  = Volume total ( $m^3$ ) da parcela  $j$  na idade  $i$ .

### 3.3 PRODUÇÃO DE BIOMASSA

A determinação da biomassa ( $Mg ha^{-1}$ ) para os tratamentos foi realizada a partir da amostragem destrutiva e modelagem de equações alométricas para a estimativa da biomassa individual ( $kg \text{ árv}^{-1}$ ). Inicialmente, com base nos dados de inventário do ano de 2017 das parcelas HeS e HoF foram definidas seis classes de DAP, das quais foram selecionadas uma árvore por classe para amostragem destrutiva de biomassa acima do solo no ano de 2018, 6 árvores por tratamento e um total de 12 árvores do experimento. Para a amostragem de raízes grossas e médias, maiores de 10 mm de diâmetro, foram selecionados metade dos indivíduos da amostragem de biomassa aérea, 3 por tratamento, totalizando 6 árvores .

A amostragem destrutiva foi realizada com abate dos indivíduos selecionados o mais próximo do nível do solo, preferencialmente, na bordadura da parcela. Inicialmente, realizaram-se as mensurações de altura e altura de copa, com posterior cubagem rigorosa pelo método de Smalian para obtenção do volume com casca, do qual as árvores foram

seccionadas na base, no DAP e a cada metro com mensuração do diâmetro e espessura da casca em duas direções.

Após esses procedimentos, realizou-se a separação dos componentes da biomassa: acículas (terço inferior, médio e superior), galhos (vivos e mortos) e tronco (lenho e casca). Em relação ao tronco foram retirados discos, com aproximadamente 3 cm de espessura, na altura da base, DAP, 25%, 50% e 75% da altura total. Através da separação do lenho e da casca dos discos, determinou-se a proporção destes componentes estimando sua biomassa total pela multiplicação dessa proporção pela biomassa do tronco. Já as raízes foram arrancadas inteiras, através da escavação no entorno do toco e remoção por meio de sistema de roldanas.

Após a separação todos os componentes das árvores foram pesados no campo, dos quais amostras representativas dos componentes foram separadas e encaminhadas ao laboratório do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF). Essas amostras foram secas em estufa à 65°C até peso constante para determinação do teor de umidade. Com base no teor de umidade se obteve a quantidade de massa seca dos componentes das árvores amostradas.

### 3.4 ANÁLISE NUTRICIONAL

Já no laboratório de Ecologia Florestal (UFESM), as amostras secas de alguns componentes da biomassa foram agrupadas em amostras compostas para análise química: acículas composta pelas acículas do terço inferior, médio e superior da copa; casca do fuste composta pela casca em 25%, 50% e 75% da altura total; lenho do tronco do fuste pelo lenho em 25%, 50% e 75% da altura total; galhos composto pelos galhos vivos e mortos.

Posteriormente a homogeneização e moagem das amostras em moinho de lâminas do tipo Willey (peneira 30 *mesh*), o teor de nitrogênio (N, g kg<sup>-1</sup>) no tecido vegetal foi obtido por meio da digestão sulfúrica e determinação em destilador Kjeldahl conforme Tedesco et al. (1995). Os teores (g kg<sup>-1</sup>) de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), foram determinados por espectrofotômetro VIS, fotômetro de chama, espectrofotômetro de absorção atômica, respectivamente, a partir de alíquotas provenientes da digestão nitro-perclórica do tecido vegetal, de acordo com as metodologias de Tedesco et al. (1995) e Miyazawa et al. (1999).

Com base nas estimativas dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) para os demais indivíduos da parcela, calculou-se o estoque de nutrientes através da multiplicação da

biomassa ( $\text{kg } \text{árv}^{-1}$ ) de cada componente pela respectiva concentração ( $\text{g } \text{kg}^{-1}$ ), considerando a área da parcela e o número de indivíduos os resultados foram extrapolados para hectare ( $\text{Mg } \text{ha}^{-1}$ ). O coeficiente de utilização biológica (CUB) considerou o quociente entre produção de biomassa ( $\text{kg } \text{ha}^{-1}$ ) e estoque de nutrientes ( $\text{kg } \text{ha}^{-1}$ ).

### 3.5 ESTIMATIVAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA

A definição das variáveis independentes para os modelos de estimativa das variáveis dependentes (y) volume, produção de biomassa e concentração de nutrientes, foi por meio da modelagem com a Proc Stepwise no *software SAS University edition* (2019). Na modelagem foram utilizadas as variáveis dependentes (y) em função das variáveis independentes altura (h), diâmetro à altura do peito (d) e suas variações:  $d^2$ ,  $h^2$ ,  $d^3$ ,  $h^3$ ,  $d h$ ,  $d^2 h$ ,  $d^3 h$ ,  $d h^2$ ,  $d h^3$ ,  $(d h)^2$ ,  $(d h)^3$ ,  $d^{-1}$ ,  $h^{-1}$ ,  $(d^2)^{-1}$ ,  $(h^2)^{-1}$ ,  $(d^3)^{-1}$ ,  $(h^3)^{-1}$ ,  $(d h)^{-1}$ ,  $(d^2 h)^{-1}$ ,  $(d^3 h)^{-1}$ ,  $(d h^2)^{-1}$ ,  $(d h^3)^{-1}$ ,  $((d h)^2)^{-1}$ ,  $((d h)^3)^{-1}$ ,  $d h^{-1}$ ,  $d^2 h^{-1}$ ,  $d^3 h^{-1}$ ,  $d^{-1} h$ ,  $d^{-1} h^2$ ,  $d^{-1} h^3$ ,  $1/d^2 h^{-1}$ ,  $1/d^3 h^{-1}$ ,  $1/d^{-1} h^2$ ,  $1/d^{-1} h^3$ . Tanto as variáveis dependentes quanto independentes foram incluídas na sua forma logaritmizada.

As equações foram selecionadas pela soma de escores estatísticos, dos quais se considerou como critérios de seleção o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) e o teste de aderência de modelos AIC. Os modelos foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro Wilk), homogeneidade (White) e independência (Durbin-Watson), para validação das condicionantes de regressão. Os resultados foram submetidos à análise de variância e teste Tukey ( $p < 0,05$ ) no *software SISVAR 5.6* (FERREIRA, 2014).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DENDROMETRIA, PRODUTIVIDADE E UNIFORMIDADE

A interação entre os fatores uniformidade de plantio e fertilização não apresentou significância. Desse modo, os resultados dos fatores principais são apresentados separadamente para análise e interpretação.

O plantio heterogêneo (He) promoveu maior mortalidade de indivíduos, alcançando uma redução de 7,11% aos 12 anos em relação ao número inicial de indivíduos (Tabela 2). Enquanto isso o plantio homogêneo (Ho) assegurou alta taxa de sobrevivência ao longo do ciclo. No fator fertilização não houve diferenciação dos tratamentos em relação à sobrevivência, com uma mortalidade média menor que 5%.

No fator uniformidade de plantio o diâmetro médio foi de 19,11 cm aos 12 anos de idade, com predomínio do maior DAP nas árvores submetidas ao plantio Ho até os 11 anos (Tabela 2). Já a fertilização (F) promoveu as maiores médias de DAP durante e até o final ciclo (20,11 cm), demonstrando a resposta positiva dessa prática no crescimento em DAP, em referência aos indivíduos de *P. taeda* sem fertilização (S).

A altura média (Tabela 2) de *P. taeda* apresentou resposta superior no Ho em relação ao He até os seis anos. Após essa idade, a uniformidade de plantio não influenciou no crescimento em altura, alcançando uma média de 16,77 m aos 12 anos. Ao mesmo tempo, a altura média das árvores no F foi superior durante todo período, alcançando uma média de 17,16 m ao final do ciclo, média 4,72% superior em relação à altura das árvores no S.

Nos resultados de altura dominante (Tabela 2), em consonância com os resultados de altura média, o fator uniformidade de plantio não influenciou na altura dominante no final do ciclo, alcançando 17,85 m. Somente entre quatro e oito anos de idade o tratamento Ho conferiu maior altura dominante em relação ao He, atingido respectivamente 14,03 m e 11,90 m aos oito anos. O tratamento F conferiu altura dominante superior (19,20 m) em relação ao S (16,49 m) ao final do ciclo (Tabela 2), diferenciação que se iniciou após três anos de idade.

Tabela 2 – Sobrevivência, diâmetro à altura do peito (Dap), altura (H) e altura dominante (H<sub>dom</sub>) de *P. taeda* ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio e fertilização

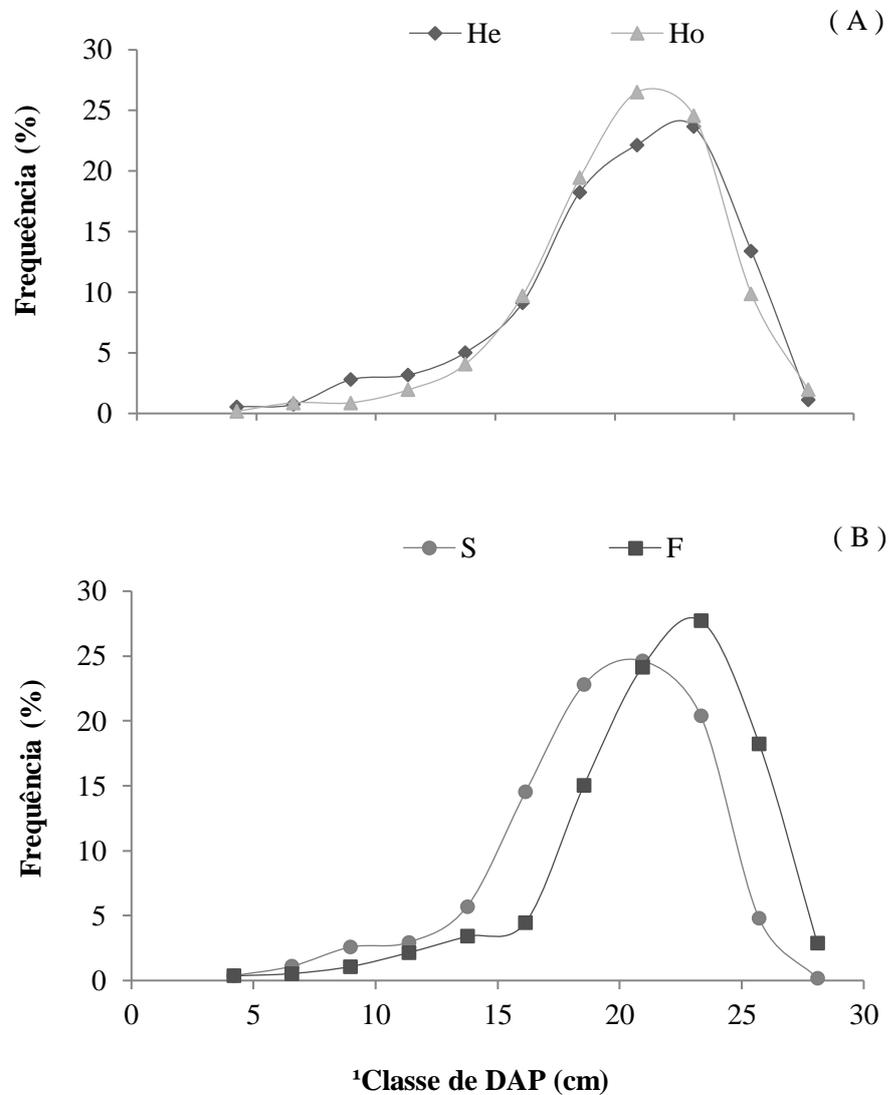
Idade	Sobrevivência (%)		Dap (cm)		H (m)		H <sub>dom</sub> (m)	
	He	Ho	He	Ho	He	Ho	He	Ho
<b>Uniformidade de plantio</b>								
2	94,62 B	98,61 A	-	-	1,89 B	2,40 A	2,81 B	3,16 A
3	93,75 B	98,44 A	5,60 B	6,72 A	3,98 B	4,45 A	5,02 <sup>N.S.</sup>	5,23
4	93,75 B	98,44 A	8,77 B	9,68 A	5,69 B	6,20 A	6,89 <sup>N.S.</sup>	7,08
5	93,58 B	98,44 A	11,26 B	12,02 A	7,44 B	7,89 A	8,52 <sup>N.S.</sup>	8,67
6	93,58 B	98,44 A	13,06 B	13,78 A	8,76 B	9,38 A	9,66 <sup>N.S.</sup>	10,21
7	93,58 B	98,44 A	14,49 B	15,14 A	10,5 <sup>N.S.</sup>	10,92	10,97 <sup>N.S.</sup>	11,51
8	93,40 B	98,44 A	15,65 B	16,23 A	12,09 <sup>N.S.</sup>	12,67	12,63 B	13,30 A
9	93,40 B	98,44 A	16,64 B	17,30 A	13,73 <sup>N.S.</sup>	14,45	14,59 <sup>N.S.</sup>	15,67
10	93,40 B	98,44 A	17,55 B	18,10 A	14,80 <sup>N.S.</sup>	15,19	15,61 <sup>N.S.</sup>	16,26
11	93,23 B	98,44 A	18,03 B	18,51 A	15,72 <sup>N.S.</sup>	15,74	16,90 <sup>N.S.</sup>	16,65
12	92,88 B	98,44 A	18,92 <sup>N.S.</sup>	19,32	16,68 <sup>N.S.</sup>	16,86	17,54 <sup>N.S.</sup>	18,15
<b>Fertilização</b>								
Idade	S	F	S	F	S	F	S	F
2	95,49 <sup>N.S.</sup>	97,74	-	-	1,99 B	2,30 A	2,88 <sup>N.S.</sup>	3,09
3	94,79 <sup>N.S.</sup>	97,40	5,63 B	6,68 A	3,95 B	4,48 A	4,92 B	5,33 A
4	94,79 <sup>N.S.</sup>	97,40	8,57 B	9,87 A	5,58 B	6,30 A	6,67 B	7,29 A
5	94,79 <sup>N.S.</sup>	97,22	10,86 B	12,41 A	7,04 B	8,29 A	8,12 B	9,07 A
6	94,79 <sup>N.S.</sup>	97,22	12,59 B	14,24 A	8,27 B	9,87 A	9,16 B	10,71 A
7	94,79 <sup>N.S.</sup>	97,22	13,91 B	15,72 A	9,61 B	11,81 A	10,20 B	12,28 A
8	94,79 <sup>N.S.</sup>	97,05	15,03 B	16,86 A	11,29 B	13,47 A	11,90 B	14,03 A
9	94,79 <sup>N.S.</sup>	97,05	16,03 B	17,91 A	12,76 B	15,43 A	13,91 B	16,35 A
10	94,79 <sup>N.S.</sup>	97,05	16,88 B	18,78 A	14,12 B	15,87 A	14,87 B	17,00 A
11	94,62 <sup>N.S.</sup>	97,05	17,30 B	19,25 A	14,42 B	17,04 A	15,49 B	18,07 A
12	94,44 <sup>N.S.</sup>	96,88	18,03 B	20,21 A	16,38 B	17,16 A	16,49 B	19,20 A

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S = Sem fertilização; F= Com fertilização; <sup>N.S.</sup>= Médias na linha não diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05); Letras maiúsculas diferem entre si na linha pelo teste Tukey (p<0,05).

