

**LARISSA REGINA TOPANOTTI**

**PRODUÇÃO FLORESTAL EM PLANTIO DE *Cupressus lusitanica* Mill. SOB  
COBERTURA DE *Pinus taeda* L. NO PLANALTO CATARINENSE**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Dr. Marcos Felipe Nicoletti  
Coorientador: Dr. Mário Dobner Jr.

**LAGES, SC  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Topanotti, Larissa Regina

Produção Florestal em Plantio de *Cupressus lusitanica* Mill. sob  
Cobertura de *Pinus taeda* L. no Planalto Catarinense / Larissa Regina  
Topanotti. -- 2020.  
139 p.

Orientador: Marcos Felipe Nicoletti

Coorientador: Mário Dobner Jr.

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2020.

1. Sistema sob Cobertura. 2. Manejo Florestal. 3. Análise de  
tronco completa. 4. Afilamento. 5. Avaliação econômica de projetos  
florestais. I. Nicoletti, Marcos Felipe. II. Dobner Jr., Mário. III.  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Florestal. IV. Título.

**LARISSA REGINA TOPANOTTI**

**PRODUÇÃO FLORESTAL EM PLANTIO DE *Cupressus lusitanica* Mill. SOB  
COBERTURA DE *Pinus taeda* L. NO PLANALTO CATARINENSE**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

**Banca Examinadora:**

Orientador:



Prof. Dr. Marcos Felipe Nicoletti  
(UDESC/Lages-SC)

Membro:



Profa. Dra. Poliana D'Angelo Rios  
(UDESC/Lages-SC)

Membro:



Prof. Dr. Samuel de Pádua Chaves e Carvalho  
(UFMT/Cuiabá-MT)

Suplente:

Prof. Dr. Mário Dobner Jr.  
(UFSC/Curitibanos-SC)

Lages, 27 de Fevereiro de 2020



Aos meus pais, Lenoir e Noemi, meus  
irmãos, Lillian e Marcos, e à minha nona  
Salute, dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Noemi e Lenoir, por todo o incentivo, apoio, dedicação e amor. Sou muito feliz e grata por ter vocês como pais. Aos meus irmãos, Lillian e Marcos, por toda a parceria e cumplicidade e pela ajuda com a revisão das referências (muito obrigada mesmo Lilli!). À minha nona Salute, por todo o carinho, cuidado e pela preocupação de sempre. Vocês são minha saudade diária. Amo vocês!

Ao meu orientador, Professor Marcos Felipe Nicoletti, pela confiança, parceria, incentivo, amizade e conselhos em diversos momentos. Não tenho palavras para agradecer por tudo durante essa jornada e pela amizade que construímos. Obrigada também por me motivar a descobrir as maravilhas do R. Você é o melhor orientador que alguém poderia sonhar em ter!

Ao meu coorientador, Professor Mário Dobner Jr., também pela confiança, amizade e pelo trabalho em parceria que desenvolvemos, tanto nesse projeto, quanto em todos os outros. Obrigada pelas inúmeras sugestões e contribuições ao longo desse trabalho, e por compartilhar seu conhecimento comigo.

Ao professor Mário Tommasiello Filho e toda a equipe do Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios-x em Madeira, especialmente o Pedro e o Aparecido, por todo o suporte e auxílio nas análises de densidade da madeira.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, professores Thiago Floriani Stepka, Polliana D'Ângelo Rios e Samuel de Pádua Chaves e Carvalho pelas contribuições e considerações ao trabalho. Obrigada! Um obrigada também aos demais professores e servidores do CAV, à UDESC e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal (PPGEF).

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela concessão de horário especial para cursar o Mestrado. A todos os meus colegas do Setor Agropecuário, pelo apoio, compreensão e parceria. Vocês tornam a rotina mais divertida e leve!

À empresa Florestal Gateados Ltda., pelo trabalho e apoio nas coletas a campo, em especial ao tio Deja que nos ajudou com o corte dos discos. Muito obrigada ao Douglas, José Niles, Bernardo, Geórgia e Enio, pela ajuda a campo e para lixar os discos.

Um agradecimento especial a todos os amigos e colegas que conheci e reencontrei durante essa fase. Em especial ao João, Gabriela, Raíssa, Dani, Patrick, Felipe, Camila e Lucas, aos meus amigos de Curitiba, Dois Vizinhos e de tantos outros lugares. Obrigada por estarem ao meu lado em todos os momentos, e por tornar a vida mais divertida e feliz!

Agradeço a todos que de forma direta ou indireta me apoiaram nesta jornada. Muito obrigada!

## RESUMO

Um plantio sob cobertura é caracterizado pelo estabelecimento de uma floresta jovem sob um estrato arbóreo adulto pré-existente, o que permite obter multiprodutos em épocas distintas. Nesse trabalho, objetivou-se avaliar o crescimento, densidade da madeira e rentabilidade econômica de um plantio de *Cupressus lusitanica* Mill. sob a cobertura de *Pinus taeda* L. O trabalho foi dividido em três capítulos, onde o primeiro abordou a descrição dendrométrica de *P. taeda* e *C. lusitanica*, a eficiência do uso do solo pelo sistema e a correlação entre variáveis de *C. lusitanica* e a distância das árvores de cobertura. Foi realizado inventário florestal em um plantio de *C. lusitanica* (13 anos) sob cobertura de *P. taeda* (36 anos). As espécies somaram 36,5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> em área basal e 11.135,8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> em área de copa por hectare, sugerindo um uso eficiente do espaço produtivo pelo sistema devido à sobreposição de copas. A correlação entre as variáveis de *C. lusitanica* e a distância de *P. taeda* foi estatisticamente significativa apenas para o diâmetro, apontando um efeito da cobertura de *P. taeda* nessa variável. O segundo capítulo tratou da análise do crescimento de *P. taeda* e *C. lusitanica* e da densidade dos anéis de crescimento de *P. taeda*. Foi feita análise de tronco completa em *P. taeda* e obtidas amostras para densitometria de raios-X. Para avaliação do crescimento de *C. lusitanica*, foram utilizados os dados do inventário feito aos 13 anos de idade. A espécie *C. lusitanica* teve um crescimento mais lento que *P. taeda*, como esperado devido às características da espécie. Os anéis de crescimento de *P. taeda* tiveram uma espessura média entre 0,4 e 1,7 cm, e a densidade dos anéis da espécie foi alta próximo à medula, mas também houve um aumento com a idade. Como efeito da colheita parcial, houve um aumento na espessura e densidade médias dos anéis nos anos subsequentes, com pouco tempo de duração para a densidade da madeira. A colheita parcial também gerou perfis de densidade e espessura dos anéis de crescimento desuniformes. No terceiro capítulo, foram ajustados modelos de afilamento para *P. taeda* aos 23 e 36 anos e *C. lusitanica*, para quantificar os sortimentos e subsidiar a avaliação econômica. Três cenários foram comparados através do Valor Presente Líquido infinito. As equações mostraram um ajuste satisfatório, onde o polinômio de 5º grau foi utilizado para descrever o afilamento de *P. taeda* aos 36 anos e *C. lusitanica*, e o modelo de Kozak 1988 para *P. taeda* aos 23 anos. A manutenção das árvores de *P. taeda* por mais 13 anos resultou em toras de maior diâmetro e mais valiosas. Os incrementos médios de *C. lusitanica* indicam que é pouco provável que esse componente produza madeira suficiente para ser equiparada ao retorno financeiro do corte raso de *P. taeda* aos 23 anos. Todavia, haja vista os ótimos resultados obtidos no estrato superior, há potencial econômico no sistema sob cobertura, já que permitiu obter uma floresta no estrato inferior enquanto as árvores do estrato superior valorizaram conforme apresentado.

**Palavras-chave:** Sistema sob Cobertura. Manejo florestal. Análise de tronco completa. Afilamento. Avaliação econômica de projetos florestais.

## ABSTRACT

An underplanting is characterized by the establishment of a young forest under an existing mature tree stratum, which allows to obtain multiproducts at different times. With this master thesis, the objective was to evaluate the growth, wood density and profitability of *Cupressus lusitanica* Mill. planted under the cover of *Pinus taeda* L. The thesis was divided into three chapters, where the first addressed the dendrometric description of *P. taeda* and *C. lusitanica*, the efficiency of land use by the system and the correlation among variables of *C. lusitanica* and the distance from cover trees. A forest inventory was carried out in a plantation of *C. lusitanica* (13 years old) under the cover of *P. taeda* (36 years old). The species summed up a basal area of 36.5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> and 11,135.8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> in the crown projection area, suggesting an efficient use of the productive space by the system due to crown overlapping. The correlation values between *C. lusitanica* variables and distance from *P. taeda* was statistically significant only for the diameter, suggesting a cover effect on this variable. The second chapter dealt with the analysis of *P. taeda* and *C. lusitanica* growth and the growth rings density of *P. taeda*. Complete stem analysis was performed in *P. taeda*, and samples for X-ray densitometry were obtained. To evaluate the growth of *C. lusitanica*, the inventory data was used. The species *C. lusitanica* showed a slower growth than *P. taeda*, as expected due to species' characteristics. The growth rings of *P. taeda* had a width oscillating between 0.4 and 1.7 cm, and their density was high close to the pith, but also increased with age. As an effect of partial harvesting, there was an increase in the ring's width and in the mean density right after the intervention, however for this variable the effect lasted for a short time. The partial harvest also generated uneven wood density and width rings profiles. In the third chapter, tapering models were fitted for 23-y and 36-y *P. taeda* and *C. lusitanica*, to quantify the assortments and subsidize the economic evaluation. Three scenarios were compared using the infinite Net Present Value. The equations showed a satisfactory fit, where the 5<sup>th</sup> degree polynomial was used to describe the tapering of 36-y *P. taeda* and *C. lusitanica*, and the Kozak 1988 model for 23-y *P. taeda*. The maintenance of *P. taeda* trees in the stand resulted in larger and more valuable logs. The mean annual increments of *C. lusitanica* indicate that it is unlikely that this component will produce enough wood to be equated with the financial return of the clear cut of 23-y *P. taeda*. However, in view of the excellent results obtained in the upper stratum, there is economic potential in the underplanting system since it allowed obtaining a forest in the lower stratum while the trees of the upper stratum have valued as presented.

**Keywords:** Shelterwood. Forest management. Complete stem analysis. Tapering. Economic evaluation of forestry projects.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Localização da área de estudo e das unidades amostrais instaladas. A) Área de estudo e unidades amostrais; B) Brasil; C) Santa Catarina.....  | 42 |
| Figura 2 – Ilustração dos dois estratos formados por <i>Cupressus lusitanica</i> (estrato inferior) e <i>Pinus taeda</i> (estrato superior).....   | 43 |
| Figura 3 – Croqui ilustrando uma das parcelas mensuradas durante o inventário conduzido no plantio sob cobertura. ....   | 44 |
| Figura 4 – A) Distribuição diamétrica de <i>Cupressus lusitanica</i> e B) <i>Pinus taeda</i> com base nos dados obtidos em inventário e das árvores cubadas. ....  | 45 |
| Figura 5 – Distribuição dos resíduos dos modelos testados para a estimativa do volume de <i>Pinus taeda</i> . ....   | 48 |
| Figura 6 – Distribuição dos resíduos dos modelos testados para a estimativa do volume de <i>Cupressus lusitanica</i> .....   | 49 |
| Figura 7 – Distribuição dos dados de <i>Cupressus lusitanica</i> e <i>Pinus taeda</i> em um plantio sob cobertura. ....  | 50 |
| Figura 8 – Ilustração das alturas médias e raio de projeção de copa de <i>Cupressus lusitanica</i> e <i>Pinus taeda</i> em um plantio sob cobertura. ....  | 51 |
| Figura 9 – Distribuição diamétrica para <i>Cupressus lusitanica</i> (A), <i>Pinus taeda</i> (B) e distribuição de altura para <i>Cupressus lusitanica</i> (C) e <i>Pinus taeda</i> (D) . ....  | 51 |
| Figura 10 – Distribuição das variáveis de <i>Cupressus lusitanica</i> ao longo do critério de 10 metros de distância de <i>Pinus taeda</i> . ....  | 53 |
| Figura 11 – Localização da área de estudo e das unidades amostrais instaladas. A) Área de estudo e unidades amostrais; B) Brasil; C) Santa Catarina. ....  | 62 |
| Figura 12 – Ilustração dos dois estratos formados por <i>Cupressus lusitanica</i> (estrato inferior) e <i>Pinus taeda</i> (estrato superior).....  | 63 |
| Figura 13 – Croqui ilustrando uma das parcelas mensuradas durante o inventário conduzido no plantio sob cobertura. ....  | 64 |
| Figura 14 – Distribuição diamétrica de <i>Pinus taeda</i> com base nos dados obtidos em inventário e das árvores com discos retirados para avaliação do crescimento e densidade. ....  | 65 |
| Figura 15 – Metodologia de preparo do material, obtenção de imagens raios-X e processamento das mesmas no software Windendro™. 15A) Corte central do disco transversal com medula; 15B) Marcação da amostra de 1 cm de espessura e 15C) Colagem da amostra em suporte de |    |

|  |     |
|--|-----|
| madeira; 15D) Corte da amostra com serra dupla; 15E) Obtenção das imagens de raios-X; 15F) Leitura das imagens de raio-X no software Windendro™.....     | 69  |
| Figura 16 – Espessura média do anel (cm) em diferentes posições no fuste das árvores.....  | 71  |
| Figura 17 – Incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA) em diâmetro em diferentes posições no fuste das árvores. ....                 | 72  |
| Figura 18 – Curva de produção (diâmetro acumulado) de <i>Pinus taeda</i> ao longo de 36 anos em diferentes posições no fuste. ....                       | 73  |
| Figura 19 – Curva de produção, incrementos médio e periódico anuais em altura (A) e volume (B) de <i>Pinus taeda</i> ao longo de 36 anos. ....           | 74  |
| Figura 20 – Perfil de densidade de uma amostra da medula até a casca.....  | 75  |
| Figura 21 – Densidade média dos anéis em diferentes posições no fuste de <i>Pinus taeda</i> .....  | 76  |
| Figura 22 – Densidade dos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento de <i>Pinus taeda</i> ..  | 78  |
| Figura 23 – Espessuras médias do lenho inicial e tardio dos anéis de crescimento de <i>Pinus taeda</i> . ....  | 79  |
| Figura 24 – Proporção do lenho inicial e tardio nos anéis de crescimento de <i>Pinus taeda</i> . ....  | 80  |
| Figura 25 – Localização da área de estudo e das unidades amostrais instaladas. A) Área de estudo e unidades amostrais; B) Brasil; C) Santa Catarina..... | 97  |
| Figura 26 – Ilustração dos dois estratos formados por <i>Cupressus lusitanica</i> (estrato inferior) e <i>Pinus taeda</i> (estrato superior). ....       | 98  |
| Figura 27 – Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para o afilamento de <i>Pinus taeda</i> aos 36 anos.....                                     | 105 |
| Figura 28 – Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para o afilamento de <i>Pinus taeda</i> aos 23 anos.....                                     | 106 |
| Figura 29 – Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para o afilamento de <i>Cupressus lusitanica</i> aos 13 anos. ....                           | 108 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 – Modelos avaliados para estimar o volume individual de <i>Pinus taeda</i> e <i>Cupressus lusitanica</i> em plantio sob cobertura localizado em Capão Alto, Santa Catarina.....  | 45  |
| Tabela 2 – Desempenho dos modelos volumétricos testados para a estimativa do volume individual de <i>Pinus taeda</i> e <i>Cupressus lusitanica</i> em plantio sob cobertura . ....  | 47  |
| Tabela 3 – Valores médios de diâmetro à altura do peito, altura, volume individual e área de copa para <i>Cupressus lusitanica</i> e <i>Pinus taeda</i> .....   | 50  |
| Tabela 4 – Densidade, área basal, área de copa, volume total, altura e diâmetros dominantes de <i>Cupressus lusitanica</i> e <i>Pinus taeda</i> . ....  | 52  |
| Tabela 5 – Valores de correlação para dap (cm), altura (m), volume individual (m <sup>3</sup> ) e área de projeção de copa (m <sup>2</sup> ) de <i>Cupressus lusitanica</i> em função da distância de <i>Pinus taeda</i> . .... | 53  |
| Tabela 6 – Variáveis dendrométricas de <i>Cupressus lusitanica</i> encontradas em outros estudos com plantios puros.....  | 54  |
| Tabela 7 – Altura padronizada de retirada dos discos transversais para análise do crescimento de <i>Pinus taeda</i> . ....  | 66  |
| Tabela 8 – Coeficientes de determinação obtidos para os modelos para estimar a altura e volume totais em diferentes idades para <i>Pinus taeda</i> .....  | 67  |
| Tabela 9 – Valores médios de diâmetro à altura do peito, altura, volume individual e área de copa para <i>Cupressus lusitanica</i> e <i>Pinus taeda</i> .....   | 70  |
| Tabela 10 – Valores de correlação entre espessura média do anel, do lenho inicial e do lenho tardio e proporções do lenho inicial e tardio com a densidade média do anel. ....  | 77  |
| Tabela 11 – Variáveis dendrométricas de <i>Cupressus lusitanica</i> encontrada em outros estudos com plantios puros.....  | 84  |
| Tabela 12 – Dados de altura e volume estimados para as idades de 7, 12, 16, 19, 30 e 36 anos para <i>Pinus taeda</i> . ....   | 85  |
| Tabela 13 – Modelos de afilamento ajustados para estimar o diâmetro ao longo do tronco de <i>Pinus taeda</i> , com os respectivos autores. ....   | 99  |
| Tabela 14 – Estatísticas utilizadas para avaliação do ajuste dos modelos de afilamento para <i>Pinus taeda</i> e <i>Cupressus lusitanica</i> . ....   | 100 |
| Tabela 15 – Sortimentos adotados pela empresa e suas respectivas medidas e destinação. ..   | 100 |
| Tabela 16 – Custos e ano de ocorrência para o estabelecimento e condução de povoamentos de <i>Pinus taeda</i> e <i>Cupressus lusitanica</i> para os diferentes regimes de manejo .....  | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 17 – Valores obtidos nos parâmetros de qualidade pelos modelos ajustados para os dados de 36 anos de <i>P. taeda</i> . .....                        | 105 |
| Tabela 18 – Desempenho nos critérios de qualidade dos modelos ajustados para o afilamento de <i>Pinus taeda</i> aos 23 anos. ....                          | 106 |
| Tabela 19 – Coeficientes dos modelos ajustados para descrever o afilamento de <i>Pinus taeda</i> aos 23 e 36 anos.....                                     | 107 |
| Tabela 20 – Parâmetros de qualidade do ajuste dos modelos de afilamento para <i>Cupressus lusitanica</i> . ....  | 108 |
| Tabela 21 – Quantificação dos sortimentos produzidos por <i>Pinus taeda</i> nos desbastes, aos 23 e 36 anos e <i>Cupressus lusitanica</i> aos 13 anos..... | 109 |
| Tabela 22 – Posições (m) de retirada dos discos das árvores de <i>Pinus taeda</i> para análise do crescimento. ....  | 139 |
| Tabela 23 – Posições (m) de retirada dos discos das árvores de <i>Pinus taeda</i> para reconstrução dos diâmetros aos 23 anos de idade. ....               | 139 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

|        |                                  |
|--------|----------------------------------|
| AIC    | Critério de Informação Akaike    |
| BIC    | Critério de Informação Bayesiano |
| ANATRO | Análise de Tronco                |
| ICA    | Incremento Corrente Anual        |
| IMA    | Incremento Médio Anual           |
| IPA    | Incremento Periódico Anual       |
| VPL    | Valor Presente Líquido           |
| TMA    | Taxa Mínima de Atratividade      |

## SUMÁRIO

|   |            |
|---|------------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>15</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>   | <b>17</b>  |
| <b>3. HIPÓTESES .....</b>   | <b>19</b>  |
| <b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>21</b>  |
| 4.1 PLANTIO SOB COBERTURA ( <i>UNDERPLANTING</i> ) .....  | 21         |
| 4.2 ESPÉCIES COMPONENTES DO PLANTIO SOB COBERTURA.....  | 26         |
| 4.2.1 <i>Pinus taeda</i> L.....   | 26         |
| 4.2.2 <i>Cupressus lusitanica</i> Mill.....   | 27         |
| 4.3 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO FLORESTAL.....   | 29         |
| 4.4 FUNÇÕES DE AFILAMENTO.....  | 34         |
| 4.5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS FLORESTAIS.....   | 36         |
| <b>5. CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO INICIAL DE UM PLANTIO DE<br/><i>Cupressus lusitanica</i> Mill. SOB COBERTURA DE <i>Pinus taeda</i> L.....</b>  | <b>39</b>  |
| <b>6. CAPÍTULO II: CRESCIMENTO, PRODUÇÃO DAS ESPÉCIES DO<br/>SISTEMA SOB COBERTURA E DENSIDADE DA MADEIRA DE <i>Pinus taeda</i> ..</b>          | <b>59</b>  |
| <b>7. CAPÍTULO III: AFILAMENTO DO TRONCO E AVALIAÇÃO<br/>ECONÔMICA DE <i>Cupressus lusitanica</i> SOB COBERTURA DE <i>Pinus taeda</i> .....</b> | <b>93</b>  |
| <b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>117</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>118</b> |
| <b>APÊNDICES .....</b>  | <b>139</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O atual modelo de produção florestal, utilizado pela grande parte das empresas florestais, baseia-se na adoção de uma única espécie com potencial produtivo. Esse modelo, caracterizado pelo manejo florestal intensivo para a produção de madeira, polpa e celulose, tem favorecido o plantio de monoculturas ao redor do mundo. Essa tendência tem sido muito mais forte nos países tropicais, onde esse tipo de manejo está associado, em sua grande maioria, a um pequeno número de espécies exóticas. Plantios compostos por uma única espécie fornecem resultados uniformes e previsíveis e podem ser manejados de forma relativamente simples e com técnicas já padronizadas (KELTY; CAMERON, 1995).