Ao final do ciclo, os tratamentos Ho e He apresentaram semelhante frequência média de 24,10% de indivíduos na classe até 24 cm de DAP (Figura 3-A). Em comparação, o Ho possui preponderância na frequência de indivíduos nas classes centrais de DAP, ao passo que o He se destacou com maiores frequências nas menores e maiores classes diamétricas em relação ao Ho, alcançando maior frequência de indivíduos na classe até 26 cm de diâmetro.

Figura 3 – Distribuição da frequência relativa do diâmetro à altura do peito (DAP) de *P. taeda* aos 12 anos nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B)



Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S = Sem fertilização; F= Com fertilização; <sup>1</sup>= Limite superior da classe de diâmetro.

Ainda, a F propiciou a maior concentração de indivíduos nas maiores classes de DAP, com o ápice da curva de distribuição deslocada à direita em relação a S (Figura 3-B). Tal fato é evidenciado ao se observar que 48,84% (F) e 25,37% (S) das árvores se encontravam com DAP acima de 21 cm (Figura 3-B). Ao passo que as árvores no tratamento S acumulam mais indivíduos (74,63%) em classes de diâmetro inferior a 21 cm.

A sobrevivência alcançada para *P. taeda* por alguns autores se situou em 91,7%, 87,5% (PEZUTTI; CALDATO, 2011) e 82,2% (CARNEIRO; BARROSO; SOARES, 2007). Considerando que os menores valores de sobrevivência obtidos no He no presente estudo, estão acima dos obtidos na literatura, pode-se inferir sobre a capacidade do material genético das mudas em assegurar sobrevivência a *P. taeda*. Assim a mortalidade associada ao tratamento He ocorre devido a indução de dominância favorecer maior frequência de indivíduos nas classes de menor DAP (Figura 3-A), desse modo essas árvores suprimidas ou dominadas são mais suscetíveis aos efeitos da competição e apresentam maior probabilidade à mortalidade (MIRANDA et al., 2017).

Em relação ao crescimento, alguns trabalhos apontam os efeitos benéficos da fertilização na fase inicial do plantio nas variáveis em diâmetro e altura de *P. taeda* (ALBAUGH, et al., 2012; MORO et al., 2014). Na região Sudeste dos EUA a fertilização forneceu as melhores respostas de crescimento com DAP entre 17,78 cm e 21,33 cm e altura entre 15,24 m e 18,90 m, aos 12 anos (CLARK; BORDERS; DANIELS, 2004). Quando as árvores receberam fertilização anualmente, alcançaram valores de 19,4 cm de DAP e 15,4 m de altura, aos 11 anos (COYLE; AUBREY; COLEMAN, 2016). Porém, a espécie sem fertilização alcançou DAP de 22,8 cm e altura de 22,24 m, na mesma classe de solo, textura e clima do presente trabalho (RIGATTO; DEDECEK; MATTOS, 2005).

Tal resultado da fertilização se deve ao fato do crescimento em diâmetro da espécie ser influenciado pelos níveis de degradação do solo, e por consequência da fertilidade (SCHNEIDER et al., 2014). A fertilização nesse sentido é responsável por fornecer recursos limitantes nos plantios, sendo que a forma e quantidade serão responsáveis por transformar esse fornecimento em resposta ao crescimento de *P. taeda* (ALBAUGH et al., 2012).

Alguns estudos já apontam que a aplicação de P em qualquer dose sem a adição de N tem demonstrado capacidade em promover maior crescimento para *P. taeda* (FAUSTINO et al., 2011; MORO et al., 2014), estando os efeitos negativos ou ausência de resposta no crescimento associados a fertilização nitrogenada (FAUSTINO et al., 2011; MORO et al., 2014). Nas condições do presente trabalho, avaliando o efeito da aplicação dos macronutrientes como um todo, as altas quantidades de N ( $172 \text{ kg ha}^{-1}$ ) aplicadas durante todo o ciclo não interferiram no crescimento, porém podem ser avaliadas de forma criteriosa para otimizar a relação custo/benefício.

A fertilização em *P. taeda* tem sido realizada com o plantio já estabelecido (MORO et al., 2014; ALBAUGH et al., 1998), mas que já demonstra crescimento limitado em função da

ausência de disponibilidade de N e K nas fases mais jovens (MORO et al., 2014). De encontro com essa forma de realização da prática, o presente estudo demonstra que a fertilização inicial contribuiu para que essa tendência de maior crescimento nas árvores adubadas se mantivesse durante todo o período avaliado.

O diâmetro e a altura no fator uniformidade apresentaram diferenciação entre níveis na fase inicial do crescimento do plantio, efeito não evidenciado a longo prazo. No tratamento Ho, a concorrência inicial das árvores sob mesmo espaçamento possibilita o crescimento apical (INOUE et al., 2011), refletido em crescimento em altura. Mesmo que o aumento de espaço vital pudesse favorecer o crescimento em DAP (INOUE et al., 2011), principalmente no início do plantio (PACHECO et al., 2015) situação inicial no tratamento He, isso não ocorreu. Com o avanço do plantio, o Ho apresenta maior frequência de indivíduos na mesma classe diamétrica (Figura 3-A), de modo que a estrutura do povoamento interfere no crescimento individual das árvores se tornando menos pronunciada, com um declínio no crescimento para todas as árvores (BINKLEY et al., 2010).

Equações alométricas (Tabela 3) foram geradas para estimar individualmente o volume, o volume comercial e o fator de forma artificial, tanto com e sem casca, levando-se em conta o volume rigoroso mensurado com os dados de cubagem. As equações selecionadas apresentaram bom ajuste pelos altos valores para o coeficiente de determinação e valores baixos para o erro padrão da estimativa.

Em média o fator de forma artificial com casca para *P. taeda* aos 11 anos foi de 0,41. Sabendo-se que fator de forma é característico de cada espécie e hábitat natural, o valor de 0,50 foi obtido para fator de forma artificial da espécie aos 10 anos (ATANAZIO et al., 2018).

Tanto o Ho quanto no F (Tabela 4) proporcionaram o maior acúmulo de área basal ao longo de 12 anos, 49,97 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> e 53,77 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Em comparação, Ho proporcionou um acúmulo de 8,57% em relação ao He, e F um aumento de 27,31% comparado ao S.

Aos 12 anos, o clone *P. taeda* produziu um volume 339,30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no plantio Ho, um aumento de 8,67% na produção em relação ao plantio He (Tabela 4). Porém, o maior destaque foi o aumento de 32,31% no volume ocasionado pela F (371,07 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), em comparação ao S.

Tabela 3 - Equações alométricas para estimativas de volume ( $\text{m}^3 \text{ árv}^{-1}$ ) e fator de forma artificial ( $f$ ) de *P. taeda* aos 11 anos

Variável	Equação	<i>n</i>	R <sup>2</sup>	S <sub>yx</sub>
vcc	$y = 0,00003071 \text{ d}^2\text{h}$	12	0,9951	0,01
vcc comercial	$y = 0,00002911 \text{ d}^2\text{h}$	12	0,9932	0,02
vsc	$y = 0,00002739 \text{ d}^2\text{h}$	12	0,9948	0,01
vsc comercial	$y = 0,00002592 \text{ d}^2\text{h}$	12	0,9930	0,01
<i>f</i> com casca	$f = 0,00001911 \text{ h}^3 + 5,04447 \text{ h}^{-1}$	12	0,9971	0,02
<i>f</i> sem casca	$f = 2,36805 \text{ h}^{-1} + 0,03776 \ln(\text{h}^3\text{d}^{-1})$	12	0,9967	0,02

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: vcc= Volume com casca; vcc comercial= Volume com casca comercial; vsc= Volume sem casca; vsc comercial= Volume sem casca comercial; *y*= Volume ( $\text{m}^3 \text{ árv}^{-1}$ ); *n*= Número de árvores; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinação; S<sub>yx</sub>=Erro padrão da estimativa.

Em acordo com a produtividade volumétrica, o Ho ( $28,27 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e a F ( $30,92 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) proporcionaram os maiores valores de IMA (Tabela 4) em relação aos demais tratamentos. Enquanto no fator uniformidade de plantio é possível visualizar uma redução na taxa de crescimento, mas ainda crescente, no fator fertilização as árvores fertilizadas já alcançaram uma estabilização. Outro ponto a ser observado é a redução no IMA das árvores no tratamento S aos 11 anos.

Não houve diferenciação no ICA (Tabela 4) na uniformidade de plantio após sete anos do plantio, com média de  $46,10 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . De forma geral, a F apresentou os maiores valores de ICA ao longo do ciclo, mas finalizando com uma média de  $37,99 \text{ (m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1})$  inferior aos resultados de ICA no S aos 12 anos. Nota-se que para todos os tratamentos houve uma redução nos valores de ICA aos 11 anos, com aumento dos valores no ano seguinte, com exceção de F que se manteve no mesmo patamar.

Ao analisar as curvas de incremento para área basal nos fatores avaliados (Figura 4), aos nove anos as curvas de ICA e IMA se sobrepõem para He, enquanto que em Ho somente aos dez anos ocorre o cruzamento. Logo, no fator fertilização a sobreposição das curvas de incremento ocorre aos dez e oito anos para os tratamentos S e F, respectivamente.

Tabela 4 - Área basal por hectare (G), volume com casca ( $V_{cc}$ ), incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA) de *P. taeda* ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio e fertilização

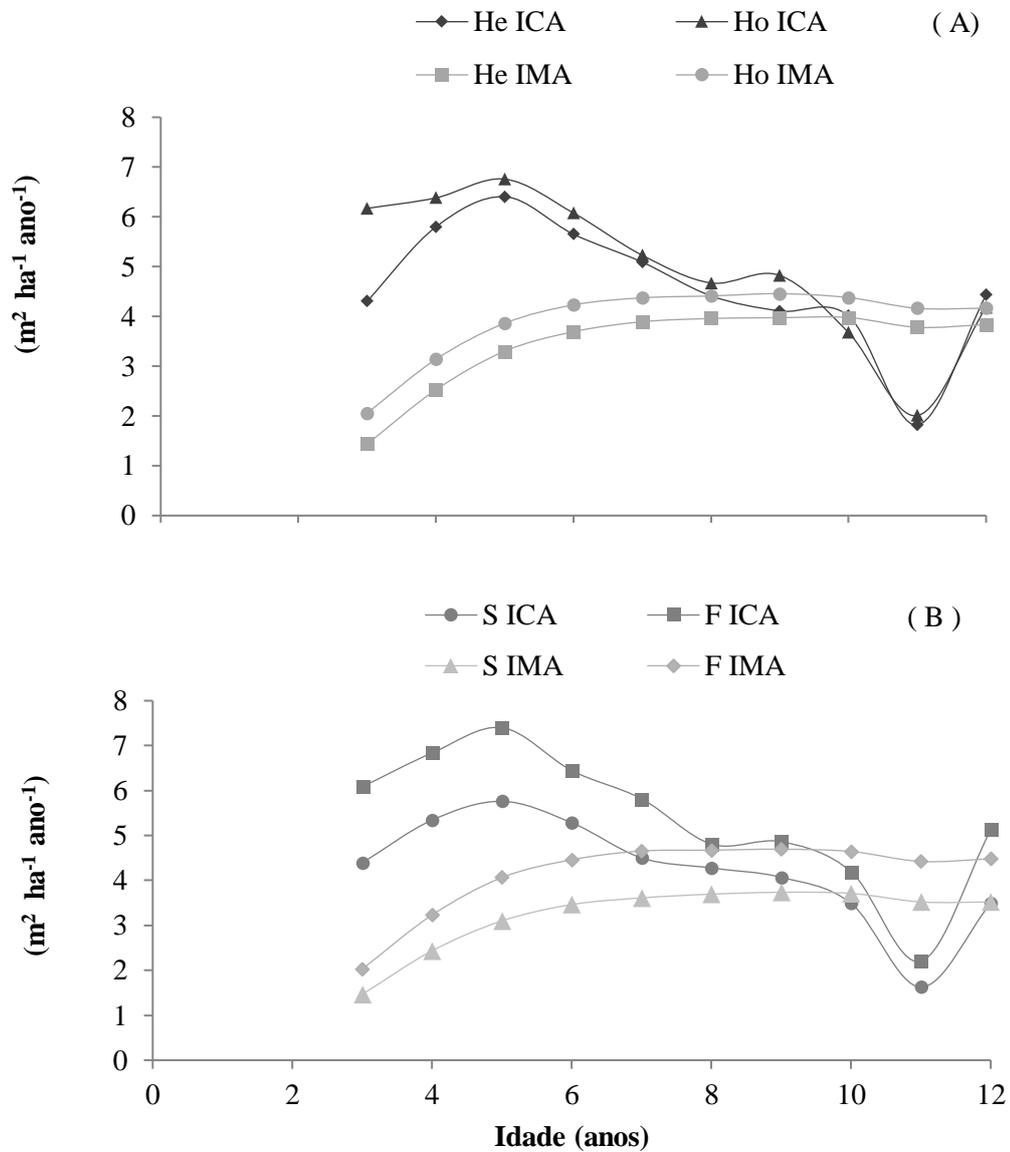
Idade	G ( $m^2 ha^{-1}$ )		$V_{cc}$ ( $m^3 ha^{-1}$ )		IMA ( $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ )		ICA ( $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ )	
	He	Ho	He	Ho	He	Ho	He	Ho
<b>Uniformidade de plantio</b>								
3	4,30 B	6,17 A	7,49 B	11,44 A	2,50 B	3,81 A	7,49 B	11,44 A
4	10,10 B	12,55 A	24,28 B	31,92 A	4,86 B	6,38 A	16,79 B	20,48 A
5	16,51 B	19,31 A	50,99 B	62,11 A	10,20 B	12,42 A	26,70 B	30,18 A
6	22,16 B	25,39 A	79,88 B	96,96 A	13,31 B	16,16 A	28,89 B	34,86 A
7	27,25 B	30,62 A	117,00 B	135,50 A	16,71 B	19,36 A	37,12 <sup>N.S.</sup>	38,54
8	31,66 B	35,29 A	155,60 B	179,85 A	19,45 B	22,48 A	38,61 <sup>N.S.</sup>	44,35
9	35,77 B	40,11 A	200,48 B	233,27 A	22,28 B	25,92 A	44,87 <sup>N.S.</sup>	53,42
10	39,78 B	43,79 A	239,17 B	267,36 A	23,92 B	26,74 A	38,68 <sup>N.S.</sup>	34,10
11	41,60 B	45,79 A	268,83 B	290,49 A	24,44 B	26,41 A	29,66 <sup>N.S.</sup>	23,13
12	46,03 B	49,98 A	312,22 B	339,30 A	26,02 B	28,28 A	43,39 <sup>N.S.</sup>	48,81
<b>Fertilização</b>								
Idade	S	F	S	F	S	F	S	F
3	4,39 B	6,08 A	7,55 B	11,38 A	2,52 B	3,79 A	7,55 B	11,38 A
4	9,73 B	12,92 A	22,95 B	33,26 A	4,59 B	6,65 A	15,39 B	21,88 A
5	15,50 B	20,32 A	45,13 B	67,96 A	9,03 B	13,59 A	22,18 B	34,70 A
6	20,78 B	26,77 A	70,47 B	106,37 A	11,75 B	17,73 A	25,35 B	38,40 A
7	25,28 B	32,58 A	98,95 B	153,55 A	14,14 B	21,94 A	28,48 B	47,19 A
8	29,56 B	37,39 A	134,60 B	200,86 A	16,83 B	25,11 A	35,65 B	47,31 A
9	33,63 B	42,26 A	172,68 B	261,07 A	19,19 B	29,01 A	38,08 B	60,21 A
10	37,12 B	46,45 A	211,49 B	295,04 A	21,15 B	29,50 A	38,81 <sup>N.S.</sup>	33,97
11	38,75 B	48,65 A	226,23 B	333,09 A	20,57 B	30,28 A	14,75 B	38,04 A
12	42,24 B	53,77 A	280,45 B	371,07 A	23,37 B	30,92 A	54,22 A	37,99 B