Todavia, as práticas florestais vêm mudando ao longo dos anos através de um maior entendimento dos ecossistemas florestais e das expectativas sociais. Atualmente, desenvolver e manter florestas com estruturas complexas tem se tornado uma prioridade mundial. Mudanças nos valores sociais têm motivado essa alteração no manejo florestal através da demanda por florestas multifuncionais que sejam mais próximas às florestas naturais (KELTY; CAMERON, 1995; GERLACH et al., 2002; PUKKALA; GADOW, 2012; O'HARA, 2014).

Além disso, florestas que abrigam mais de uma espécie, em diferentes idades, são extremamente vantajosas, pois permitem um melhor aproveitamento dos recursos naturais, como solo e água, podem fornecer produtos em diferentes rotações, além de propiciar uma estrutura biológica complexa (O'HARA, 2014).

Nesse sentido, um sistema que ainda é pouco explorado no Brasil para fins comerciais é o sistema sob cobertura (*shelterwood system*), que consiste no plantio de uma espécie de interesse sob a cobertura de uma camada de árvores já existente, da mesma ou de uma espécie distinta. Foi encontrado apenas um registro de sistema de floresta sob cobertura implantado no Brasil para fins comerciais, no trabalho de Dobner Jr. et al. (2009), onde *Eucalyptus dunnii* Maiden foi plantado sob cobertura de *Pinus taeda* L. com o objetivo de proteger contra geadas, onde os autores verificaram que uma cobertura de 50 árvores por hectare diminuiu os danos causados por geadas na espécie sob cobertura.

O plantio sob cobertura, ao permitir a obtenção de renda em diferentes rotações somada à produção de madeira de qualidade com rotações mais longas, mostra-se como uma excelente alternativa para pequenos produtores, que buscam diversificar a produção, com obtenção de receitas em diferentes épocas e a não dependência de apenas uma atividade. Além disso, é possível aumentar a produção total de uma área, reduzir o risco associado à pragas ou doenças

florestais, proteger contra erosão e invasão de plantas daninhas ou mesmo contra condições climáticas adversas.

Dessa maneira, o presente estudo busca atender as demandas de pesquisa referentes ao plantio sob cobertura no Brasil, uma vez que ainda são poucas as pesquisas que tenham como foco de estudo o desempenho de espécies plantadas sob esse sistema, em termos de crescimento, produção e rentabilidade econômica.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi o de avaliar o crescimento, densidade da madeira e rentabilidade econômica de um plantio de *Cupressus lusitanica* Mill. implantado sob a cobertura de *Pinus taeda* L.

E como objetivos específicos:

- Caracterizar, por meio de variáveis dendrométricas, as espécies *C. lusitanica* e *P. taeda*;
- Analisar a correlação entre as variáveis dendrométricas de *C. lusitanica* e a distância das árvores de cobertura de *P. taeda*;
- Caracterizar o crescimento de *Pinus taeda* no plantio sob cobertura;
- Analisar a densidade e espessura dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* em diferentes estágios de desenvolvimento e suas implicações na qualidade da madeira;
- Ajustar modelos de afilamento para *Pinus taeda* aos 23 e 36 anos e *Cupressus lusitanica* aos 13 anos;
- Avaliar economicamente o plantio sob cobertura da espécie *C. lusitanica*.



### 3. HIPÓTESES

- É possível que o desempenho dendrométrico de *Cupressus lusitanica* seja afetado pela presença de um estrato superior;
- É possível que as árvores de *C. lusitanica* mais próximas ao *Pinus taeda* (raio de 10 metros) apresentem menor crescimento;
- Espera-se que *Pinus taeda* tenha apresentado um crescimento significativo após a colheita parcial aos 23 anos de idade, sem comprometer a qualidade da madeira;
- A manutenção da cobertura no sistema permite a produção de árvores de maiores dimensões e valores econômicos para a espécie *Pinus taeda*, bem como um melhor aproveitamento do espaço produtivo;
- O plantio sob cobertura é vantajoso economicamente e pode ser uma alternativa rentável de produção de madeira para o pequeno e médio produtor<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> De acordo com a Lei N° 8.629, de 25 de fevereiro de 1993 (BRASIL, 1993), que dispõe sobre a regulamentação dos dispositivos constitucionais relativos à reforma agrária, pequena propriedade é caracterizada pelo imóvel rural de até 4 módulos fiscais e média propriedade é aquela que apresenta área de 4 a 15 módulos fiscais. Em Capão Alto, local de localização do presente estudo, um módulo fiscal equivale a 20 ha (INCRA, 2013), então um pequeno produtor é proprietário de uma área de até 80 ha e médio produtor é proprietário de uma área de 80 a 300 ha.



## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 PLANTIO SOB COBERTURA (*UNDERPLANTING*)

A necessidade de adaptações nos métodos de manejo florestal que visem a sustentabilidade das florestas, sobretudo na Europa e América do Norte, deu origem ao método de manejo florestal chamado de cobertura florestal contínua (*continuous cover forest*). O manejo através da cobertura florestal contínua envolve a manutenção permanente de uma cobertura florestal, em um ou mais níveis, sem a adoção de corte raso (MASON et al., 1999; KERR, 2008; PUKKALA; GADOW, 2012).

Caracterizado pela colheita seletiva e regeneração natural, a cobertura florestal contínua resulta em estruturas com diferentes idades e frequentemente espécies distintas. Em uma floresta manejada sob esse método, sua idade não é definida. Nesse caso, a floresta não segue um ciclo no padrão corte raso-e-regeneração, mas sim oscila em torno de um nível ideal residual de estoque de crescimento, o qual deve ser favorável para regeneração e crescimento das árvores regenerantes (MASON et al., 1999; PUKKALA; GADOW, 2012).

Dentre os vários métodos silviculturais que o manejo por cobertura florestal contínua engloba, dois são os mais comuns: sistemas de seleção (*selection systems*) e sistemas sob cobertura (*shelterwood*). Nos sistemas de seleção, colheita e regeneração acontecem simultaneamente e continuamente e estes podem ainda ser subdivididos em seleção individual ou em grupo. O objetivo é promover o estoque de crescimento buscando que a razão entre o número de árvores remanescentes nas classes diamétricas seja constante, indicando que a floresta é balanceada. Já nos sistemas sob cobertura, os povoamentos são regenerados abaixo da proteção de uma camada superior de árvores, onde estas são gradativamente removidas para promover a regeneração natural (ou artificial); assim, a regeneração resultante é mais ou menos equiânea (SCOLFORO, 1998; PUKKALA; GADOW, 2012).

No sistema sob cobertura, as árvores podem ser retiradas em intervalos, espaciais e temporais, regulares (*regular shelterwood*) ou irregulares (*irregular shelterwood*), em faixas (*strip shelterwood*) ou em grupos (*group shelterwood*). A remoção dessas árvores é feita em pelo menos dois desbastes: o primeiro é chamado de “corte de semeadura” que abre espaço no dossel para permitir a entrada de luz e promover a regeneração pelo banco de sementes; o segundo é chamado de “corte de remoção” que retira as árvores residuais quando o sub-bosque está bem estabelecido (atinge tamanho e abundância adequados). Em alguns casos, “cortes preparatórios” podem ser utilizados, antes do corte de sementes, para aumentar o vigor das

árvores, resistência ao vento e proteção das sementes (BURTON et al., 2000; NYLAND, 2010; PUKKALA; GADOW, 2012).

A categoria padrão de sistema sob cobertura é o tipo uniforme ou regular, que se refere à aplicação dos desbastes mencionados acima aplicados a toda a floresta, com a manutenção de árvores espaçadas regularmente na cobertura. Quando essa cobertura é retirada, o sub-bosque apresenta uma característica uniforme também em termos de altura, e é, geralmente, equiâneo. Outro tipo bem difundido de sistema sob cobertura é o irregular (*irregular shelterwood*), cuja concepção inicial era o termo “*Femelschlag*”, e foi desenvolvido na Europa Central no século XIX; essa variação caracteriza-se pela manutenção da cobertura florestal por um longo tempo (geralmente mais de 50 anos), resultando na irregularidade da altura das árvores da regeneração e é aplicado onde a regeneração tem mais sucesso de ocorrer (SCHUTZ, 1999; RAYMOND et al, 2009; NYLAND, 2010; KERR; HAUFÉ, 2016).

O sistema silvicultural sob cobertura tem sido aplicado em vários países com o intuito de favorecer a regeneração natural (ou artificial) de espécies de interesse de acordo com o tipo de ecossistema, especialmente espécies de estágio sucessional avançado tolerantes ou semi-tolerantes à sombra. Além disso, a manutenção de algumas árvores no dossel objetiva dificultar o desenvolvimento de espécies competidoras no sub-bosque que, muitas vezes, comprometem o estabelecimento de espécies-alvo (BERGQVIST, 1999; BALANDIER et al., 2007).

Nos casos onde a regeneração natural não é suficiente, ou busca-se introduzir uma nova espécie de interesse ou mesmo aumentar a proporção de determinada espécie no sub-bosque, é feita a regeneração artificial por meio do plantio de mudas no sistema sob cobertura (SCOLFORO, 1998).