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S = Sem fertilização; F= Com fertilização; <sup>N.S.</sup>= Médias na linha não diferem entre si pelo teste Tukey ( $p<0,05$ ); Letras maiúsculas diferem entre si na linha pelo teste Tukey ( $p<0,05$ ).

O encontro das curvas de incremento para volume (Figura 5) representa a idade técnica de corte dos plantios. Mesmo que os valores de ICA e IMA se sobreponham aos 11 anos para Ho e S, não caracteriza estabilização no crescimento já que no ano seguinte o crescimento é retomado. Assim até os 12 anos nenhum dos tratamentos alcançou incremento máximo, não sendo recomendado o corte final nessa idade.

Figura 4 – Curvas de incrementos anuais em área basal por hectare (G) de *P. taeda* ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B)

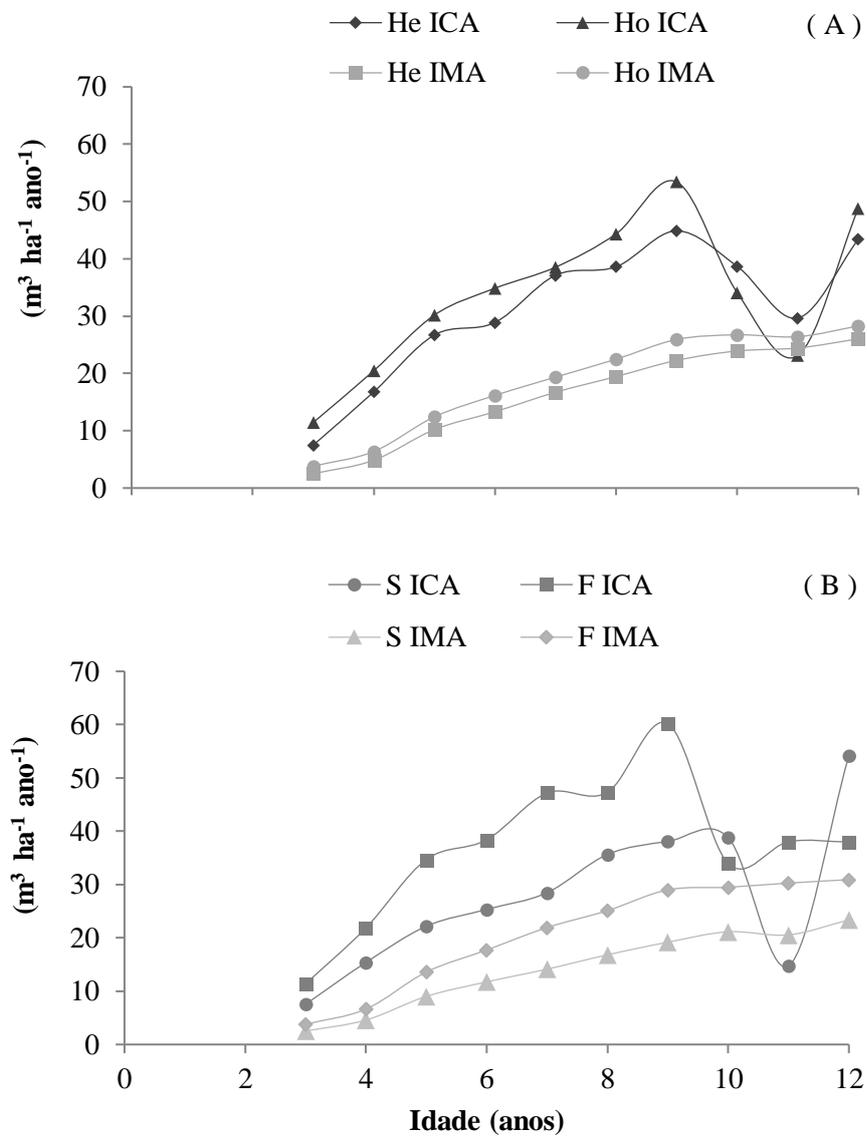


Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S = Sem fertilização; F= Com fertilização; ICA = Incremento corrente anual; IMA= Incremento médio anual.

O índice PV50 significa que quanto maior o volume acumulado em 50% das menores árvores da parcela há maior uniformidade no crescimento das árvores. Dessa forma, tanto o plantio Ho quanto a F (Tabela 5), foram os tratamentos que asseguraram maior uniformidade. A diferença de acúmulo aos 12 anos de Ho para He foi de 5,09%, enquanto que de F para S foi de 3,42%.

Figura 5 – Curvas de incrementos anuais de volume de *P. taeda* ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B)



Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S= Sem fertilização; F= Com fertilização; ICA= Incremento corrente anual; IMA= Incremento médio anual.

Considerando os tratamentos Ho e He, houve uma redução de 5,09% no índice PV50 e de 2,26 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de IMA (Tabela 4), pode-se inferir que a redução de 1% no PV50 representa uma perda de 0,44 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de produtividade. Ao realizar a mesma análise de F para S, as perdas foram maiores alcançando 2,21 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para cada 1% de redução no PV50.

Tabela 5 – Índice de uniformidade PV50 de *P. taeda* ao longo de 12 anos de plantio nos fatores uniformidade de plantio e fertilização

<b>I</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>He</b>	18,92 b	23,56 b	25,96 b	26,60 b	27,78 b	28,05 b	28,57 b	28,75 b	28,96 b	28,37 b
<b>Ho</b>	31,57 a	31,49 a	33,15 a	33,29 a	33,77 a	34,35 a	34,44 a	34,53 a	34,54 a	33,46 a
<b>S</b>	22,98 <sup>n.s.</sup>	24,27 b	26,47 b	27,09 b	28,02 b	28,85 b	29,59 b	29,78 b	29,91 b	29,2 b
<b>F</b>	27,50	30,77 a	32,64 a	32,80 a	33,52 a	33,55 a	33,42 a	33,49 a	33,58 a	32,63 a

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: I= Idade; He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S= Sem fertilização; F= Com fertilização; <sup>n.s.</sup>= Médias na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ); Letras minúsculas diferem entre si na coluna pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

Sem a realização da fertilização, a área basal de *P. taeda* alcançou valores próximos a  $30 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , aos 9 anos (PACHECO et al., 2015) e  $60 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  aos 12 anos (LEITE; NOGUEIRA; MOREIRA, 2006; NASCIMENTO et al., 2015), no Sul do Brasil. Nos EUA, com a prática da fertilização a espécie alcançou valores de  $39,2 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  (COYLE; AUBREY; COLEMAN, 2016) e  $41 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  (SAMUELSON et al., 2008) aos 11 anos. Mesmo com valores abaixo de área basal, os tratamentos F e Ho com maior ocupação da área, representada pelo maior acúmulo de área basal, reflete o maior aproveitamento dos fatores produtivos do sítio (INOUE et al., 2011).

Na região do Norte de SC, *P. taeda* alcançou volume entre  $400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (LEITE; NOGUEIRA; MOREIRA, 2006) e  $600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  aos 12 anos de idade (NASCIMENTO et al., 2015). Em sítios de produtividade média o volume foi  $309,57 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para *P. taeda* aos 12 anos (MAINARDI; SCHNEIDER; FINGER, 1996), sítios onde intervenções na fertilidade não foram realizadas. Sob condições edafoclimáticas diferentes das do Sul do Brasil, somada a fertilização + irrigação a produção da espécie em volume alcançou  $348 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  aos 11 anos (SAMUELSON et al., 2008).

Os plantios de *P. taeda* no Brasil são classificados em sítios de baixa, média e alta capacidade produtiva, apresentando IMA de 22, 27 e  $32 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente (SANQUETTA et al., 2018). Ainda os valores de IMA de *P. taeda* variam de  $13,10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  a  $49,14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , nos sítios de menor e maior produtividade, com valores de  $28,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  nos locais de produtividade média (MAINARDI; SCHNEIDER; FINGER, 1996).

Corroborando com os resultados da fertilização, quando realizada até um ano do plantio em promoveu um aumento de até 26% no volume de madeira, até 40% no IMA e até 37% no ICA (MORO et al., 2014). De acordo com os autores, a fertilização promove

resultados relevantes de produtividade nas adubações um, cinco e nove anos após o plantio, porém quanto mais tardia sua realização, maiores são as doses para elevar o crescimento volumétrico reduzido no desenvolvimento inicial.

A indução de heterogeneidade gera árvores dominadas com menor capacidade de interceptação de luz e utilização de recursos para conversão em produtividade, em comparação as árvores dominantes (BINKLEY et al., 2010). Ao objetivar a produção de celulose, torna-se desejável a maior densidade populacional, a maior produtividade em volume de madeira, podendo ser adotados manejos mais intensivos, uma vez que essa produção não requer atenção a qualidade diamétrica (SANQUETTA et al., 2004) e as propriedades da madeira (CLARK; BORDERS; DANIELS, 2004). Nesse sentido, o plantio Ho por produzir maior volume por unidade área é indicado para plantios com essa finalidade.

A idade em que ocorre o cruzamento das curvas de ICA e IMA da área basal representa o momento em que os plantios podem ser desbastados, pois há indicação de início da competição intraespecífica (NASCIMENTO et al., 2015). Nesse sentido, para proporcionar crescimento em área transversal, o desbaste é indicado para aumentar o espaço vital aos indivíduos remanescente (PACHECO et al., 2015), até que as árvores alcancem idade técnica de corte pelo volume (NASCIMENTO et al., 2015).

Através da análise gráfica das curvas de incremento de área basal, a idade técnica de 10 anos foi obtida para o desbaste *P. taeda*, demonstrando que os sítios de maior crescimento apresentam início da competição em idades mais jovens, em comparação aos sítios de menor potencial produtivo (MIRANDA et al., 2017; NASCIMENTO et al., 2015). A idade obtida no presente estudo também coincide com as idades recomendadas para o primeiro desbaste entre 7 e 9 anos na qual a principal destinação da madeira é para produção de celulose (KOHLENER et al., 2015; SANQUETTA et al., 2004). Mesmo que desbastes não sejam recomendados no manejo da espécie quando a destinação da madeira é para a produção de celulose por não interferir na produtividade volumétrica (SANQUETTA et al., 2004). Ao realizar a fertilização, há antecipação de dois anos no início da competição entre árvores (Figura 4), do mesmo modo que o plantio He, pelo seu efeito de dominância. Essa análise permite ponderar sobre a adoção dessas práticas silviculturais, que terão implicações futuras no manejo do povoamento.

De modo geral a idade de corte final para *P. taeda* é aos 20 anos em plantios sem desbaste para produção de celulose (SANQUETTA et al., 2004), podendo ser reduzida a idade técnica de corte com a melhoria da qualidade dos sítios (NASCIMENTO et al., 2015).

A produção volumétrica obtida permite visualizar a prognose desses diferentes tratamentos silviculturais, na qual em termos de produtividade alcança maiores patamares com a fertilização e homogeneidade do plantio. Esse cenário também torna possível visualizar o potencial desses tratamentos em reduzir a idade de corte dos plantios, dinamizando o fluxo produtivo.

As principais condições limitantes ao crescimento da espécie estão relacionadas a disponibilidade de nutrientes, água (ALBAUGH et al., 2012), relevo, profundidade efetiva, rochoso/pedregoso (GOMES et al., 2016). Considerando a principal limitação na área experimental era de ordem nutricional, estando essa limitação suprida no tratamento F, os valores de crescimento baixos em relação à literatura se devem ao clone não comercial adotado no presente estudo. Contudo, mesmo que com os resultados de crescimento e produtividade obtidos no presente trabalho estejam mais próximos aos obtidos no país de origem da espécie do que com as condições brasileiras, o efeito positivo da fertilização nessas variáveis é claro.