Essa técnica pode ser conhecida como “*underplanting*”, ou plantio sob cobertura, que pode ser chamado também de plantio de enriquecimento (*enrichment planting*). Tal técnica consiste no plantio de árvores embaixo de uma cobertura existente, como parte de um processo de regeneração da floresta, para aumentar a proporção de uma determinada espécie da regeneração natural no sub-bosque, para enriquecer e diversificar a estrutura da floresta ou mesmo para introduzir uma nova espécie de interesse (SCOLFORO, 1998; KERR; HAUFÉ, 2016).

O termo plantio sob cobertura é um termo genérico que se refere ao estabelecimento de um sub-bosque jovem sob a cobertura de um estrato antigo, ou seja, obrigatoriamente há a presença de, pelo menos, dois estratos na floresta. É adotado, na maioria dos casos, quando a substituição da floresta existente não é possível mediante regeneração natural ou que esta não seja parte desejável do manejo de cobertura florestal contínua (KERR; HAUFÉ, 2016).

No Reino Unido, o plantio sob cobertura pode ser dividido em duas categorias, de acordo com os objetivos e a escala de tempo de manutenção e manejo dos dois estratos: regeneração e melhoramento da floresta. O plantio de regeneração é aquele onde o sub-bosque é estabelecido para repor as árvores do dossel, e geralmente é um elemento do manejo de cobertura florestal contínua. Tanto o estrato inferior quanto o superior coexistem por algum tempo, até que o estrato superior seja removido. Já no plantio para melhoramento da floresta, o objetivo é complementar o dossel, onde os dois estratos são manejados em conjunto até atingir a rotação, onde o resultado será o corte raso e replantio ou mesmo o manejo por cobertura florestal contínua (KERR; HAUFE, 2016).

O plantio de melhoramento da floresta com dois ou mais estratos implica que, em quase todos os casos, mais de uma espécie é envolvida. O objetivo de cada estrato é bem definido. O estrato superior compreende a espécie principal, geralmente dependente de luz, e o estrato inferior tem um papel secundário e é composto por uma espécie tolerante à sombra, geralmente. Esse plantio se justifica em locais onde os custos adicionais do manejo são menores que o resultado em si, seja em biomassa e/ou qualidade da madeira (KERR; HAUFE, 2016).

O plantio sob cobertura, por se tratar de um sistema sob cobertura, apresenta diversos benefícios comuns a esse sistema, incluindo proteção contra condições climáticas desfavoráveis, como altas temperaturas do ar e do solo, alta demanda evaporativa, secas, geada e chuvas pesadas, redução do risco contra pestes e patógenos, maior flexibilidade com a escolha das espécies, potencial para aumentar a qualidade da madeira e a diversidade da estrutura da floresta, aumento do incremento das árvores da cobertura, melhoria das condições do solo, com aumento da camada orgânica, controle da erosão e melhor aproveitamento de nutrientes, inserção de espécies com um melhor genótipo, controle das espécies competidoras no sub-bosque, melhor estabilidade e resiliência da floresta (THAM, 1994; MASON et al., 1999; BURTON et al., 2000; HANELL et al., 2000; KELTY, 2006; SIMPSON; OSBORNE, 2006; BALANDIER et al., 2007; BARBEITO et al., 2011; DEY et al., 2012; PUKKALA; GADOW, 2012; KERR; HAUFE, 2016).

Há, também, a redução do impacto visual quando comparado ao corte raso, geração de estruturas complexas com troncos e detritos lenhosos que auxiliam na conservação de processos ecológicos e em valores estéticos, com possíveis benefícios para a fauna (MASON et al., 1999; VALKONEN et al., 2002).

Além disso, a adoção de mais de um estrato representa uma vantagem em termos de aproveitamento do espaço produtivo. Isso é reflexo do manejo adotado, uma vez que as árvores que ocupam o dossel são colhidas apenas quando as árvores do sub-bosque já estão bem

estabelecidas e com aptidão para usar o espaço de maneira eficiente, sem a exposição do solo como ocorre no corte raso (DOBNER Jr. et al, 2009). Soma-se a isso o fato de as árvores adultas remanescentes apresentarem um ganho em incremento com consequente produção de toras de maior diâmetro e com alta qualidade (MASON et al., 1999; HANELL et al., 2000), o que possibilita uma maior rentabilidade do sistema.

Outro ponto positivo do plantio sob cobertura é a redução dos riscos vinculados ao mercado, através da diversificação de produtos. Isso envolve a opção de direcionar todos os recursos para um único produto que tenha o maior valor no presente ou diversificar a produção. Geralmente, o maior problema relacionado a plantios florestais para os produtores é o período de tempo entre o investimento inicial relacionado ao preparo do solo, plantio e controle de mato competição e o retorno econômico proveniente dos produtos florestais no final da rotação. Além disso, o manejo de monoculturas inclui desbastes precoces assim que um produto útil possa ser colhido, mas grande parte das espécies que são valorizadas como madeira sólida em grandes diâmetros não apresenta valor em pequenos diâmetros. O cultivo de múltiplas espécies em um plantio pode fornecer mais opções de rendimentos periódicos em diferentes rotações (KELTY, 2006).

Com relação às desvantagens, uma delas se refere aos desafios operacionais ao plantar, podar e desbastar um estrato inferior, ou seja, há uma complexidade maior das práticas de manejo, o que exige profissionais qualificados no planejamento e condução de um plantio sob cobertura (MASON et al., 1999; KELTY, 2006; KERR; HAUFÉ, 2016).

Outra desvantagem se refere à regulação e predição do crescimento do sistema, que é mais difícil do que em florestas com uma espécie e/ou equiâneas, à remoção das árvores da cobertura, que geralmente causa danos nas árvores do estrato inferior e ao maior custo da operação de corte de árvores devido às pequenas e dispersas áreas de derrubada de árvores e corte seletivo feito manualmente (MASON et al., 1999; DOBNER Jr. et al., 2009).

Muitos dos plantios sob cobertura são feitos para promover a regeneração natural de florestas. Na América do Norte, por exemplo, eles têm sido amplamente utilizados em sistemas sob cobertura para facilitar o estabelecimento da regeneração de carvalhos (*Oak spp.*) (LOFTIS, 1990; GARDINER; YEISER, 2006; PAQUETTE et al., 2006; BROSE, 2011; DEY et al., 2012) e outras espécies de interesse (PITT et al., 2011). Além disso, a prática de plantio sob cobertura também é muito comum em diversos países da Europa (HOLGEN; HANELL, 2000; STRAND et al., 2006; KERR; HAUFÉ, 2016; KNAPP et al., 2016). Também há registros da adoção de plantio sob cobertura na Austrália (RICHARDS, 1967; BEVEGE; RICHARDS, 1970; SIMPSON; OSBORNE, 2006).



Na América Latina, África e em outras regiões tropicais, os plantios sob cobertura também são realizados, e são comumente chamados de plantios de enriquecimento. Apresentam o mesmo objetivo, que é aumentar a densidade de uma determinada espécie arbórea em florestas secundárias, mantendo as árvores já presentes na floresta, e é adotado em áreas onde a regeneração natural é insuficiente ou as condições do solo não são adequadas (ADJERS et al., 1995; MONTAGNINI et al., 1997; PEÑA-CLAROS et al., 2002; SCHULZE, 2008; KEEFE et al., 2009).

Vale ressaltar que o plantio de enriquecimento pode incluir espécies frutíferas, com outros usos comerciais ou com importância regional (MONTAGNINI et al., 1997). Em Gana, por exemplo, há registros da adoção de plantio sob cobertura para promover o estabelecimento de *Elaeis guineensis* (dendezeiro) sob *Theobroma cacao* (cacau) (AMOAHA et al., 1995).

Assim, percebe-se que o plantio sob cobertura tem sido adotado para promover e proteger a regeneração artificial de espécies de interesse comercial nativas de cada região, sendo que não foi encontrado nenhum trabalho com o plantio de exóticas sob cobertura em outros países. Há registro, por exemplo, de plantio de espécies nativas sob cobertura de espécies exóticas, do gênero *Pinus*, na Austrália, (SIMPSON; OSBORNE, 2006), mas não foram encontrados trabalhos de espécies exóticas plantadas sob espécies exóticas.

No Brasil, são comuns os plantios de enriquecimento, como adotado nos trabalhos de Schulze (2008), Keefe et al. (2009) e Venturoli et al. (2011), com plantios de espécies nativas em florestas também nativas. Existe o registro de um plantio de *Eucalyptus dunnii* Maiden sob cobertura de *Pinus taeda*, duas espécies exóticas destinadas à produção madeireira, onde o principal objetivo da cobertura de *Pinus* foi proteger o componente *Eucalyptus* contra geadas (DOBNER Jr et al., 2009).

Portanto, o presente estudo trata-se de um plantio sob cobertura inédito, adotando a espécie *Cupressus lusitanica* sob a cobertura de *Pinus taeda*. Há trabalhos adotando a cobertura de *P. taeda* para promover a regeneração desta e outras espécies na Carolina do Sul, Estados Unidos, com foco particular de criação de habitats para a colonização de uma espécie de pica-pau (GRESHAM, 1996). Com relação à presença de *Cupressus lusitanica* em um plantio sob cobertura, há apenas o registro de que este foi adotado para compor um plantio misto com *Eucalyptus camaldulensis*, na Etiópia (ALEM et al., 2015).

## 4.2 ESPÉCIES COMPONENTES DO PLANTIO SOB COBERTURA

Nesse trabalho, foram investigadas duas espécies de gimnospermas, conhecidas como coníferas, para compor o plantio sob cobertura: *Cupressus lusitanica* P. Miller e *Pinus taeda* L. As coníferas são um grupo de plantas com sementes, onde todas descendem de um ancestral comum do final da era Paleozoica, mais de 300 milhões de anos atrás. As quase 550 espécies de coníferas são encontradas em todo o mundo e em todos os continentes (exceto Antártica) e em diversas ilhas. Com exceção de 15 espécies, aproximadamente, as coníferas são sempre-verde, mesmo em climas temperados e mais frios. A maioria tem folhas em formato de acículas, escamas ou garras e o nome conífera refere-se ao termo “portador de cones”, sendo que apresentam uma estrutura única coberto com folhas modificadas (brácteas) suportando um pequeno galho na sua axila (ECKENWALDER, 2009).

### 4.2.1 *Pinus taeda* L.

Espécies do gênero *Pinus* vêm sendo plantadas no Brasil há mais de um século. As primeiras foram trazidas por imigrantes europeus, para fins ornamentais e madeireiros. Em 1948, por intermédio do Serviço Florestal do Estado de São Paulo, foram introduzidas espécies americanas, como *Pinus palustris*, *Pinus echinata*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Dessas, as duas últimas foram difundidas e muito cultivadas, especialmente no Sul e Sudeste do Brasil, devido à rusticidade, facilidade nos tratos culturais e rápido crescimento e reprodução. Essas espécies começaram a ser plantadas em extensas áreas a partir da década de 1960, onde ganharam o conhecimento da sociedade também pelo fato de serem resistentes à geada e proporcionar altos rendimentos em madeira (SHIMIZU; SEBBENN, 2008).

No Brasil, segundo dados do IBA (2019) referentes ao ano-base 2018, dos 7,83 milhões de hectares de florestas plantadas, 1,6 milhões de hectares são plantados com espécies do gênero *Pinus*, sobretudo nos estados do Paraná (42% da área de *Pinus*) e Santa Catarina (34%), sendo *P. taeda* uma das principais espécies plantadas em Santa Catarina.

*P. taeda*, também conhecida como *Loblolly pine*, é uma espécie do gênero *Pinus* que ocorre naturalmente em áreas mais baixas do Sudeste dos Estados Unidos com uma vasta distribuição a partir da Península de Cape May em Nova Jersey até o Texas. Frequentemente forma florestas puras como um resultado da disseminação da espécie após distúrbios em florestas ou em campos abandonados, *P. taeda* também está presente em florestas com outros

tipos de *Pinus* ou com angiospermas em fase avançada de sucessão florestal (FARJON; FILER, 2013).

É uma árvore com potencial de atingir até 45 metros de altura, com diâmetro variando entre 1,0 a 1,5 metros. Apresenta madeira de tom marrom claro, grossa, quebrando em largas, interlaçadas cristas ou em pequenas e irregulares placas separadas por sulcos estreitos. É a espécie com madeira mais versátil dos *Pinus* sulistas norte-americanos, e a mais importante economicamente, sendo cultivada para madeira serrada, laminação, compensados, polpa e resina. Nesse sentido, existem mais estudos sobre crescimento, variação genética e geográfica, biologia reprodutiva, estratégias de reprodução, resistência a doenças e pestes, tolerância ambiental, manejo do plantio e utilização do que qualquer outra espécie do gênero (SCHULTZ, 1997; ECKENWALDER, 2009).

Os primeiros plantios comerciais de *P. taeda* no Brasil foram estabelecidos com sementes importadas dos Estados Unidos, sem controle genético ou de procedência das mesmas. Consequentemente, os primeiros plantios resultaram em povoamentos com inúmeros defeitos no fuste, como tortuosidade, bifurcações e ramos grossos (SHIMIZU; SEBBENN, 2008). Entretanto, já na década de 1970, os primeiros testes de procedências e progênies foram implementados, principalmente no Sul e Sudeste, possibilitando identificar as procedências mais produtivas e melhor adaptadas às condições edafoclimáticas brasileiras, como o estudo de Fonseca e Kageyama (1978), indicando critérios genéticos e metodologias para a seleção de árvores superiores de *P. taeda* ou o estudo de Barrichelo et al. (1977), avaliando procedências para aproveitamento industrial da madeira.

Com base nessas iniciativas e com o desenvolvimento de uma rede de testes de progênies dessa espécie pela Embrapa e parceiros a partir da década de 1980, foi possível alcançar ganhos genéticos significativos em produtividade de madeira, além de melhorias na qualidade da madeira (AGUIAR et al., 2011). Como reflexo dos programas de melhoramento genético implantados, nota-se, atualmente, incrementos médios anuais (IMA) superiores a 40 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup> aos 18 anos, uma das maiores produtividades do mundo (FERREIRA, 2005).

#### 4.2.2 *Cupressus lusitanica* Mill.

*C. lusitanica* é uma espécie que cresce naturalmente em regiões de altitude alta no México e América Central, numa faixa de altitude de 1.000 a 4.000 metros. É uma árvore que compete com sucesso com outras coníferas dessa faixa de altitude e geralmente ocorre em meio a espécies dos gêneros *Pinus* e *Abies*, ou mesmo forma florestas puras com pouca

luminosidade chegando ao solo. É amplamente plantada em montanhas tropicais e subtropicais como floresta e já foi naturalizada em vários países (WATT et al., 2009; FARJON; FILER, 2013).

Chega a atingir 30 metros de altura e diâmetro entre 1,5 a 3,5 metros. Sua madeira é fibrosa, de coloração branco-amarelada, com textura fina, e casca descascando em faixas estreitas. A copa é variável, cônica ou cilíndrica, com galhos horizontais. É uma árvore muito cultivada para fins ornamentais desde a metade do século 17. Foi nessa época que foi primeiramente cultivada pelos frades Carmelitas na Serra do Bussaco, em Portugal. Tal povoamento, ainda existente com árvores com mais de 300 anos de idade, foi a fonte de material descrita por Miller, o que explica o nome da espécie, uma vez que Lusitania é correspondente a província romana que hoje é Portugal. Dessa maneira, é difícil determinar se os povoamentos na América Central são nativos ou resultados de séculos de plantio, sendo que muitas florestas selvagens foram severamente reduzidas devido a sua madeira nobre. A variação natural dessa espécie ainda não foi vastamente explorada, mas algumas árvores da região Huateca, do cento leste do México e nordeste da Cidade do México foram reconhecidas como sendo uma variedade exclusiva *C. lusitanica* var. *benthamii*, que é um pouco distinta da outra variedade da espécie, *C. lusitanica* var. *lusitanica*, espécie mais comum em algumas regiões da Guatemala, El Salvador, Honduras e até mesmo Nicarágua (ECKENWALDER, 2009; WATT et al., 2009).

Devido a sua apreciação ornamental e também madeireira, essa espécie tem sido plantada em diversos países, em regiões de clima temperado e tropical, como Etiópia (LISANWORK; MICHELSEN, 1993; TESHOME; PETTY, 2000; BERHE; ARNOLDSSON, 2008; ASAYE; ZEWDIE, 2013; ALEM et al., 2015), Uganda (KARANI, 1976), Tanzânia (MALIMBWI et al., 1992), Nova Zelândia (BERRILL, 2004; WATT et al., 2009), Colômbia (TSCHINKEL, 1972; ARANGO, 1975; CAVELIER; TOBLER, 1998), Costa Rica (CORNELIUS et al., 1996; ROQUE et al., 2010; CHINCHILLA et al., 2011), Venezuela (PETIT-ALDANA et al., 2010) e Brasil (SHIMIZU et al., 1995; OKINO et al., 2010; ALMEIDA, 2015; CUNHA et al., 2016).

É interessante destacar que, na Nova Zelândia, espécies de *Cupressus* são plantadas desde 1860, onde *C. lusitanica* é uma das principais espécies plantadas do gênero (NICHOLAS, 2006). Lá, plantios dessa espécie foram instalados na maioria das regiões do país, e o Instituto de Pesquisas Florestais da Nova Zelândia tem desenvolvido uma base de dados com repetidas medições de diâmetro, altura e altura de copa de indivíduos encontrados em parcelas permanentes para desenvolvimento de modelos de crescimento e produção dessa espécie (BERRILL, 2004).

*C. lusitanica* apresenta características anatômicas que favorecem seu uso para diversos fins. No trabalho de Almeida (2015), o autor observou que a espécie apresenta porosidade reduzida e textura fina, além de possuir propriedades químicas semelhantes às de coníferas normalmente utilizadas para produção de painéis de madeira. A madeira apresenta alta estabilidade dimensional, densidade a 12% de umidade de  $0,600 \text{ g cm}^{-3}$ , classificada pelos autores (ROQUE et al., 2010) como madeira moderadamente pesada. Já Hocking e Nicholas (2006) verificaram uma densidade a 12% de umidade de  $0,402 \text{ g cm}^{-3}$ .

Em plantios bem manejados, as árvores apresentam fustes retos, com possibilidade de extrair entre 3 a 7 toras de 2,5 metros de comprimento dependendo da retidão do fuste. O maior problema relacionado a espécie é a alta produção de galhos, girando entre 5 a 12 galhos por metro, o que torna a desrama lenta e difícil, sendo este um aspecto fundamental no manejo para manter a qualidade da madeira da espécie (ROQUE et al., 2010).

Essa espécie tem se tornado uma alternativa popular ao uso de *Pinus radiata* D. Don, na Nova Zelândia. Watt et al. (2008) afirmam que *C. lusitanica* é uma alternativa ao uso de *P. radiata*, uma vez que a primeira espécie também apresenta boas taxas de crescimento e pode ser aplicada para uma grande variedade de usos, como em painéis e aplicações externas de carpintaria. Além disso, a madeira de *P. radiata* não é adequada para madeira de acabamento, ao contrário da madeira de *C. lusitanica*, o que permite a exploração de novos nichos de mercado, ainda na Nova Zelândia (AIMERS CONSULTING, 2008).

Além do potencial madeireiro, *C. lusitanica* também apresenta componentes químicos de interesse bioquímico. Um exemplo é o metabólito secundário  $\beta$ -thujaplicin, o qual apresenta forte atividade antimicrobiana e antifúngica, e confere à madeira dessa espécie preservação e durabilidade contra fungos, bactérias e insetos (ZHAO et al., 2006).

No Brasil, especificamente em Santa Catarina, o plantio de *C. lusitanica* é recomendado pela EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina), como uma espécie para produção de madeira para serraria, voltados à construção civil (estruturas e decoração) e fabricação de móveis e utensílios, como uma alternativa ao uso de espécies nativas (RAMOS et al., 2006).

#### 4.3 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO FLORESTAL

O manejo de florestas e de plantios de árvores requer uma estimativa quantitativa do volume e biomassa correntes e futuros de madeira e de outros produtos, em níveis nacionais, regionais e locais. Além disso, essa informação é necessária para a tomada de decisões em

função do mercado, como manter a floresta em pé ou vender a madeira em uma determinada situação político-econômica (GADOW et al., 2007). Dessa maneira, o conhecimento sobre crescimento e produção de uma floresta é imprescindível para o sucesso e lucratividade de qualquer empreendimento florestal.