O plantio homogêneo apresentou os melhores resultados de crescimento e de ganhos em produtividade, demonstrando a importância da qualidade na implantação dos plantios e os efeitos caso sejam necessários replantios até 300 dias após o plantio inicial. Como tratamento He, apresenta crescimento diferenciado, sobretudo maiores frequências em classes distintas de diâmetro (Figura 3), uma avaliação sobre sua utilização para multiprodutos se faz necessária. Nesse sentido, poder-se-ia obter produtos de maior valor agregado em função da sua destinação para usos mais nobres, com maximização do resultado econômico.

#### 4.2 PRODUÇÃO DE BIOMASSA

Ao realizar a amostragem destrutiva de árvores para quantificação da biomassa individual ( $\text{kg } \text{árv}^{-1}$ ) foram geradas as equações alométricas (Tabela 6) para estimar a biomassa individual por componente dos demais indivíduos de *P. taeda* aos 11 anos de idade. Todas as equações obtiveram bom ajuste, pelos altos valores para o coeficiente de determinação e valores baixos para o erro padrão da estimativa. Na modelagem da biomassa, as variáveis DAP e altura total são responsáveis por ajustes mais precisos das equações (SHIKOWSKI; DALLA CORTE; SANQUETTA, 2013).

Tabela 6 - Equações alométricas para estimar a biomassa (kg árv<sup>-1</sup>) dos diferentes componentes de *P. taeda* aos 11 anos

Comp.	Equação	n	R <sup>2</sup>	S <sub>yx</sub>
<b>A</b>	$\ln(y) = 1,73385 dh^{-1} - 118,91189 (1/d^3h^{-1})$	12	0,9830	0,23
<b>L</b>	$\ln(y) = 0,000003 dh^3 + 0,70 \ln(d^3h^{-1}) - 79,08 (1/h^3d^{-1})$	12	0,9999	0,05
<b>Ld</b>	$\ln(y) = -150,57537 1/h^3d^{-1} - 1,47652 \ln(1/d^2h^{-1})$	12	0,9990	0,12
<b>Lf</b>	$\ln(y) = 0,00023022 h^3 - 0,30282 \ln(1/d^3h^{-1})$	12	0,9883	0,32
<b>Gv</b>	$\ln(y) = -1478822 ((dh)^3)^{-1} + 0,19262 d^2h^{-1} - 0,00368 d^3h^{-1}$	12	0,9955	0,19
<b>Gm</b>	$\ln(y) = 0,00497 dh + 61141 (dh^3)^{-1} - 8989967 ((dh)^3)^{-1}$	12	0,9647	0,40
<b>C</b>	$\ln(y) = -1496864 1/(dh)^3 - 0,76866 \ln(1/d^2h^{-1})$	12	0,9978	0,11
<b>Cd</b>	$\ln(y) = 0,0131 dh - 0,00002326 dh^3 - 1071477 ((dh)^3)^{-1}$	12	0,9937	0,18
<b>Cf</b>	$\ln(y) = 0,00000691 (dh)^2 - 6376,30384 (d^3h)^{-1}$	12	0,8282	0,35
<b>R</b>	$\ln(y) = -1661,15717 (h^3)^{-1} - 1,17586 \ln(1/d^2h^{-1})$	6	0,9967	0,23
<b>T</b>	$\ln(y) = 0,000002 dh^3 - 88,41 (1/h^3d^{-1}) - 0,75 \ln(1/d^3h^{-1})$	12	0,9999	0,05
<b>Ba</b>	$\ln(y) = -53,73462 (h^2)^{-1} - 0,805 \ln(1/d^3h^{-1})$	12	0,9995	0,12
<b>Bt</b>	$\ln(y) = -0,80981 \ln(1/d^3h^{-1})$	6	0,9996	0,10

Fonte: Elaboração da autora.

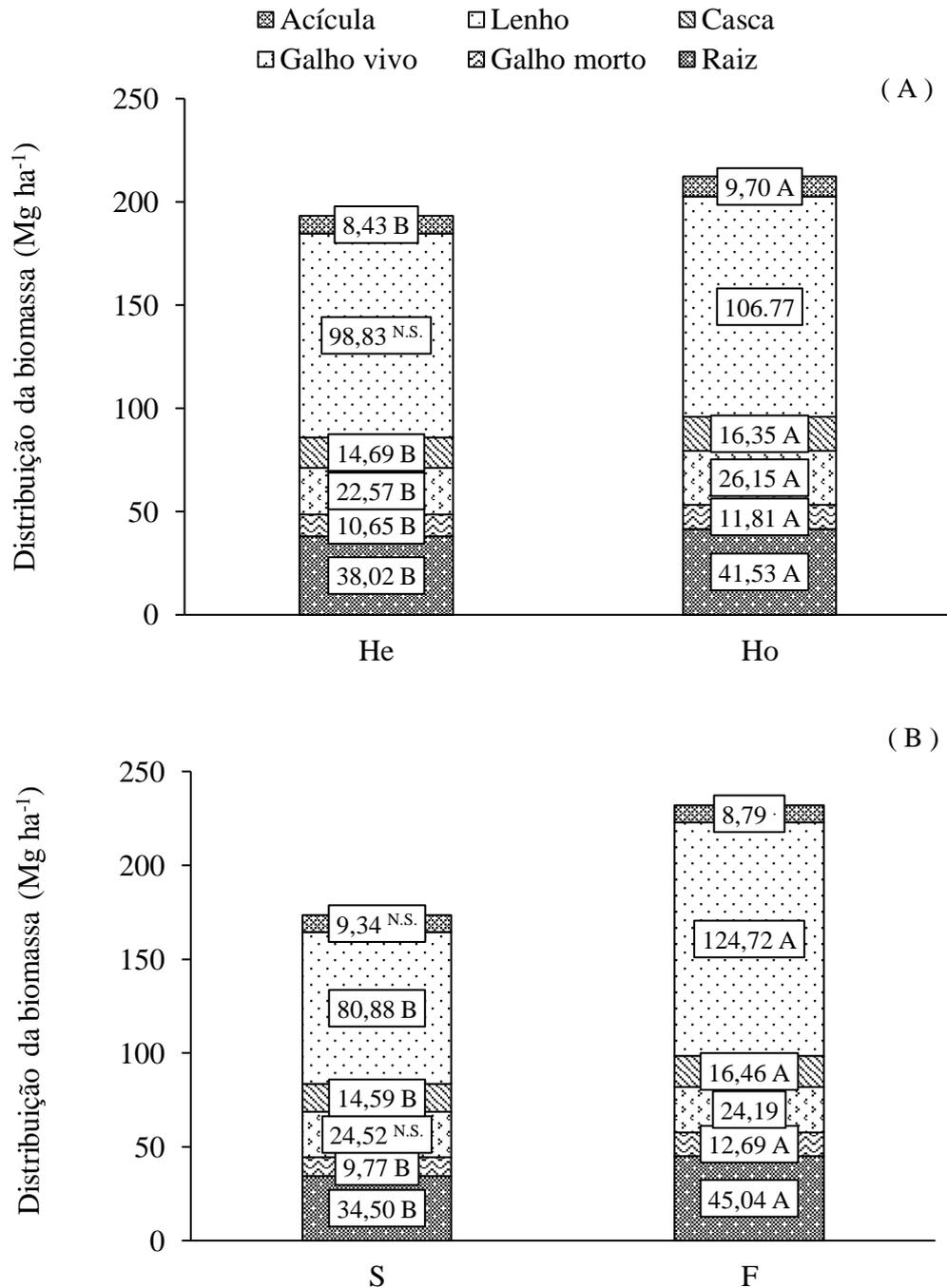
Em que: Comp= Componente; A= Acícula; L= Lenho; Ld= Lenho no DAP; Lf= Lenho no fuste; Gv= Galho vivo; Gm= Galho morto; C= Casca; Cd= Casca no DAP; Cf= Casca no fuste; R= Raiz; T= Tronco; Ba= Biomassa aérea; Bt= Biomassa total; y= Biomassa (kg árv<sup>-1</sup>); n= Número de árvores; R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinação; S<sub>yx</sub>=Erro padrão da estimativa.

Através das equações na obtenção das estimativas de produção de biomassa, a fertilização apresentou a maior produção de biomassa total de 231,89 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 6) com a maior proporção de biomassa no lenho (Figura 7), uma diferença de 33,56% em comparação a produção de biomassa total de 173,62 Mg ha<sup>-1</sup> no tratamento S. Apesar da menor diferença entre a produção de biomassa total no fator uniformidade de plantio, a produção no nível Ho (212,31 Mg ha<sup>-1</sup>) foi 9,89% superior em relação ao nível He (193,19 Mg ha<sup>-1</sup>).

No fator uniformidade de plantio, o plantio Ho apresentou a maior produção dos componentes da biomassa, com exceção do lenho, comparado ao He (Figura 6), mas em termos de distribuição percentual dos componentes não houve diferenciação entre os tratamentos (Figura 7). Para os componentes no tratamento F, a produção de biomassa dos componentes lenho, casca, galho morto e raízes foi superior ao nível sem fertilização (Figura 6). Mesmo com a produção superior dos componentes no F, a alta produção do lenho reduz a contribuição percentual dos outros componentes. De forma geral, os componentes da

biomassa apresentaram a ordem decrescente de produção: lenho > raízes > galho vivo > galho morto > casca > acículas.

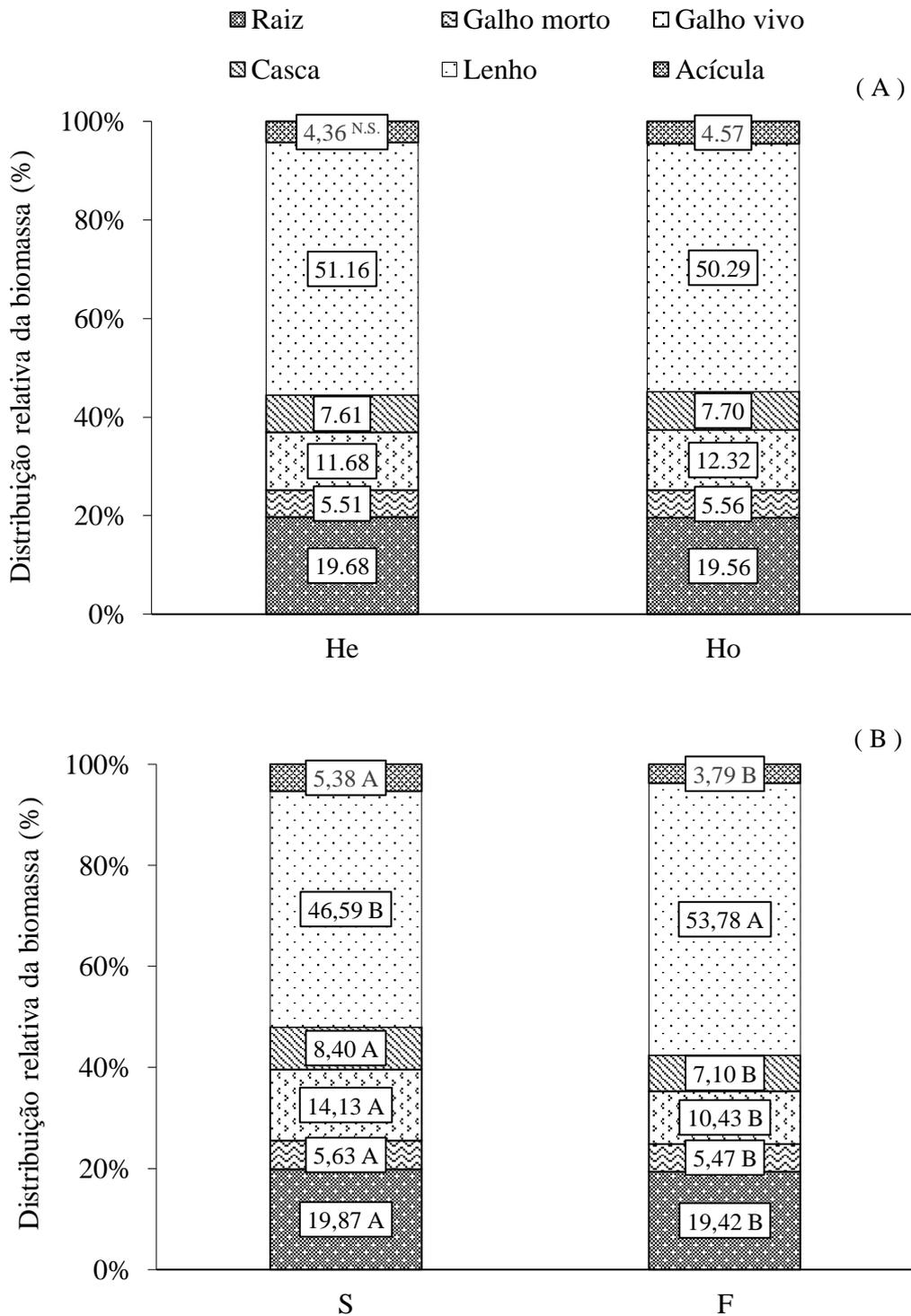
Figura 6 - Distribuição da produção de biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de *P. taeda* aos 11 anos nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B)



Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S = Sem fertilização; F= Com fertilização; <sup>N.S.</sup>= Médias não diferem entre si na linha pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ); Letras maiúsculas iguais não diferem entre si na linha (componentes) pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

Figura 7 - Distribuição relativa da produção de biomassa (%) de *P. taeda* aos 11 anos nos fatores uniformidade de plantio (A) e fertilização (B)



Fonte: Elaboração da autora.

Em que= He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S = Sem fertilização; F= Com fertilização; N.S.= Médias não diferem entre si na linha pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ); Letras maiúsculas iguais não diferem entre si na linha (componentes) pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

No sudeste dos EUA, produção de biomassa de *P. taeda* alcançou com a fertilização valores próximos a 180 Mg ha<sup>-1</sup>, cerca de 50 Mg ha<sup>-1</sup> acima das árvores que não foram fertilizadas aos 11 anos (COYLE; AUBREY; COLEMAN, 2016). Valores de 175,2 Mg ha<sup>-1</sup> de biomassa total foram obtidos na mesma idade, associando fertilização com irrigação e controle da matocompetição, produção de 72,6 Mg ha<sup>-1</sup> a mais que nas parcelas controle (SAMUELSON et al., 2008).