Portanto, é importante conceituar crescimento e produção. Crescimento é um processo biológico, definido como a biomassa ou tamanho que uma planta ou um povoamento produz em um determinado período. O crescimento se dá pela diferença dos processos de síntese, chamados de anabolismo, que consiste na diferença entre as taxas de fotossíntese e respiração, e processos de degradação, ou catabolismo. Assim, a taxa de anabolismo representa a superfície de um organismo, enquanto que a taxa de catabolismo representa o volume deste. Esse processo se expressa no alongamento e espessamento de raízes, fuste e galhos de uma árvore, levando a uma mudança em peso, volume e forma. O crescimento linear de todas as partes de uma árvore resulta das atividades do meristema primário, enquanto que o crescimento em diâmetro resulta do funcionamento do meristema secundário, ou cambial, que forma madeira e cascas novas entre a madeira velha e a casca (BERTALANFFY, 1957; MIYAURA; HOZUMI, 1993; HUSCH et al., 2003; PRETZSCH, 2009; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Produção, por sua vez, é definida como a biomassa acumulada desde o estabelecimento do povoamento florestal. Relacionado a essa temática, ainda pode-se citar o termo incremento, que expressa o crescimento observado de um organismo durante um certo período de tempo e geralmente é aplicado as variáveis dendrométricas diâmetro, área basal, altura, volume e biomassa (GADOW et al., 2007; PRETZSCH, 2009; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Ao se considerar o período de um ano, o incremento é chamado de incremento corrente anual (ICA) (Equação 1), que consiste na diferença entre as variáveis mensuradas no começo e no final do ano de crescimento dividida pelo tempo (como é anual, divide-se por 1). Pode-se usar, também, a média anual de crescimento para um determinado período de anos, denominada incremento periódico anual (IPA) (Equação 2). O IPA é, então, obtido pela diferença entre as variáveis mensuradas no começo e no final do período, dividida pelo número de anos do período. Ainda, o incremento médio anual (IMA) (Equação 3) pode ser obtido através da divisão do crescimento acumulado pela idade (HUSCH et al., 2003). As respectivas equações de ICA, IPA e IMA estão descritas a seguir para a variável volume (SCHNEIDER, 2004).

$$ICA = \frac{V_{n+1} - V_n}{t_{n+1} - t} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$IPA = \frac{V_{n+1} - V_n}{a} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$IMA = \frac{V_t}{t} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:  $V_n$  = volume no início do período;  $V_{n+t}$  = volume no final do período;  $t$  = idade inicial;  $t_{n+1}$  = idade final;  $a$  = período de tempo entre os levantamentos (maior que 1);  $V_t$  = volume na idade  $t$ ;  $t$  = idade do povoamento.

Geralmente, crescimento e produção são quantificados para o volume de madeira do tronco ou volume de madeira comercial<sup>2</sup>, em  $m^3$  para produção e  $m^3 \text{ ano}^{-1}$  para crescimento, por árvore ou unidade de área (PRETZSCH, 2009), uma vez que o volume é a principal característica do povoamento em inventários florestais (GADOW et al., 2007).

A produção florestal de um determinado povoamento ou floresta natural é obtida através da análise do crescimento das árvores individuais ou do povoamento. Uma forma de se conduzir estes estudos é através da realização de inventários florestais contínuos realizados em parcelas permanentes que são mensuradas periodicamente. Outra forma de se conhecer o crescimento de uma floresta é por meio da análise de tronco (ANATRO), que compreende a medição equidistante ou não de um número definido de secções transversais do tronco de uma árvore, com intuito de presumir o crescimento e o seu desenvolvimento durante as fases da vida, que se dá através da contagem dos anéis de crescimento (ENCINAS et al., 2005; LAAR; AKÇA, 2007).

A análise de tronco pode ser parcial ou completa. Na análise parcial, pode-se coletar rolos de incremento em árvores em pé, com o auxílio de um trado de incremento, na altura do peito. A desvantagem desse método é a dificuldade de encontrar a medula e de atingir todo o comprimento da árvore em grandes árvores. Já a análise completa se refere à contagem de anéis a partir de secções transversais obtidas de árvores abatidas para esse fim (HUSCH et al., 2003; FINGER, 2006).

Os anéis de crescimento são formados pela adição de uma nova camada de madeira todo ano entre a madeira antiga e a casca. A formação dessa camada inicia no começo da estação de crescimento e continua durante o ano. Esse crescimento anual aparece na seção transversal do tronco como uma série de anéis concêntricos, e sua contagem, em uma determinada seção transversal, fornece a idade da árvore acima da seção. Assim, se a contagem é feita na seção transversal no nível do solo, ela fornece a idade total da árvore (HUSCH et al., 2003; PUNCHES, 2004).

Há diferenças na madeira formada na estação de crescimento (primavera-verão), chamada de lenho juvenil (*springwood* ou *earlywood*), e a madeira formada na estação de

---

<sup>2</sup> Volume comercial é o volume de madeira produzido pela árvore (tronco e/ou galhos) que pode ser aproveitado para fins comerciais. É o volume produzido acima de um diâmetro mínimo de uso, o qual é determinado pelas empresas florestais de acordo com a finalidade dos seus produtos (GADOW et al., 2007; PRETZSCH, 2009).

estagnação do crescimento (outono-inverno), denominada de lenho tardio (*summerwood* ou *laterwood*). O lenho inicial é caracterizado por apresentar traqueídeos menores, lúmens maiores e paredes celulares mais finas para facilitar o transporte entre as raízes e as novas acículas e brotos enquanto que, no lenho tardio, os traqueídes possuem lúmens mais estreitos, parede mais grossa e traqueídeos maiores. Isso afeta diretamente na densidade básica dos dois lenhos, uma vez que o lenho inicial é menos denso que o lenho tardio (PANSIN; ZEEUW, 1970; FOELKEL et al., 1975; KRETSCHMANN; BENDTSEN, 1992; LARSON et al., 2001; DECOUX et al., 2004; VIDAURRE et al., 2011).

Em regiões tropicais com estação seca e chuvosa, os anéis se comportam de maneira similar a regiões temperadas, sendo bem definidos. Já em regiões tropicais onde não existe uma alternância nas estações, os anéis produzidos podem ser pouco utilizados para a determinação da idade pois não são bem marcados (HUSCH et al., 2003; FINGER, 2006).

Algumas dificuldades podem ser encontradas ao contar os anéis de crescimento. Em espécies com crescimento lento, os anéis podem estar muito próximos entre si, dificultando a contagem destes. Em algumas espécies, a distinção aparente entre lenho tardio e inicial não é muito clara, e os anéis são indistintos. Além disso, anormalidades climáticas durante a estação de crescimento ou mesmo um ataque de insetos pode levar a formação de anéis falsos em determinadas espécies. Todavia, os anéis falsos não são tão marcados quanto os anéis verdadeiros e geralmente não se estendem ao redor de toda a circunferência da seção transversal (HUSCH et al., 2003).

Dessa forma, muitas técnicas têm sido aplicadas para auxiliar na contagem e delimitação dos anéis de crescimento, incluindo datação com radiocarbono ou o uso de modelos de incremento periódicos (HUSCH et al., 2003) ou mesmo a própria contagem manual com auxílio de réguas, onde delimita-se o maior raio sem casca a partir da medula, e a 45° sentido horário partindo deste, são marcados dois diâmetros ortogonais (MACHADO et al., 2010).

Uma metodologia que trouxe um grande avanço na análise dos anéis de crescimento foi a microdensitometria de raios-X, com primeiros registros de utilização para essa finalidade a partir da década de 1940 e finalmente proposta por Polge (1966), na França. No Brasil, foi adotada pela primeira vez por Amaral e Tomazello Filho (1998). Essa técnica permite verificar a cada milímetro as diferenças na densidade da madeira, possibilitando identificar a madeira de lenho juvenil e de lenho tardio, suas espessuras e densidades correspondentes (ANDRADE et al., 2017). Além disso, essa metodologia permite construir um perfil detalhado da densidade da madeira, oportunizando detectar a resposta das espécies a diferentes tratamentos de manejo (irrigação, desbastes, podas, fertilização, etc.) (TOMAZELLO et al., 2008).



A construção do perfil de densidade da madeira no sentido radial, ou seja, ao longo dos anos da idade das árvores, permite visualizar, de maneira bem clara, a transição entre madeira juvenil e adulta. A madeira juvenil é aquela produzida próximo à medula em qualquer altura, encontrada como uma coluna cilíndrica central de madeira formada da base até o ápice da árvore, ou aquela produzida por árvores jovens. Essa madeira é obtida através da ação do câmbio jovem, e é encontrada em proporções maiores nas partes mais altas do tronco. Já madeira adulta é produzida na porção externa do tronco, por atividade do câmbio maduro fisiologicamente, ou seja, é formada com o amadurecimento da árvore (LARSON, 1969; FOELKEL et al., 1975; COWN, 1992; BARNETT; JERONIMIDIS, 2003; GULLER et al., 2012).

No Brasil, a densitometria de raios-X tem sido aplicada a diversas espécies florestais, tanto exóticas, como as do gênero *Eucalyptus* (TOMAZELLO et al., 2008), *Pinus* (CASTRO et al., 2014), quanto nativas, como *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze (WEHR; TOMAZELLO FILHO, 2000), *Euxylophora paraensis* Huber (ANDRADE et al., 2017), *Aspidosperma pyrifolium* e *Poincianella pyramidalis* (PAGOTTO et al., 2017) e em trabalhos com ambas espécies nativas e exóticas (ALBUQUERQUE et al., 2016), dentre outros.

Com *P. taeda*, também já foram feitos estudos usando densitometria de raio-X para diversos fins. Eberhardt e Samuelson (2015), avaliando a delimitação do lenho tardio e inicial, observaram que há uma transição abrupta entre os dois lenhos nos anéis, o que facilita a identificação dos mesmos. No trabalho de Clark III et al. (2006), com amostras de *P. taeda* entre 20 e 27 anos de 5 regiões no sul dos Estados Unidos, com o intuito de analisar a idade de transição entre a produção de madeira jovem e adulta, os autores encontraram certa dificuldade em determinar essa idade devido a transição ser gradual e não abrupta. Ainda sobre a transição entre madeira jovem e adulta, Tasissa e Burkhart (1998) verificaram que esta tende a ocorrer aos 11 anos de idade no Sudeste dos Estados Unidos, enquanto que Dobner Jr et al. (2018) obtiveram uma transição entre madeira jovem para adulta entre 13 e 17 anos de idade, em Santa Catarina, Brasil. Estudando o efeito de diferentes tratamentos de fertilização em *P. taeda* através da análise dos anéis de crescimento por densitometria, Rodriguez e Tomazello-Filho (2019) notaram que a fertilização afetou o crescimento e a densidade da madeira em níveis anuais, individuais por árvore e produção do povoamento em geral.

#### 4.4 FUNÇÕES DE AFILAMENTO

Uma informação muito importante na gestão de florestas e que interfere diretamente na produção é a forma do tronco das árvores, que representa sua configuração externa geralmente lembrando a forma de determinados sólidos geométricos (como neilóide, parabolóide, cilindro ou cone). Cada porção da árvore tende a ser identificada com a forma de um determinado sólido geométrico, sendo que a base se assemelha a um neilóide, a porção central a um parabolóide ou cilindro, e a ponta da árvore lembra um cone (BORGES, 1981).

Observa-se que a árvore reduz seu diâmetro com o aumento da altura, o que pode ser chamado de afilamento, determinado por uma função matemática que expresse essa variação ao longo do tronco. Assim, as funções de afilamento permitem conhecer o diâmetro de uma árvore a qualquer altura ou a altura em um determinado diâmetro, principalmente para prever o volume parcial do fuste para diferentes finalidades comerciais (sortimentos), e são dadas em função do DAP e altura total (BORGES, 1981; GADOW et al., 2007; KOHLER et al., 2013; NICOLETTI, 2017).

A utilização de funções de afilamento no setor florestal tem permitido otimizar os recursos florestais madeireiros. Devido à sua flexibilidade, estas funções permitem estratificar o tronco, ou seja, quantificar os múltiplos produtos provenientes dos troncos das árvores por meio de dimensões pré-estabelecidas (QUEIROZ et al., 2008). Tais múltiplos produtos determinados por dimensões pré-estabelecidas podem também ser entendidos como os sortimentos de uma árvore e/ou povoamento, que resumem a avaliação comercial qualitativa da floresta em pé a partir de diferentes toras, um dos indicadores para tomada de decisões vinculadas ao manejo florestal (ARCE, 2000). Os sortimentos são definidos pelo diâmetro mínimo de uso (diâmetro de topo) e do comprimento das toras, as quais são estabelecidas pelas indústrias madeireiras em função de suas máquinas de processamento da madeira e do rendimento obtido com a industrialização (FIGUEIREDO FILHO, 1991; KOHLER et al., 2015). Assim, a produção de sortimentos por uma árvore depende diretamente do formato do fuste desta.

Os fustes das árvores apresentam formas bem variáveis, tanto entre espécies quanto entre indivíduos da mesma espécie. Muitos fatores afetam a forma das árvores, dentre eles o sítio, características da copa (comprimento e largura, por exemplo), idade, posição sociológica e tratamentos silviculturais aplicados ao longo da vida das árvores (QUEIROZ et al., 2008; KOHLER et al., 2013).

As primeiras tentativas de representar a forma das árvores começaram no início do século XX, por Höjer. Desde então, muitos tipos de modelos do perfil das árvores têm sido testados, especialmente com o avanço dos computadores e softwares estatísticos (FIGUEIREDO FILHO et al., 1996).

Até a década de 1970, os pesquisadores tentavam expressar o perfil dos troncos com apenas uma equação, o que não permitia descrever o tronco inteiro, uma vez que esses modelos descreviam bem o tronco entre a base e o topo da árvore, mas falhavam ao expressar a base da árvore (FIGUEIREDO FILHO, 1996). Assim, Max e Burkhart (1976) desenvolveram um procedimento alternativo e mais eficiente para descrever o perfil das árvores, que foi através da divisão do tronco em três partes (base, meio e topo), representado por três submodelos, os quais são, depois, unidos pelos pontos de junção para produzir o modelo de afilamento. Dentre alguns modelos não-segmentados, pode-se citar Prodan (1965), polinômio de 5° grau (SCHOEPFER, 1966), Kozak et al. (1969), Hradetzky (1976), dentre outros, enquanto que, dentre os segmentados, estão Max e Burkhart (1976), Parresol et al. (1987), Clark III et al. (1991), etc.

No trabalho de Fischer et al. (2001), analisando funções de afilamento para *P. taeda*, verificaram que o modelo polinomial de potências fracionárias e inteiras (HRADETZKY, 1976) teve melhor desempenho para estimar o perfil de fuste, e, para obtenção de melhores resultados, os autores sugerem estratificar os dados por sítio e classe de diâmetro. No trabalho de Kohler et al. (2013), com *P. taeda*, o melhor modelo também foi o das potências inteiras e fracionadas para a expressão do perfil do tronco em várias idades, assim como no trabalho de Yoshitani Jr. et al. (2012), onde o polinômio de 5° grau também apresentou resultados satisfatórios. Kohler et al. (2015) usaram esse modelo para estimar os diâmetros para os dados classificados em classes etárias na avaliação do sortimento de *P. taeda*.

Queiroz et al. (2008), avaliando funções de afilamento para *M. scabrella*, também observaram que o modelo não-segmentado de Hradetzky (1976) foi o mais acurado para estimar o volume em quase todas as classes de idade e para o conjunto total de dados, além de alta eficiência para estimar os diâmetros, sobretudo nas porções inferiores do fuste. O modelo de Kozak et al. (1969) demonstrou tendenciosidade para estimar o volume ao longo do tronco, em todas as classes de idade. Entretanto, no trabalho de Costa et al. (2016), o modelo de Kozak (1988) foi o que teve maior eficiência para prever diâmetros e volumes até o ponto de inserção de copa para *Araucaria angustifolia*.

Figueiredo Filho et al. (1996), testando modelos segmentados e não segmentados para demonstrar o afilamento de *P. taeda*, observaram que o modelo de Clark III et al. (1991) foi o que apresentou melhor desempenho para descrever o perfil do tronco e prever o volume. Além

disso, os modelos de Max e Burkhardt (1976), Parresol et al. (1987) e o polinômio de 5º grau também demonstraram uma performance satisfatória para o conjunto de dados analisado. O polinômio de 5º grau também teve um desempenho satisfatório para descrever a altura comercial e o volume comercial de *P. taeda* em Campo Belo do Sul (SOUZA et al., 2008).

Para *C. lusitanica*, Berhe e Arnoldsson (2008) testaram vários modelos para expressar o perfil do fuste dessa espécie na Etiópia. Os autores observaram que o melhor modelo foi o de Kozak (1988), seguido pelo modelo modificado de Lee et al. (2003) e de Kozak (2004). Ambos foram flexíveis em perceber as diferentes formas do fuste e tiveram uma boa performance na estimativa de diâmetro, destacando-se o modelo de Kozak (1988) por mostrar consistência tanto na estimativa dos diâmetros quanto dos volumes total e comercial.

Dessa forma, o conhecimento sobre o afilamento das árvores é fundamental para o planejamento e execução de atividades florestais, sobretudo na classificação da produção em diferentes sortimentos, os quais influenciam diretamente na rentabilidade de um projeto florestal, e consequentemente, na sua avaliação econômica (COSTA et al., 2016).

#### 4.5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS FLORESTAIS

As atividades florestais apresentam características peculiares, como longo tempo de produção, com alto investimento inicial e retorno a longo prazo; o fator de produção: constituído pelas próprias árvores, e ao cortá-las, o próprio fator de produção está sendo cortado; produção de produtos que nem sempre são quantificáveis economicamente (proteção contra erosão, produção de água, regulação das bacias hidrográficas, abrigo de fauna, estética, estoque de carbono, etc.); dependência dos três fatores de produção (terra, capital e trabalho); dependência de condições naturais (solo, clima, pragas, doenças, etc.); e produção em larga escala, na maioria dos casos. Assim, para obter sucesso nas atividades florestais, é preciso conhecer as forças econômicas, ecológicas, sociais e políticas que norteiam o uso racional dos recursos das florestas (SILVA et al., 2005).

A economia florestal, juntamente com outras áreas da Ciência Florestal, como a mensuração e manejo, possibilita a tomada de decisões mais assertivas e rentáveis, garantindo o sucesso do empreendimento. Portanto, a adoção de critérios para avaliação econômica de projetos florestais, contemplando tanto custos e produção quanto despesas e receitas, é imprescindível para subsidiar essa tomada de decisões racionais e julgar as medidas econômicas (LOPES, 1990; SCHNEIDER, 2004; SILVA et al., 2005).

As atividades florestais dependem dos três fatores de produção: terra, trabalho e capital. A terra pode ser remunerada por meio do aluguel (arrendamento) ou compra, já o trabalho é remunerado através de pagamento salarial. O capital, que pode ser dividido em capital real (máquinas, equipamentos, imóveis, estradas, pontes, árvores, etc.) e capital em dinheiro (pagamentos de salários, serviços, materiais, etc.), é remunerado pelos juros, tanto como recebimento ou pagamento. A taxa de juros aplicada pelo uso do capital, seja este próprio ou de terceiros, é um critério muito importante em análises econômicas, pois permite a equivalência de valores em tempos diferentes (SILVA et al., 2005).

O capital pode ser corrigido pela taxa de juros real e nominal. A taxa de juros real expressa o aumento real do capital, já a taxa de juros nominal representa a taxa de juros real somada à inflação. No cálculo de juros, deve-se definir o período de capitalização (mês, ano, semestre, etc.), que é onde o investimento passa a receber juros (SCHNEIDER, 2004; SILVA et al., 2005).

Uma taxa de juros muito utilizada em avaliação econômica de projetos florestais é a taxa mínima de atratividade (TMA), ou taxa de juros alternativa/custo de oportunidade do capital, que representa o retorno da melhor opção de investimento opcional ao investimento florestal. Em outras palavras, simboliza o quanto se deixa de ganhar por não investir nessa opção alternativa (SILVA et al., 2005).

Um passo importante na avaliação econômica de projetos florestais é a construção do fluxo de caixa, que consiste em considerar o investimento e o retorno do capital no tempo (SILVA et al., 2005). São levantados todos os custos de implantação (ano 0 – enleiramento de galho, locação de talhões, estradas e aceiros, preparo do solo, controle de formiga, mudas, plantio, adubação, etc.), manutenção anual (em diferentes anos – roçada, conservação de estradas, poda, etc.), desbaste (de acordo com o regime de desbaste adotado em cada projeto), colheita e administração (salários, encargos sociais e benefícios), e as receitas, tanto provenientes dos desbastes quanto do corte raso (SCHNEIDER, 2004; SILVA et al., 2005; SILVA; RIBEIRO, 2006). Nesse caso, pode-se optar pela rotação econômica ou ideal de corte, aquela com maior maximização do Valor Presente Líquido (VPL), assim como adotado no trabalho de Silva e Ribeiro (2006). Além disso, também é importante considerar o custo da terra na análise econômica, e a maneira mais comum é através de juros sobre o capital investido, como se fosse um aluguel de terra como custo anual. Outros custos que podem ser considerados no fluxo de caixa, também, são os custos relacionados à depreciação de máquinas e implementos agrícolas (SILVA et al., 2005).