A produção de biomassa total de *P. taeda* aos 12 anos no Sul do Brasil, sem fertilização e sem desbastes, variou de 103 Mg ha<sup>-1</sup> a 242 Mg ha<sup>-1</sup>, alcançado uma produção de 151,2 Mg ha<sup>-1</sup> em Telêmaco Borba-PR (MUNHOZ, 2015). Em outros sítios cultivados sem intervenções silviculturais como as do presente trabalho, a produção total aos 16 anos foi de 313 Mg ha<sup>-1</sup> (SIXEL et al., 2015) e aos 27 anos de 266,08 Mg ha<sup>-1</sup> (SCHUMACHER et al., 2013).

Assim como no presente estudo, outros trabalhos demonstram a capacidade do gênero *Pinus* em aumentar sua capacidade de produção de biomassa com a maior disponibilidade de recursos (FERNÁNDEZ et al., 2011), e na modificação da alocação de biomassa com a fertilização (COYLE; AUBREY; COLEMAN, 2016). Em relação a biomassa do tronco, a prática da fertilização proporcionou uma produção de 143,9 Mg ha<sup>-1</sup>, 58,3 Mg ha<sup>-1</sup> a mais do que quando a prática não foi realizada (SAMUELSON et al., 2008). De acordo com esse estudo, a fertilização quando realizada favorece os maiores incrementos médios e correntes anuais de biomassa do lenho, em relação às outras práticas adotadas. A elevada produção de biomassa no lenho se deve a maior eficiência no crescimento, uso da luz e do nitrogênio (MUNHOZ, 2015) ocasionada por essa prática.

Com o avanço da idade dos plantios há redução da relevância dos componentes da copa (BARROS FILHO et al., 2017), reflexo do início da competição intraespecífica pelo sombreamento das mesmas (ADEGBIDI; JOKELA; COMERFORD, 2005). De modo inverso ao que ocorre a produção de biomassa da copa, o tronco apresenta aumento crescente na proporção de biomassa total individual ao longo do tempo (SHIKOWSKI; DALLA CORTE; SANQUETTA, 2013). De acordo com os autores a participação dos outros componentes é reduzida ao longo da idade, mas sem representar um padrão específico.

Essas informações podem ser exemplificadas através da proporção de biomassa de lenho em árvores fertilizadas de *P. taeda* representou 40% aos 8 anos e 63% aos 16 anos, enquanto que as acículas de 29% reduzem para 4% da sua proporção da biomassa, nas

mesmas idades respectivamente (ALBAUGH et al., 2004). Em plantios de 27 anos, o lenho do tronco chega a representar 69,1% da biomassa total, ao passo que as acículas equivalem a 3,4% (SCHUMACHER et al., 2013).

Em algumas situações, a fertilização pode ser vista sob uma perspectiva negativa, no que se refere ao padrão de alocação de biomassa nas raízes, ocasionando reduções de produtividade de biomassa (FAUSTINO et al., 2015). A prática pode ocasionar redução na produção de biomassa de raízes finas (<2,0 mm), sem afetar a biomassa de raízes grossas (ALBAUGH et al., 1998). No presente estudo a tendência dos autores é corroborada quanto à biomassa de raízes grossas, enquanto que as raízes finas não foram avaliadas.

Os resultados de aumento da produção de biomassa obtidos com a fertilização, de forma geral são alcançados quando a prática é realizada em plantios já estabelecidos, em idade avançada (ALBAUGH et al., 1998). Porém, ao longo das rotações a prática realizada desse modo pode apresentar resultados desfavoráveis de produtividade, uma vez que as plantas já podem encontrar limitação nutricional no início do plantio (ALBAUGH et al., 2004). Levando em conta, os efeitos fertilização no presente estudo reforçam a relevância de realizar a fertilização no início do plantio, uma vez que a literatura já demonstra o potencial acúmulo de nutrientes pela fertilização aos quatro anos, devendo a prática ser realizada antes dessa idade (BARROS FILHO et al., 2017).

De modo geral, os plantios homogêneos apresentam tendência de maior produção de biomassa do tronco (BINKLEY et al., 2010), comportamento não observado no presente estudo. Isso se explica pela dinâmica de produção de biomassa das árvores suprimidas e dominantes (CAMPOE et al., 2013). De acordo com os autores, as 20% das árvores de maior produção de biomassa do povoamento chegam a ser responsáveis por 33% da produção de biomassa acima do solo, enquanto as 20% menores árvores são responsáveis por apenas 9% da produção (CAMPOE et al., 2013). Tais resultados demonstram a potencialidade do tratamento He, em termos de produção de biomassa do tronco, porém com necessidade de maiores avaliações uma vez que essa prática carece de estudos.

Trabalhos envolvendo a produção de biomassa de *P. taeda* no Sul do Brasil sob a prática da fertilização em idade avançada, não foram encontrados na literatura. Os valores de biomassa total do presente estudo estão dentro da faixa obtida para os sítios no Sul do Brasil que não realizam a fertilização (MUNHOZ, 2015). Ainda que o material genético utilizado seja de baixa produtividade, a perspectiva é de que utilização da fertilização possa aumentar os resultados produtivos dos materiais genéticos já adotados nos plantios comerciais. Contudo

a F modifica a dinâmica do desenvolvimento de *P. taeda*, por meio da alteração na alocação de carbono no tronco, reduzindo o tempo necessário para alcançar maior produção no componente de maior interesse para a produção florestal.

#### 4.3 ASPECTOS NUTRICIONAIS

De modo geral, entre todos os macronutrientes avaliados, os maiores teores foram obtidos nas acículas e os menores no lenho, independente do tratamento (Tabela 7). Os nutrientes avaliados apresentaram nas acículas a ordem decrescente de concentração N > K > Ca > Mg > P.

Tabela 7 - Concentração de nutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nas amostras de biomassa nos diferentes componentes da biomassa de *P. taeda* aos 11 anos

Trat	A	Ld	Lf	G	Cd	Cf	R
<b>N (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>							
<b>HeS</b>	14,74 Aa	1,51 C <sup>n.s.</sup>	1,58 C <sup>n.s.</sup>	3,82 B <sup>n.s.</sup>	3,22 Ba	3,57 B <sup>n.s.</sup>	3,26 B <sup>n.s.</sup>
<b>HoF</b>	13,16 Ab	1,64 DE	1,49 E	3,71 B	2,63 CD <sub>b</sub>	3,85 B	3,22 BC
<b>P (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>							
<b>HeS</b>	1,04 A <sup>n.s.</sup>	0,05 E <sup>n.s.</sup>	0,06 E <sup>n.s.</sup>	0,24 C <sup>n.s.</sup>	0,17 CD <sup>n.s.</sup>	0,34 B <sup>n.s.</sup>	0,13 DE <sup>n.s.</sup>
<b>HoF</b>	1,01 A	0,06 E	0,07 E	0,23 C	0,19 CD	0,31 B	0,13 DE
<b>K (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>							
<b>HeS</b>	2,31 A <sup>n.s.</sup>	0,37 C <sup>n.s.</sup>	0,47 BC <sup>n.s.</sup>	0,65 BC <sup>n.s.</sup>	0,49 BC <sup>n.s.</sup>	0,83 B <sup>n.s.</sup>	0,77 B <sup>n.s.</sup>
<b>HoF</b>	2,71 A	0,49 B	0,48 B	0,74 B	0,63 B	0,93 B	0,80 B
<b>Ca (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>							
<b>HeS</b>	1,45 A <sup>n.s.</sup>	0,43 C <sup>n.s.</sup>	0,47 C <sup>n.s.</sup>	1,53 A <sup>n.s.</sup>	0,94 B <sup>n.s.</sup>	0,90 Ba	0,50 C <sup>n.s.</sup>
<b>HoF</b>	1,83 A	0,73 C	0,49 C	1,45 AB	0,99 BC	0,71 C <sub>b</sub>	0,53 C
<b>Mg (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>							
<b>HeS</b>	0,99 Ab	0,26 D <sub>b</sub>	0,33 CD <sup>n.s.</sup>	0,72 B <sup>n.s.</sup>	0,47 C <sup>n.s.</sup>	0,69 B <sup>n.s.</sup>	0,50 C <sup>n.s.</sup>
<b>HoF</b>	1,24 Aa	0,33 Ca	0,36 C	0,84 B	0,50 C	0,75 B	0,47 C

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: HeS= Heterogêneo sem fertilização; HoF= Homogêneo com fertilização; A= Acícula; Ld= Lenho no DAP; Lf= Lenho no fuste; G= Galho; Cd= Casca no DAP; Cf= Casca no fuste; R= Raiz; Letras minúsculas na coluna (tratamentos) diferem entre si pelo teste t ( $p < 0,05$ ); <sup>n.s.</sup>= Médias na coluna (tratamentos) não diferem entre si pelo teste t ( $p < 0,05$ ); Letras maiúsculas diferem entre si na linha (componentes) pelo Teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os resultados dos valores das concentrações de nutrientes dos componentes lenho e casca, analisados nas posições no DAP e no fuste, definiram a escolha entre equações para

geração de estimativas de forma geral ou de forma separada. Por exemplo, quando houve diferença significativa nos teores do lenho na posição do DAP e do fuste, foram utilizadas equações separadas para cada uma dessas posições, no entanto quando não houve diferença significativa, adotou-se uma equação geral para estimativa do nutriente em todo o componente.

Através da determinação direta dos teores das amostras, verificam-se concentrações superiores no tratamento HeS para os componentes acículas e casca DAP (Tabela 7). Entre componentes, a casca no DAP também apresenta diferenciação com os teores de N da casca no fuste no tratamento HoF (Tabela 7), razão pela qual são geradas equações para estimativa dos teores de N separadamente para estes componentes (Tabela 8). Ao contrário do lenho que não apresentou diferença sendo adotada uma equação geral para sua estimativa. Já para os demais nutrientes, mesmo havendo a diferenciação entre tratamentos, não houve diferenciação entre componentes (Tabela 7), assim são geradas equações únicas para o lenho e a casca (Tabela 8).

Ao considerar a diferenciação dos teores ao longo do tronco, essas equações fornecem maior confiabilidade nas estimativas de estoque de nutrientes (WITSCHORECK; SCHUMACHER, 2019). De acordo com os autores, a ponderação dos teores com a proporção de biomassa torna melhor a estimativa do estoque de nutrientes, o que é de extrema importância pela representatividade dos componentes do tronco e na dimensão do impacto futuro gerado pela exportação nutricional através da colheita florestal. Essas equações para estimar o conteúdo de nutrientes nas árvores podem ser utilizadas no balanço de nutrientes, bem como em outras simulações como para o manejo de nutrientes em plantios de *Pinus taeda*. (BARROS FILHO et al., 2017).

As estimativas dos teores dos macronutrientes dos componentes demonstram que a uniformidade de plantio não apresentou diferença entre os níveis avaliados, com exceção dos teores de Ca nas acículas superiores em Ho (Tabela 9). Já no fator fertilização, os teores de N foram superiores no nível S para as acículas e casca DAP, enquanto os teores de P foram superiores em todos os componentes no nível S. Comportamento contrário foi obtido para os teores de K, Ca e Mg, que apresentaram os maiores teores no tratamento com fertilização.

Tabela 8 - Equações alométricas para estimar as concentrações de nutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ) dos diferentes componentes da biomassa de *P. taeda* aos 11 anos

Comp	Equação	n	R <sup>2</sup>	S <sub>yx</sub>
N ( $\text{g kg}^{-1}$ )				
A	$\ln(y) = -0,0034 h^2 + 0,4233 \ln(h^3)$	12	0,9995	0,07
L	$\ln(y) = 0,0737 \ln(h^3 d^{-1})$	24	0,8423	0,18
G	$\ln(y) = 0,1762 \ln(h^3 d^{-1}) + 5,6763 h^{-1}$	12	0,9965	0,09
Cd	$\ln(y) = 16,3889 h^{-1}$	12	0,9845	0,14
Cf	$\ln(y) = 0,1559 \ln(dh^2)$	12	0,9878	0,15
R	$\ln(y) = -0,4195 \ln(h^{-1})$	6	0,9799	0,18
P ( $\text{g kg}^{-1}$ )				
A	$(y) = 5,28556 h^{-1} + 0,12431 \ln(h^2)$	12	0,9958	0,07
C	$\ln(y) = -0,25867 \ln(h^2)$	24	0,9514	0,33
G	$\ln(y) = 0,13206 \ln(dh^3)^{-1}$	12	0,9855	0,19
L	$\ln(y) = 0,52152 \ln(1/d^{-1}h^3)$	24	0,9926	0,25
R	$\ln(y) = 0,38045 \ln(1/d^{-1}h^3)$	6	0,9953	0,15
K ( $\text{g kg}^{-1}$ )				
A	$(y) = 0,46369 \ln(d^{-1}h^3)$	12	0,9715	0,45
C	$(y) = 0,2699 \ln(d^{-1}h^2)$	24	0,9210	0,22
G	$(y) = 0,12787 \ln(d^{-1}h^3)$	12	0,9310	0,20
L	$(y) = 0,08376 \ln(d^{-1}h^3)$	24	0,9583	0,10
R	$(y) = 0,09295 \ln(dh^2)$	6	0,9954	0,06
Ca ( $\text{g kg}^{-1}$ )				
A	$(y) = -0,29048 \ln(d^2)^{-1}$	12	0,9457	0,41
C	$(y) = 0,91913 (d^{-1}h)$	24	0,9381	0,23
G	$(y) = -0,55556 \ln(1/d^{-1}h^2)$	12	0,9758	0,25
L	$\ln(y) = -11,12008 h^{-1}$	24	0,8463	0,31
R	$(y) = 0,09488 \ln(d^{-1}h^3)$	6	0,9463	0,13
Mg ( $\text{g kg}^{-1}$ )				
A	$(y) = -0,13407 \ln(dh^2)^{-1}$	12	0,9901	0,12
C	$(y) = 0,22565 \ln(d^{-1}h^2)$	24	0,9382	0,16
G	$(y) = -0,29261 \ln(1/d^{-1}h^2)$	12	0,9895	0,08
L	$\ln(y) = -17,76209 h^{-1}$	24	0,9884	0,13
R	$(y) = 0,08958 \ln(d^{-1}h^3)$	6	0,9807	0,07

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: Comp= Componente; A= Acícula; L= Lenho; G= Galho; Cd= Casca no DAP; Cf= Casca no fuste; R= Raiz; y= teor de nutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ); n= Número de árvores;  $R^2$ = Coeficiente de determinação;  $S_{yx}$ =Erro padrão da estimativa.

Tabela 9 - Concentração de nutrientes nos componentes de *P. taeda* aos 11 anos, nos tratamentos heterogêneo (He), homogêneo (Ho), sem fertilização (S) e com fertilização (F)

Trat.	A	L	G	C		R
				Cd	Cf	
<b>N (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>						
He	13,87 <sup>n.s.</sup>	1,49 <sup>n.s.</sup>	3,75 <sup>n.s.</sup>	3,14 <sup>n.s.</sup>	3,68 <sup>n.s.</sup>	3,17 <sup>n.s.</sup>
Ho	13,94	1,48	3,71	2,98	3,71	3,17
S	14,36 a	1,46 <sup>n.s.</sup>	3,72 <sup>n.s.</sup>	3,32 a	3,57 b	3,06 b
F	13,45 b	1,51	3,74	2,80 b	3,83 a	3,28 a
<b>P (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>						
He	1,03 <sup>n.s.</sup>	0,06 <sup>n.s.</sup>	0,23 <sup>n.s.</sup>		0,24 <sup>n.s.</sup>	0,13 <sup>n.s.</sup>
Ho	1,03	0,06	0,23		0,24	0,13
S	1,04 a	0,07 a	0,24 a		0,25 a	0,14 a
F	1,02 b	0,06 b	0,22 b		0,23 b	0,12 b
<b>K (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>						
He	2,49 <sup>n.s.</sup>	0,45 <sup>n.s.</sup>	0,69 <sup>n.s.</sup>		0,71 <sup>n.s.</sup>	0,77 <sup>n.s.</sup>
Ho	2,48	0,45	0,68		0,70	0,78
S	2,39 b	0,43 b	0,66 b		0,68 b	0,76 b
F	2,58 a	0,47 a	0,71 a		0,74 a	0,80 a
<b>Ca (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>						
He	1,66 b	0,49 <sup>n.s.</sup>	1,46 <sup>n.s.</sup>		0,84 <sup>n.s.</sup>	0,51 <sup>n.s.</sup>
Ho	1,68 a	0,49	1,44		0,80	0,51
S	1,64 b	0,46 b	1,39 b		0,80 b	0,49 b
F	1,70 a	0,52 a	1,52 a		0,84 a	0,53 a
<b>Mg (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>						
He	1,12 <sup>n.s.</sup>	0,32 <sup>n.s.</sup>	0,77 <sup>n.s.</sup>		1,81 <sup>n.s.</sup>	0,48 <sup>n.s.</sup>
Ho	1,12	0,32	0,76		1,80	0,48
S	1,09 b	0,29 b	0,73 b		1,76 b	0,46 b
F	1,15 a	0,35 a	0,80 a		1,85 a	0,50 a

Fonte:Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S= Sem fertilização; F= Com fertilizado; A= Acícula; L= Lenho; G= Galho; C= Casca; Cd= Casca no DAP; Cf= Casca no fuste; R= Raiz; <sup>n.s.</sup>= Médias não diferem entre si na coluna pelo teste Tukey ( $p<0,05$ ); Letras minúsculas diferem entre si na coluna pelo teste Tukey ( $p<0,05$ ).

Geralmente, espera-se que os teores de nutrientes sejam superiores nos tratamentos com fertilização (ALBAUGH et al., 2008). Porém, o maior teor de um determinado nutriente pode representar acúmulo, em função da insuficiência de outros nutrientes à produção de

biomassa, de forma que teores reduzidos estão associados a uma maior produção de massa seca (MORO et al., 2014; RANGEL-VASCONCELOS et al., 2016).

Em comparação aos teores obtidos no Sul do Brasil, os teores nutrientes nos componentes de casca e madeira obtidos no presente estudo foram próximos aos obtidos para biomassa de *P. taeda* aos 17 anos (WITSCHORECK; SCHUMACHER, 2019). Ainda, os teores dos demais componentes foram compatíveis aos obtidos na biomassa dos componentes da espécie aos 9 anos, com exceção dos teores da madeira (LONDERO et al., 2011) que apresentaram teores mais baixos no presente estudo.

No que se refere aos teores mais elevados de nutrientes nas acículas, este se deve a maior concentração de nutrientes nas estruturas mais jovens das plantas, onde há maior atividade metabólica (LONDERO et al., 2011). Ainda, os autores apresentam a mesma ordem de concentração de nutrientes nas acículas.

As práticas silviculturais podem acelerar o desenvolvimento das árvores e sua dinâmica nutricional. Assim, os teores variam de acordo com o ciclo das árvores, com os maiores teores das acículas em indivíduos jovens (BARROS FILHO et al., 2017; ALBAUGH et al., 2008) reduzindo os teores com a idade (VIERA; SCHUMACHER, 2009), e aumento dos teores para lenho e raízes grossas ao longo do tempo (ALBAUGH et al., 2008).

Essas modificações podem ser explicadas pela intensificação da ciclagem bioquímica, deslocando os nutrientes móveis para os tecidos jovens com maior atividade metabólica (PALLARDY, 2008). Tal explicação pode ser verificada ao observarmos os teores de N da casca, onde a casca DAP no tratamento F apresentou teores inferiores em relação ao S, porém comportamento inverso ocorreu no componente casca no fuste. Esse resultado se confirma já que os teores da casca são variáveis ao longo do fuste, uma vez que a proporção de cerne é decrescente no sentido da base ao ápice (WITSCHORECK; SCHUMACHER, 2019).

Comumente não são obtidas diferenças nos teores de nutrientes, sendo possível a identificação de diferenças entre práticas silviculturais através da quantificação de biomassa e estoque de nutrientes (RANGEL-VASCONCELOS et al., 2016). Assim, os resultados dos teores trazem informações relevantes sobre o desempenho nutricional da espécie quando submetido à fertilização, ao passo que a uniformidade de plantio não demonstrou diferenças estatísticas nos teores dos nutrientes.

Os maiores estoques totais de N, P, K, Ca e Mg foram obtidos nos tratamentos Ho, repetindo o mesmo comportamento no tratamento F, com exceção do P que não apresentou

diferença no fator fertilização (Tabela 10). O estoque de nutrientes na biomassa total seguiu a sequência decrescente  $N > Ca > K > Mg > P$ .

Tabela 10 – Quantidade de nutrientes ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) nos componentes das árvores de *P. taeda* aos 11 anos, nos tratamentos heterogêneo (He), homogêneo (Ho), sem fertilização (S) e com fertilização (F)

Trat.	A	L	Gv	Gm	C		R	Bt
					Cd	Cf		
<b>N (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>								
He	116,86 b	147,56 <sup>n.s.</sup>	82,65 b	39,19 b	31,55 b	10,93 <sup>n.s.</sup>	123,03 b	551,76 b
Ho	135,13 a	158,56	95,22 a	43,23 a	35,81 a	11,72	134,19 a	613,87 a
S	134,51 a	118,14 b	88,83 <sup>n.s.</sup>	35,57 b	35,97 a	8,61 b	106,89 b	528,52 b
F	117,48 b	187,98 a	89,03	46,85 a	31,39 b	14,05 a	150,33 a	637,11 a
<b>P (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>								
He	8,6 b	5,84 b	5,03 b	2,38 b	3,37 b		4,85 b	30,06 b
Ho	9,89 a	6,42 a	5,86 a	2,64 a	3,76 a		5,41 a	33,98 a
S	9,58 <sup>n.s.</sup>	5,40 b	5,68 <sup>n.s.</sup>	2,27 b	3,53 <sup>n.s.</sup>		4,79 b	31,25 <sup>n.s.</sup>
F	8,91	6,85 a	5,22	2,75 a	3,60		5,46 a	32,80
<b>K (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>								
He	21,04 b	45,01 <sup>n.s.</sup>	15,53 b	7,38 b	10,04 b		30,28 b	129,28 b
Ho	23,91 a	48,17	17,76 a	8,10 a	10,99 a		33,12 a	142,06 a
S	22,31 <sup>n.s.</sup>	35,02 b	16,13 <sup>n.s.</sup>	6,45 b	9,53 b		26,63 b	116,08 b
F	22,64	58,15 a	17,16	9,03 a	11,51 a		36,77 a	155,25 a
<b>Ca (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>								
He	14,56 b	50,37 <sup>n.s.</sup>	32,48 b	15,52 b	11,09 b		19,54 b	143,54 b
Ho	16,72 a	53,89	36,98 a	16,97 a	12,05 a		21,26 a	157,88 a
S	15,86 <sup>n.s.</sup>	38,25 b	33,34 <sup>n.s.</sup>	13,41 b	10,57 b		16,89 b	128,34 b
F	15,41	66,01 a	36,12	19,07 a	12,57 a		23,9 a	173,08 a
<b>Mg (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>								
He	9,65 b	33,75 <sup>n.s.</sup>	17,11 b	8,17 b	25,68 b		18,45 b	112,81 b
Ho	11,04 a	35,97	19,48 a	8,94 a	28,23 a		20,07 a	123,72 a
S	10,40 <sup>n.s.</sup>	24,55 b	17,56 <sup>n.s.</sup>	7,06 b	24,89 b		15,95 b	100,42 b
F	10,29	45,16 a	19,02	10,05 a	29,02 a		22,56 a	136,11 a

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S= Sem fertilização; F= Com fertilização; A= Acícula; L= Lenho; Gv= Galho vivo; Gm= Galho morto; C= Casca; Cd= Casca no DAP; Cf= Casca no fuste; R= Raiz; Bt= Biomassa total; <sup>n.s.</sup>= Médias na coluna (tratamentos) não diferem entre si pelo teste t ( $p < 0,05$ ); Letras minúsculas diferentes na coluna entre níveis do fator diferem entre si pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

Comparando o estoque de nutrientes no tronco nos tratamentos Ho e F em relação aos níveis He e S, nos seus respectivos fatores, promoveram um aumento de 8,44% e 43,44% do

estoque de N, 10,53% e 17,02% do estoque de P, 7,47% e 56,36% do estoque de K, 7,29% e 61,57% do estoque de Ca, e 7,70% e 50,04% do estoque de Mg. Demonstrando a capacidade desses tratamentos, Ho e F, em propiciar aumento percentual no estoque de nutrientes no tronco.

Os macronutrientes N, P, Ca e Mg possuem estoques superiores na copa (acículas + galhos), proporcionalmente, com exceção do K, no qual o maior estoque é encontrado no tronco. No fator uniformidade, a quantidade dos nutrientes na copa apresentou um aumento razoável de He para Ho em todos os nutrientes, em média 2,68%. Porém, o estoque de nutrientes da copa no tratamento S para F apresentou uma redução média de 19,07%. Destacando nesse sentido a redução proporcional dos nutrientes estocados na copa quando as árvores foram fertilizadas. De forma geral, as maiores quantidades de N, K, Ca e Mg foram observadas no lenho, enquanto que a maior quantidade de P foi encontrada nas acículas.

Avaliando efeito da fertilização em *P. taeda* no estoque de N ao longo de 21 anos, os resultados foram superiores durante todo ciclo, atingindo o dobro do estoque em relação ao controle ao final do ciclo, com um estoque de 200 kg ha<sup>-1</sup> aos 11 anos (ALBAUGH et al., 2008). Aos 13 anos o estoque de N em *P. taeda* alcançou aproximadamente 380 kg ha<sup>-1</sup> e estoque de P de 290 kg ha<sup>-1</sup>, quando submetido a fertilização (WILL et al., 2006).

Sem adotar a fertilização, um povoamento de *P. taeda* aos 16 anos, alcançou estoques totais na ordem de 1172 kg ha<sup>-1</sup> de N, 68 kg ha<sup>-1</sup> de P, 205 kg ha<sup>-1</sup> de K, 324 kg ha<sup>-1</sup> de Ca e 90 kg ha<sup>-1</sup> de Mg, com mesma ordem decrescente de estoque totais de nutrientes do presente trabalho (SIXEL et al., 2015). Aos 27 anos, os estoques podem alcançar 512 kg ha<sup>-1</sup>, 44 kg ha<sup>-1</sup>, 174 kg ha<sup>-1</sup>, 311 kg ha<sup>-1</sup> e 103,8 kg ha<sup>-1</sup> de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente (SCHUMACHER et al., 2013).

Dentre os nutrientes, o N é o que apresenta maior estoque em plantios de *P. taeda*, sendo que o lenho representa o maior estoque desse elemento em função da sua produtividade em biomassa (ALBAUGH et al., 2008; LONDERO et al., 2011; SCHUMACHER et al., 2013). O estoque de N chega a representar entorno de 33% da biomassa do tronco, além de altos estoques desse elemento nas raízes (SIXEL et al., 2015). Porém o destaque para copa se deve as acículas, que mesmo apresentando menores quantidades de biomassa, alcançam altos valores (SCHUMACHER et al., 2013), principalmente de N (ADEGBIDI; JOKELA; COMERFORD, 2005).

Em relação aos valores de CUB, apenas no fator fertilização foram obtidas diferenças significativas (Tabela 11). Os valores de CUB para K, Ca e Mg foram superiores onde não

ocorreu a fertilização, já o CUB para P foi superior onde essa prática foi realizada, comportamento contrário em relação aos demais nutrientes. Considerando os componentes da biomassa, os maiores valores de CUB foram obtidos no lenho, enquanto que as acículas apresentaram os menores valores, com exceção do Mg onde os menores valores de CUB foram encontrados na casca.

Os valores de CUB representam a eficiência de conversão de nutrientes em biomassa. Assim baixos teores por unidade de biomassa elevam os valores de CUB, o que torna o lenho componente com maior eficiência de utilização biológica (SCHUMACHER et al., 2013). Nota-se que o tratamento F apresenta maior eficiência para a conversão de N em biomassa de acículas, mas menor eficiência para a produção de lenho e raízes em comparação ao tratamento S. Já o P tem maior eficiência na conversão em biomassa com a realização da F, enquanto K, Ca e Mg no tratamento S.

O aumento da eficiência da utilização de nutrientes refere-se à intensificação da ciclagem biogeoquímica com o crescimento e desenvolvimento do plantio (BARROS FILHO et al., 2017), além disso, condições limitadas de determinado nutriente auxiliam na alta eficiência no uso desse nutriente (SCHEER; GATTI; WISNIEWSKI., 2011). Demonstrando assim a limitação do plantio em termos de P e N para produção de acículas. Os resultados de CUB para os demais nutrientes tornam necessária a avaliação do ajuste das quantidades de fertilização.

Apesar dos altos estoques de N, P, K, Ca e Mg nos tratamentos Ho e F, esses também apresentaram as maiores quantidades desses nutrientes exportados independentes do cenário de exportação de nutrientes (Tabela 12). Os nutrientes mais exportados são também aqueles com maior estoque na biomassa.

Tabela 11 - Coeficiente de utilização biológica (CUB) de nutrientes em *P. taeda* aos 11 anos, nos tratamentos heterogêneo (He), homogêneo (Ho), sem fertilização (S) e com fertilização (F)

Trat.	A	L	Gv	Gm	C		R
					Cd	Cf	
<b>N</b>							
He	72,31 <sup>n.s.</sup>	671,93 <sup>n.s.</sup>	273,03 <sup>n.s.</sup>	272,00 <sup>n.s.</sup>	361,35 <sup>n.s.</sup>	265,55 <sup>n.s.</sup>	311,34 <sup>n.s.</sup>
Ho	72,14	676,55	274,48	273,51	358,46	265,18	311,5
S	69,5 b	684,91 a	275,98 a	274,71 a	331,60 b	276,18 a	323,22 a
F	74,94 a	663,57 b	271,53 b	270,80 b	388,21 a	254,55 b	299,62 b
<b>P</b>							
He	980,06 <sup>n.s.</sup>	16728,42 <sup>n.s.</sup>	4484,30 <sup>n.s.</sup>	4463,38 <sup>n.s.</sup>	3369,56 <sup>n.s.</sup>		7806,87 <sup>n.s.</sup>
Ho	981,32	16450,03	4475,26	4453,81	3380,87		7657,27
S	975,34 b	14964,3 b	4322,66 b	4296,4 b	3377,94 <sup>n.s.</sup>		7206,35 b
F	986,03 a	18214,15 a	4636,9 a	4620,78 a	3372,49		8257,79 a
<b>K</b>							
He	401,17 <sup>n.s.</sup>	2215,31 <sup>n.s.</sup>	1455,61 <sup>n.s.</sup>	1451,87 <sup>n.s.</sup>	1139,86 <sup>n.s.</sup>		1262,57 <sup>n.s.</sup>
Ho	405,39	2242,74	1471,94	1468,78	1166,25		1259,45
S	418,63 a	2312,16 a	1519,64 a	1515,38 a	1251,21 a		1297,04 a
F	387,94 b	2145,89 b	1407,91 b	1405,27 b	1054,91 b		1224,98 b
<b>Ca</b>							
He	579,50 <sup>n.s.</sup>	1991,88 <sup>n.s.</sup>	696,60 <sup>n.s.</sup>	691,86 <sup>n.s.</sup>	1030,47 <sup>n.s.</sup>		1961,32 <sup>n.s.</sup>
Ho	580,03	2018,94	707,18	702,52	1062,42		1967,94
S	589,14 a	2119,98 a	735,12 a	728,97 a	1127,09 a		2044,73 a
F	570,4 b	1890,84 b	668,66 b	665,41 b	965,80 b		1884,53 b
<b>Mg</b>							
He	873,88 <sup>n.s.</sup>	3007,24 <sup>n.s.</sup>	1322,60 <sup>n.s.</sup>	1313,59 <sup>n.s.</sup>	444,35 <sup>n.s.</sup>		2077,36 <sup>n.s.</sup>
Ho	878,08	3068,63	1342,68	1333,83	452,76		2084,37
S	898,19 a	3310,54 a	1395,73 a	1384,05 a	478,92 a		2165,71 a
F	853,77 b	2765,33 b	1269,54 b	1263,37 b	418,19 b		1996,02 b

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S= Sem fertilização; F= Com fertilização; A= Acícula; L= Lenho; Gv= Galho; Gm= Galho morto; Cd= Casca no DAP; Cf= Casca no fuste; R= Raiz; <sup>n.s.</sup>= Médias na coluna (tratamentos) não diferem entre si pelo teste t (p<0,05); Letras minúsculas diferentes na coluna entre níveis do fator diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05).

Tabela 12 - Cenários de exportação de nutrientes ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) nos tratamentos heterogêneo (He), homogêneo (Ho), sem fertilização (S) e com fertilização (F)

Tratamento	Tronco <sup>1</sup>		Copa <sup>2</sup> + Tronco		Árvore Inteira <sup>3</sup>	
<b>N (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>						
He	190,04	(34,44)*	428,73	(77,70)	551,76	(100)
Ho	206,10	(33,57)	479,68	(78,14)	613,87	(100)
S	162,72	(30,79)	421,63	(79,78)	528,52	(100)
F	233,42	(36,64)	486,78	(76,40)	637,11	(100)
<b>P (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>						
He	9,20	(30,61)	25,22	(83,88)	30,06	(100)
Ho	10,18	(29,95)	28,57	(84,09)	33,98	(100)
S	8,93	(28,57)	26,46	(84,67)	31,25	(100)
F	10,45	(31,87)	27,33	(83,34)	32,80	(100)
<b>K (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>						
He	55,05	(42,58)	99,00	(76,58)	129,28	(100)
Ho	59,16	(41,65)	108,93	(76,68)	142,06	(100)
S	44,55	(38,38)	89,45	(77,06)	116,08	(100)
F	69,66	(44,87)	118,48	(76,32)	155,25	(100)
<b>Ca (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>						
He	61,46	(42,81)	124,01	(86,39)	143,54	(100)
Ho	65,95	(41,77)	136,62	(86,54)	157,88	(100)
S	48,83	(38,04)	111,44	(86,84)	128,34	(100)
F	78,58	(45,40)	149,18	(86,19)	173,08	(100)
<b>Mg (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>						
He	59,43	(52,68)	94,36	(83,65)	112,81	(100)
Ho	64,20	(51,89)	103,65	(83,78)	123,72	(100)
S	49,44	(49,23)	84,47	(84,12)	100,42	(100)
F	74,19	(54,50)	113,55	(83,42)	136,11	(100)

Fonte: Elaboração da autora.

Em que: He= Heterogêneo; Ho= Homogêneo; S= Sem fertilização; F= Com fertilização; <sup>1</sup>Tronco= Lenho + casca; <sup>2</sup>Copa= Acícula + galho vivo + galho morto; <sup>3</sup>Árvore inteira= Copa + tronco + raiz; Valores em parênteses em porcentagem.

A colheita apenas do tronco (casca + lenho) de *P. taeda* aos 16 anos seria responsável pela exportação de  $282 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $36 \text{ kg ha}^{-1}$  de P,  $101 \text{ kg ha}^{-1}$  de K,  $112 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca e  $36 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg (SIXEL et al., 2015). Aos 12 anos alcança exportações de  $188 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $19 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $57 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $74 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $22 \text{ kg ha}^{-1}$  para N, P, K, Ca e Mg (MORO et al., 2008).

O N, seguido pelo Ca, são os nutrientes com maiores quantidades exportadas pela colheita florestal (SIXEL et al., 2015). Somente a colheita do lenho do tronco já representa um impacto em relação à exportação de N, podendo em função do sistema de colheita, com exportação da copa, dobrar a exportação desse elemento do sistema (SCHUMACHER et al.,

2013). Ainda, o baixo estoque de P na biomassa em contrapartida com os valores exportados ressalta a necessidade de práticas que favoreçam o aumento de P no sistema, como adubação e simbiose fungos micorrízicos (SIXEL et al., 2015).

A adoção de determinado cenário de manejo modifica a sustentabilidade produtiva modificando o número de rotações, no qual o cenário de remoção da copa além de reduzir o número de rotações potenciais também comprometeria a sustentabilidade a curto prazo (SIXEL et al., 2015). Assim, um aumento na disponibilidade de recursos pode atrasar o tempo em que seria esperada uma redução produtiva, pela redução de recursos com as sucessivas rotações (ALBAUGH et al., 2004).

Mesmo que os tratamentos Ho e F apresentem os maiores valores exportados na colheita florestal, a manutenção da biomassa da copa no sítio constitui importante reservatório de nutrientes a longo prazo. Os nutrientes da manutenção da copa proveriam nutrientes por muitas rotações (SIXEL et al., 2015) através da disponibilização de nutrientes ao sistema com a decomposição do resíduo da colheita florestal. As entradas de nutrientes, como por exemplo pela precipitação pluviométrica via úmida e seca, contribuem no balanço nutricional, porém não compensam a remoção de nutrientes pela exportação via colheita copa (SIXEL et al., 2015).

Contudo, é possível visualizar através dos dados, que quando realizada a colheita no cenário de remoção tronco+copa no tratamento S há maior remoção percentual de nutrientes, demonstrando o impacto nutricional dessa prática nos plantios que se mantêm sem fertilização, agravando o cenário de limitação nutricional.

## 5 CONCLUSÃO

Não houve interação entre as práticas silviculturais uniformidade de plantio e fertilização para as variáveis resposta avaliadas.

As práticas silviculturas, uniformidade de plantio e fertilização, afetaram o crescimento e produtividade volumétrica de *P. taeda* ao longo de 12 anos, nos quais a homogeneidade de plantio (Ho) e a fertilização (F) promoveram os maiores resultados.

Nos aspectos ecológicos, a produção de biomassa total aos 11 anos foi superior nas árvores nos níveis F e Ho, porém apenas no fator fertilização houve superioridade na produção de lenho do tronco.

Em relação à análise nutricional, o fator fertilização promoveu modificações nos teores de nutrientes e CUB. A fertilização aumentou os teores de K, Ca e Mg, mas reduziu os valores de CUB desses nutrientes independentes do componente.

Os maiores estoques e exportações nutricionais ocorreram nos tratamentos Ho e F, no qual o cenário de colheita apenas do tronco apresenta menor exportação nutricional.

No tratamento S, o cenário de exportação tronco+copa intensifica a remoção de nutrientes.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Ao considerar os resultados obtidos em relação aos aspectos ecológicos dos tratamentos avaliados, recomenda-se a fertilização como meio de reposição nutricional dos nutrientes exportados pela colheita e obtenção de maior produtividade. Ainda essa reposição deve considerar as quantidades de nutrientes que permanecem no sistema ao longo das rotações, para definição de doses mínimas de fertilizantes, assegurando a manutenção da qualidade produtiva e baixo investimento em insumos.

A fim de aperfeiçoar as práticas silviculturais no alcance de maior sustentabilidade nutricional dos plantios, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos relacionados ao balanço nutricional. Alguns desses estudos envolvem a quantificação das demais entradas e saídas de nutrientes do sistema, bem como dos estoques de nutrientes no solo e na serapilheira.

Como perspectiva futura ao desenvolvimento do tema são necessários estudos envolvendo a redução das doses de fertilizantes, bem como fontes de alternativas de nutrientes de menor custo e práticas silviculturais que melhorem a fertilidade dos sítios. Contudo esses estudos devem estar aliados ao conhecimento da ciclagem de nutrientes, mecanismo fundamental na compreensão da produtividade do gênero *Pinus*, para que assim ocorra o desenvolvimento da silvicultura para a espécie.

## REFERÊNCIAS

- ADEGBIDI, H. G.; JOKELA, E. J.; COMERFORD, N. B. Factors influencing production efficiency of intensively managed loblolly pine plantations in a 1- to 4- year-old chronosequence. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 218, p. 245-258, out. 2005. Disponível em: <<https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112705004858>>. Acesso: 27 out. 2019.
- ALBAUGH, T. J.; ALLEN, L.; FOX, T. R. Historical Patterns of Forest Fertilization in the Southeastern United States from 1969 to 2004. **Southern Journal of Applied Forestry**, Oxford, v. 31, n. 3, p. 129-137, aug. 2007. Disponível em: <<https://academic.oup.com/sjaf/article/31/3/129/4782395>>. Acesso em: 26 set. 2018.
- ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; FOX, T. R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree Physiology**, Oxford, v. 28, n. 7, p. 1083-1098, jul. 2008. Disponível em: <<https://academic.oup.com/treephys/article/28/7/1083/1674702>>. Acesso em 27 out 2019.
- ALBAUGH, T. J. et al. Leaf area and above and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, Oxford, v. 44, n. 2, p. 317-328, may 1998. Disponível em: <<https://academic.oup.com/forestscience/article/44/2/317/4627497>>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- ALBAUGH, T. J. et al. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.192, p. 3-19, apr. 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037811270400012X?via%3Dihub>>. Acesso em: 27 out. 2019.
- ALBAUGH, T. J. et al. Midrotation vegetation control and fertilization response in *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* across the Southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, Oxford, v. 36, n.1, p. 44-53, feb. 2012. Disponível em: <<https://academic.oup.com/sjaf/article/36/1/44/4774830>>. Acesso em: 26 set. 2018.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dec. 2013. Disponível em: <[https://schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen\\_s\\_climate\\_classification\\_map\\_for\\_Brazil](https://schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil)>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- ATANAZIO, K. A. et al. Fator de forma artificial para *Pinus taeda* L. em um povoamento localizado em Enéas Marques, PR. **Acta Biológica Catarinense**, Joinville, v. 5, n. 1, p. 65-71, jan./abr. 2018. Disponível em: <<http://periodicos.univille.br/index.php/ABC/article/view/424>>. Acesso em: 16 jun. 2019
- BARROS FILHO, N. F. et al. Tree growth and nutrient dynamics in pine plantations in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, p. 1-12, dez. 2017. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/handle/123456789/20872>>. Acesso em: 28 out. 2019.
- BATISTA, A. H. et al. Liming and fertilization in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 117-125, jan./mar. 2015. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1807-86212015000100117](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1807-86212015000100117)>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A. Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 53, p. 21-38, jul./dez. 2006. Disponível em: <[http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF/42056/1/BPF\\_53\\_p21-38.pdf](http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF/42056/1/BPF_53_p21-38.pdf)>. Acesso em: 29 jan. 2019.
- BINKLEY, D. et al. Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n.1, 1704-1713, apr. 2010. Disponível em: <<https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112709003910>>. Acesso em: 28 out. 2019.
- BOGNOLA, I. A. et al. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n. 61, p. 37-49, jan./abr. 2010. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/90>>. Acesso em: 29 jan. 2019.

- CAMPOE, O. C. et al. Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 43-48, jan. 2013. Disponível: <<https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112712002952>>. Acesso: 26 set. 2018.
- CARDOSO, D. J. et al. Influence of spacing regimes on the development of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, n. 1, p. 761-769, dec. 2013. Disponível em: <<https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037811271300635X>>. Acesso em: 18 jun. 2018.
- CARLOS, L. et al. Crescimento e nutrição mineral de mudas de pequi sob efeito da omissão de nutrientes. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n.1, p. 13-21jan./mar. 2014. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-50982014000100013](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-50982014000100013)>. Acesso em: 8 mai. 2018.
- CARNEIRO, J. G. A.; BARROSO, D. G.; SOARES, L. M. S. Crescimento de mudas de raiz nua de *P. taeda* L., sob cinco espaçamentos no viveiro e seu desempenho no campo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 13, n. 3, p.305-310, jul./set. 2007. Disponível em: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/view/1377>>. Acesso em: 1 fev 2020.
- CASTELO, P. A. R. et al. Influência de diferentes sítios de crescimento sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 495-506, jul./set. 2008. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/12416>>. Acesso em: 29 jan. 2019.
- CHAVES, R. Q.; CORRÊA, G. F. Micronutrientes no sistema solo-*Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 6, p.769-778, nov./dez. 2003. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622003000600003](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622003000600003)>. Acesso em: 23 jun. 2018.
- CLARK, A.; BORDERS, B. E.; DANIELS, R. F. Impact of vegetation control and annual fertilization on properties of loblolly pine wood at age 12. **Forest Products Journal**, v. 5, n. 12, p. 90-96, dec. 2004. Disponível em: <<https://fs.usda.gov/treearch/pubs/7673>>. Acesso em: 5 dez. 2019.
- COLODETTE, J. L. et al. The brazilian wood biomass supply and utilization focusing on eucalypt. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, New York City, v. 25, n. 1, p. 1-8, dec. 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1186/s40538-014-0025-x>>. Acesso em: 3 mai. 2018.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11 ed. Porto alegre: SBCS, 2016. 376 p.
- COYLE, D. R.; AUBREY, D. P.; COLEMAN, M. D. Growth responses of narrow or broad site adapted tree species to a range of resource availability treatments after a full harvest rotation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 362, p. 107-119, feb. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112715006866>>. Acesso em: 28 out. 2019.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018. 356 p.
- FALLEIROS, R. M.; ZENNI, R. D.; ZILLER, S. R. Invasão e manejo de *Pinus taeda* em campos de altitude do parque estadual do pico Paraná, Paraná, Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 123-134, jan./mar. 2011. Disponível: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/21193>>. Acesso em: 29 nov. 2018.
- FAUSTINO, L. I. et al. Crecimiento inicial de *Pinus taeda* L. em suelo pedregoso de la provincia de Misiones, em respuesta a la fertilización con P y N. **Revista Forestal Yvirareta**, Misiones, v. 18, p. 52-57, dic. 2011. Disponível: <<http://yvyrareta.com.ar/index.php/ediciones-antiores/diciembre-2015-n22/item/109-creci-ini-pinus>>. Acesso em: 26 jan. 2020.
- FAUSTINO, L. I.; MORETTI, A. P.; GRACIANO, C. Fertilization with urea, ammonium and nitrate produce different effects on growth, hydraulica traits and drought tolerance in *Pinus taeda* seedlings. **Tree Physiology**, Oxford, v.35, n. 10, p. 1062-1074, oct. 2015. Disponível em: <<https://academic.oup.com/treephys/article/35/10/1062/2364590>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

FERNÁNDEZ, M. E. et al. Why do *Pinus* species have different growth dominance patterns than *Eucalyptus* species? A hypothesis based on differential physiological plasticity. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 261, p. 1061-1068, mar. 2011. Disponível em: <[sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112710007310?via%3Dihub](http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112710007310?via%3Dihub)>. Acesso: 7 fev. 2020.

FERREIRA, C. A. et al. **Nutrição de *Pinus* no Sul do Brasil**: Diagnóstico e Prioridades de Pesquisa. Colombo: Embrapa Florestas. 2001. 23 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 2., p. 109-112, mar./apr. 2014. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-70542014000200001&lng=en&nrm=iso](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542014000200001&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 28 mar. 2019.

FLORIANO, E. P. et al. Análise econômica da produção de *Pinus elliottii* na Serra do Sudeste, Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 393-406, out./dez. 2009. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/895>>. Acesso em: 9 mai. 2018.

FOX, T. R. et al. Long-Term Effects of Drainage, Bedding, and Fertilization on Growth of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) in the Coastal Plain of Virginia. **Southern Journal of Applied Forestry**, Oxford, v. 29, n. 4, p. 205-214, nov. 2005. Disponível em: <<https://academic.oup.com/sjaf/article/29/4/205/4782386>>. Acesso em: 26 set. 2018.

FURTADO, T. S. et al. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 577-582, 2012. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622012000300020&script=sci\\_abstract&lng=pt](http://scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622012000300020&script=sci_abstract&lng=pt)>. Acesso em: 3 fev. 2019.

GATIBONI, L. C. et al. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 7, p. 1-8, jun. 2017. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782017000700302](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782017000700302)>. Acesso em: 23 jun. 2018

GOMES, J. B. V. et al. Unidades de manejo para pinus: desenvolvimento e aplicação de metodologia em áreas de produção no oeste catarinense. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p.191-204, mar. 2016. Disponível em: <<https://ipef.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=19&Number=109>>. Acesso em: 29 jan. 2019.

HORST, T. Z. et al. Edaphic and topographic factors and their relationship with dendrometric variation of *Pinus taeda* L. in a high altitude subtropical climate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1-16, dec. 2018. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0100-06832018000100318&lng=en&nrm=iso](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0100-06832018000100318&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 28 jan. 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. IBÁ:Brasília, 2019. 80 p.

INOUE, M. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; LIMA, R. Influência do espaço vital de crescimento na altura e diâmetro de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 377-385, set. 2011. Disponível em: <<https://ipef.br/publicacoes/scientia/nr91/cap10.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

KOHLER, S. V. et al. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 545-554, jul./set. 2015. Disponível: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/35746>>. Acesso em: 19 jun. 2020.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 603-612, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v30n4/31681.pdf>>. Acesso em: 2 mai. 2018.

LONDERO, E. K. et al. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em área de segunda rotação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 487-497, jul./set. 2011. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1980-50982011000300487&lng=en&nrm=iso](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1980-50982011000300487&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 16 set. 2018.

LOPES, V. G. **Dinâmica nutricional em um povoamento de *Pinus taeda* L., Rio Grande do Sul, Brasil.** 2013. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MAEDA, S.; SILVA, H. D.; CARDOSO, C. Resposta de *Pinus taeda* à aplicação de cinza de biomassa vegetal em Cambissolo Húmico, em vaso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 56, p. 43-52, jan./jun. 2008. Disponível em: <[http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/44389/1/4\\_Maeda\\_etal.pdf](http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/44389/1/4_Maeda_etal.pdf)>. Acesso em: 2 mai. 2018.

MAINARDI, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Produção de *Pinus taeda* na região de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 39-52, jan./dez. 1996. Disponível: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50981996000100039&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50981996000100039&script=sci_arttext)>. Acesso em: 16 dez. 2019.

MIRANDA, R. O. V. et al. Modelagem da mortalidade em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.45, n. 115, p. 435-444, set. 2017. Disponível em: <<https://ipef.br/publicacoes/scientia/nr115/cap02.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2020.

MIYAZAWA, M. et al. Análises químicas de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. cap. 8, p.171-224.

MORO, L. et al. Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. baseada em volume estimado pelo sistema SISPINUS. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, jul./set. 2008. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/12412>>. Acesso em: 22 mai. 2018.

MORO, L. et al. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4 p. 1181-1189, jul./ago. 2014. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180231726014>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MUNHOZ, J. S. B. **Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no sul do Brasil.** 2015. 142p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MUNIZ, P. J. C.; BALDANZI, G.; NETTO, S. P. Ensaio de adubação em *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* no Sul do Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 5-13, 1975. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/index.php/floresta/article/view/5793>>. Acesso em: 27 jan. 2020.

NASCIMENTO, F. A. F. et al. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região Norte de Santa Catarina. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 2, p. 235-242, abr./jun. 2015. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-77602015000200235](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602015000200235)>. Acesso em: 16 jan. 2020.

PACHECO, J. M. et al. Efeito da densidade inicial no crescimento de *Pinus taeda* L. na região Centro Sul do Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 353-365, jun. 2015. Disponível em: <<https://ipef.br/publicacoes/scientia/nr106/cap11.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2020.

PALLARDY, S.G. **Physiology of woody plants**. 3.ed. San Diego: Elsevier, 2008. 454p.

PEZUTTI, R. V.; CALDATO, S. L. Sobrevivência e crescimento inicial de mudas de *Pinus taeda* L. com diferentes diâmetros do colo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 355-362, abr./jun. 2011. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1980-50982011000200355&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1980-50982011000200355&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 16 jan. 2020.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T. et al. Acúmulo de biomassa e nutrientes de duas leguminosas arbóreas introduzidas em sistema de pousio na Amazônia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 735-746, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/24197>>. Acesso em: 18 mai. 2019.

REISSMANN, C. B.; WISNEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. cap. 5, p. 135-166.

- RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 701-709, 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622005000500005&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622005000500005&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em: 29 jan. 2019
- RODRIGUEZ, D. R. O. et al. Effect of pulp and paper Mill sludge on the development of 17-years-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 422, p. 179-189, aug. 2018. Disponível em: <<https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112718300951>>. Acesso em: 20 jun. 2018.
- SAMUELSON, L. J. et al. Growth and physiology of loblolly pine in response to long-term resource management: defining growth potential in southern United States. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 4, apr. 2008. Disponível em: <<https://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/X07-191?journalCode=cjfr#.XkMX009KjIU>>. Acesso em : 24 jan. 2020.
- SANQUETTA, C. R. et al. Dinâmica em superfície, volume, biomassa e carbon nas florestas plantadas brasileiras: 1990-2016. **Biofix**, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 152-160, 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/biofix/article/view/58384>>. Acesso em: 22 mai. 2018.
- SANQUETTA, C. R. et al. Produção de madeira para celulose em povoamentos de *Pinus taeda* submetidos a diferentes densidades de plantio e regimes de desbaste: abordagem experimental. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 154-166, jul./dez. 2004. Disponível em: <<https://redalyc.org/pdf/744/74410202.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2020.
- SAS. **University edition**. Disponível em: <[https://sas.com/en\\_us/software/university-edition/download-software.html](https://sas.com/en_us/software/university-edition/download-software.html)>. Acesso em: 20 mar. 2019.
- SCHEER, M. B; GATTI, G.; WISNIEWSKI, C. Nutrient fluxes in litterfall of a secondary successional alluvial rain forest in Southern Brazil. **Revista Biologia Tropical**, San José, v. 59, n. 4, 1869-1882, dec. 2011. Disponível em: <<https://ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22208099>>. Acesso em: 28 mar. 2019.
- SCHNEIDER, P. R. Crescimento em diâmetro do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em áreas arenizadas e degradadas no Oeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 44, n. 9, p. 1561-1567, set. 2014. Disponível: <[http://scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782014000901561&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782014000901561&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- SCHNEIDER, T. **Crescimento e teores de B, Cu, Mn, Fe e Zn em *Pinus taeda* L., como resultado da adubação e calagem sob a técnica da omissão de nutrientes**. 2011. 50 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- SCHUMACHER, M. V. et al. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* l. de 27 anos de idade em Cambará do Sul – RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n.2, p. 321-332, abr./jun. 2013. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/9278>>. Acesso em: 24 jun. 2018.
- SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em área de segunda rotação com floresta de *Pinus taeda* L. no município de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.18, n. 4, p. 471-480, out./dez. 2008. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/431>>. Acesso em: 21 mai. 2018.
- SHIKOWSKI, A. B.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R. Modelagem do crescimento e de biomassa individual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 75, p. 269-278, jul./set. 2013. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/503/326>>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- SIXEL, R. M. M. et al. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* Based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1416-1427, set./out. 2015. Disponível em: <[http://scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832015000501416](http://scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832015000501416)>. Acesso em: 16 set. 2019.
- STAPE, J. L.; ROCHA, J. C.; DONATTI, Z. A. **Indicadores de qualidade silvicultural na Aracruz: 2000 a 2005: relatório técnico**. Piracicaba: IPEF, 2006. 25 p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174p.

VALENTE, M. L. et al. Quantificação de nutrientes na precipitação em um plantio de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii*, Eldorado do Sul, RS. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 249-259, mar. 2016. Disponível em: <<https://ipef.br/publicacoes/scientia/nr109/cap24.pdf>>. Acesso em: 2 mai. 2018.

VASQUES, A. G. et al. Uma síntese da contribuição do gênero *Pinus* para o desenvolvimento sustentável no Sul do Brasil. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 445-450, 2007. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/9941>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 371-379, 2011. Disponível em: <<http://scielo.br/pdf/rarv/v35n3/a01v35n3>>. Acesso em: 28 out. 2019.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.19, n. 4, p. 375-382, out./dez. 2009. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/893>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 85-94, 2010. Disponível em: <<http://scielo.br/pdf/rarv/v34n1/v34n1a10>>. Acesso em: 9 mai. 2018.

VOGEL, H. L. M. et al. Crescimento inicial de *Pinus taeda* L. relacionado a doses de N, P e K. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 199-206, abr./jun. 2005. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/1837>>. Acesso: 2 mai. 2018.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; NEVES, J. C. L. Avaliação nutricional e índices DRIS em um povoamento de *Pinus taeda* L. submetido à adubação NPK. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 3, p. 59-70, set./dez. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/enflo/article/view/34942>>. Acesso em: 14 dez. 2018.

WILL, R. E. et al. Nitrogen and phosphorus dynamics for 13-year-old loblolly pine stands receiving complete competition control and annual N fertilizer. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 227, n. 1-2, p. 155-168, may. 2006. Disponível em: <<https://sciedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112706001204>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V. Alocação de nutrientes ao longo do tronco em *Pinus taeda* L. aos 17 anos de idade. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p.50-62, jan./mar. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/5212>>. Acesso em: 16 set. 2019.