São vários os critérios adotados para a avaliação econômica de projetos florestais, mas os principais são o Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) (REZENDE; OLIVEIRA, 2001; SILVA et al., 2005; VITALE; MIRANDA, 2010), ambos aplicados para projetos com mesmo horizonte de planejamento e considerando uma taxa de desconto. Quando são comparados projetos com durações diferentes, uma das alternativas é o VPL infinito ( $VPL^{\infty}$ ), que se trata do VPL calculado para a replicação de um projeto para um horizonte infinito e que considera o custo da terra no cálculo (SILVA; FONTES, 2005).

## 5. CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO INICIAL DE UM PLANTIO DE *Cupressus lusitanica* Mill. SOB COBERTURA DE *Pinus taeda* L.

### RESUMO

Um plantio sob cobertura é caracterizado pelo plantio de árvores embaixo de uma cobertura arbórea adulta pré-existente. A diferença de idade resulta em diferentes estratos na floresta, e, consequentemente, permite obter multiprodutos em épocas distintas. Esse capítulo teve por objetivo: (i) fornecer uma caracterização dendrométrica inicial para um povoamento de *Cupressus lusitanica* Mill. implantado sob cobertura de *Pinus taeda* L.; (ii) avaliar a eficiência do uso do solo em arranjo multiestrato; (iii) avaliar a existência de correlação entre as variáveis de *Cupressus lusitanica* e a distância das árvores de *Pinus taeda*. Os dados deste estudo foram obtidos em um plantio sob cobertura instalado em um talhão de *P. taeda*., desbastado duas vezes até atingir uma densidade de indivíduos de 60 árv. ha<sup>-1</sup>, aos 23 anos, quando foi plantado *C. lusitanica*, com uma densidade de 1.600 árv. ha<sup>-1</sup>, na região Sul do Brasil. Em 2018, foram mensuradas as informações do diâmetro à altura do peito, área transversal, altura total, volume individual e área de projeção de copa. A área basal e a área de projeção de copa foram somadas para verificar a área de cobertura e o espaço utilizado pelo sistema. Além disso, um critério de distância de 10 metros das árvores de *P. taeda* foi adotado a fim de checar a influência dessas árvores no crescimento de *C. lusitanica*. As espécies *C. lusitanica* e *P. taeda* apresentaram valores médios de dap de 12,6 cm e 58,0 cm, altura total de 12,0 m e 29,8 m, volume individual de 0,1190 m<sup>3</sup> e 3,6612 m<sup>3</sup> e área de copa de 2,4 m<sup>2</sup> e 128,0 m<sup>2</sup>, respectivamente. As duas espécies somaram 36,5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> em área basal e 11.135,8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> em área de copa por hectare, sugerindo um uso eficiente do espaço produtivo pelo plantio sob cobertura, como resultado da sobreposição de copas. Os coeficientes de correlação indicaram uma fraca correlação entre as variáveis de *C. lusitanica* e a distância de *P. taeda*, pois variaram de -0,1 a 0,1. A correlação foi estatisticamente significativa apenas para o diâmetro, apontando um efeito da cobertura de *P. taeda* nessa variável. A não existência de correlação estatisticamente significativa entre a distância de *P. taeda* e o volume individual, altura total e área de projeção de copa de *C. lusitanica* demonstrou que a proximidade ao *P. taeda* não afetou o desempenho nessas variáveis.

**Palavras-chave:** Manejo Florestal; Florestas Multi-Idades; Mensuração Florestal.

### ABSTRACT

An underplanting is characterized by the planting of some trees under a pre-existing layer of old trees. The age difference results in different strata in the forest and, consequently, allows the production of multiproducts. This chapter aimed to i) give an initial dendrometric characterization for a *Cupressus lusitanica* stand implanted under a *Pinus taeda* cover, (ii) assess the land use efficiency by the multilayer arrangement and, (iii) evaluate the existence of correlation among *Cupressus lusitanica* variables and distance from *Pinus taeda* trees. This research's data was obtained from an underplanting system established on a *P. taeda* stand, thinned twice until reaching a stocking of 60 stems ha<sup>-1</sup> at 23 years; then, *C. lusitanica* Mill. was planted in a stocking of 1,600 stems ha<sup>-1</sup>, in the highlands of Southern Brazil. In 2018, samples of these trees were measured in terms of diameter, transversal area, total height, individual volume and crown projection area. Basal area and crown projection area were summed to verify the system's coverage area and used space. Besides, a 10-meters distance

criterion from *P. taeda* trees was applied to check their influence on *C. lusitanica* growth behavior. The species *C. lusitanica* and *P. taeda* presented mean dbh values of 12.6 cm and 58.0 cm, total height of 12.0 m and 29.8 m, individual volume of 0.1190 m<sup>3</sup> and 3.6612 m<sup>3</sup> and crown projection area of 2.4 m<sup>2</sup> and 128.0 m<sup>2</sup>, respectively. The two species summed a basal area of 36.5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> and 11.135.8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> in crown projection area, indicating an efficient use of the productive space by the underplanting system, as a result of crown overlapping. The correlation coefficients indicated a weak correlation between the *C. lusitanica* variables and the distance from *P. taeda*, since they varied from -0.1 to 0.1. The correlation was statistically significant only for diameter, which means that there was an effect of *P. taeda* shelter trees on this variable. The non-existence of statistically significant correlation between *C. lusitanica* total volume, total height and crown projection area and the distance from *P. taeda* implied that the vicinity to *P. taeda* did not affect *C. lusitanica* growth in terms of these variables.

**Keywords:** Forest Management; Multiaged Forests; Forest Mensuration.

## INTRODUÇÃO

As práticas de manejo florestal ao redor do mundo têm focado no desenvolvimento de monoculturas para produzir madeira ou outros produtos em larga escala, de maneira rápida e barata. Entretanto, as expectativas sociais e ambientais têm mudado ao longo dos anos (KELTY, 2006; PUKKALA; GADOW, 2012; O'HARA, 2014), exigindo o desenvolvimento e/ou aplicação de outros métodos que combinem produção de madeira com aumento da biodiversidade e otimização do espaço produtivo.

Nesse sentido, uma abordagem do manejo florestal que permite a obtenção de multiprodutos e o alcance de objetivos ambientais, recreativos e estéticos é o manejo através da cobertura florestal contínua (*continuous cover forest*). Esse método consiste na manutenção de uma cobertura florestal e no corte seletivo para promover a regeneração natural, reduzindo o impacto de corte raso e as mudanças que essa técnica causa nos habitats e paisagens florestais (MASON et al., 1999; PUKKALA; GADOW, 2012).

Na cobertura florestal contínua, um dos sistemas silviculturais adotados é o sistema sob cobertura (*shelterwood*), onde as florestas são regeneradas sob um estrato existente que é removido gradualmente (PUKKALA; GADOW, 2012). Esse sistema tem sido mundialmente aplicado para promover a regeneração, natural ou artificial, de espécies de interesse de acordo com o tipo de ecossistema (BERGQVIST, 1999).

No caso da regeneração artificial, essa técnica pode ser chamada de plantio sob cobertura (*underplanting*) ou plantio de enriquecimento (*enrichment planting*). Tal técnica consiste no plantio de árvores embaixo de uma cobertura existente, como parte de um processo de regeneração da floresta, para aumentar a proporção de uma determinada espécie da



regeneração natural no sub-bosque, para enriquecer e diversificar a estrutura da floresta ou mesmo para introduzir uma nova espécie de interesse (SCOLFORO, 1998; KERR; HAUFE, 2016). Esse termo se refere, ainda, ao estabelecimento de um sub-bosque jovem sob a cobertura de um estrato antigo, ou seja, obrigatoriamente há a presença de, pelo menos, dois estratos na floresta (KERR; HAUFE, 2016).

São vários os trabalhos utilizando essa técnica na América do Norte (LOFTIS, 1990; GARDINER; YEISER, 2006; PAQUETTE et al., 2006; BROSE, 2011; PITT et al., 2011; DEY et al., 2012), na Europa (HOLGEN; HANELL, 2000; STRAND et al., 2006; KERR; HAUFE, 2016; KNAPP et al., 2016) e Austrália (RICHARDS, 1967; BEVEGE; RICHARDS, 1970; SIMPSON; OSBORNE, 2006), por exemplo.

No Brasil, são comuns os plantios de enriquecimento, como adotado nos trabalhos de Schulze (2008), Keefe et al. (2009) e Venturoli et al. (2011). Existe o registro de um plantio de *Eucalyptus dunnii* Maiden sob cobertura de *Pinus taeda*, duas espécies exóticas destinadas à produção madeireira, onde o principal objetivo da cobertura de *Pinus* foi proteger o componente *Eucalyptus* contra geadas (DOBNER Jr et al., 2009).

Além disso, outros benefícios da adoção de um plantio sob cobertura estão relacionados à proteção do sub-bosque contra condições climáticas desfavoráveis, manutenção da umidade do solo, redução de erosão e melhor aproveitamento de nutrientes do que em corte raso (MASON et al., 1999; KELTY, 2006; DEY et al., 2012; PUKKALA; GADOW, 2012). Outra grande vantagem desse sistema é o melhor aproveitamento do espaço produtivo, pois a colheita das árvores de cobertura é feita quando o estrato inferior está bem estabelecido (DOBNER Jr. et al., 2009). Soma-se a isso o fato de as árvores adultas remanescentes aumentarem seu incremento, produzindo toras de maior diâmetro e com alta qualidade (MASON et al., 1999; HANELL et al., 2000), o que possibilita uma maior rentabilidade econômica do sistema.

Com relação às desvantagens, pode-se mencionar o aumento da complexidade das práticas de manejo, competição entre as plantas, danos causados nas árvores do estrato inferior no momento do corte das árvores de cobertura, dificuldade de estimar o crescimento (MASON et al., 1999; STRAND et al., 2006; DOBNER Jr. et al., 2009), e possível impacto das árvores de cobertura no desempenho em variáveis dendrométricas das árvores do sub-bosque.

Nesse sentido, estudos que abordem a caracterização dendrométrica de plantios sob cobertura se fazem imprescindíveis para criar uma base de dados sobre o sistema no Brasil e para verificar o potencial do sistema. Assim, esse capítulo teve por objetivo: (i) descrever dendrometricamente um povoamento de *C. lusitanica* implantado sob cobertura de *P. taeda* aos 13 anos de idade; (ii) avaliar a eficiência do uso do solo em arranjo multiestrato; (iii) avaliar

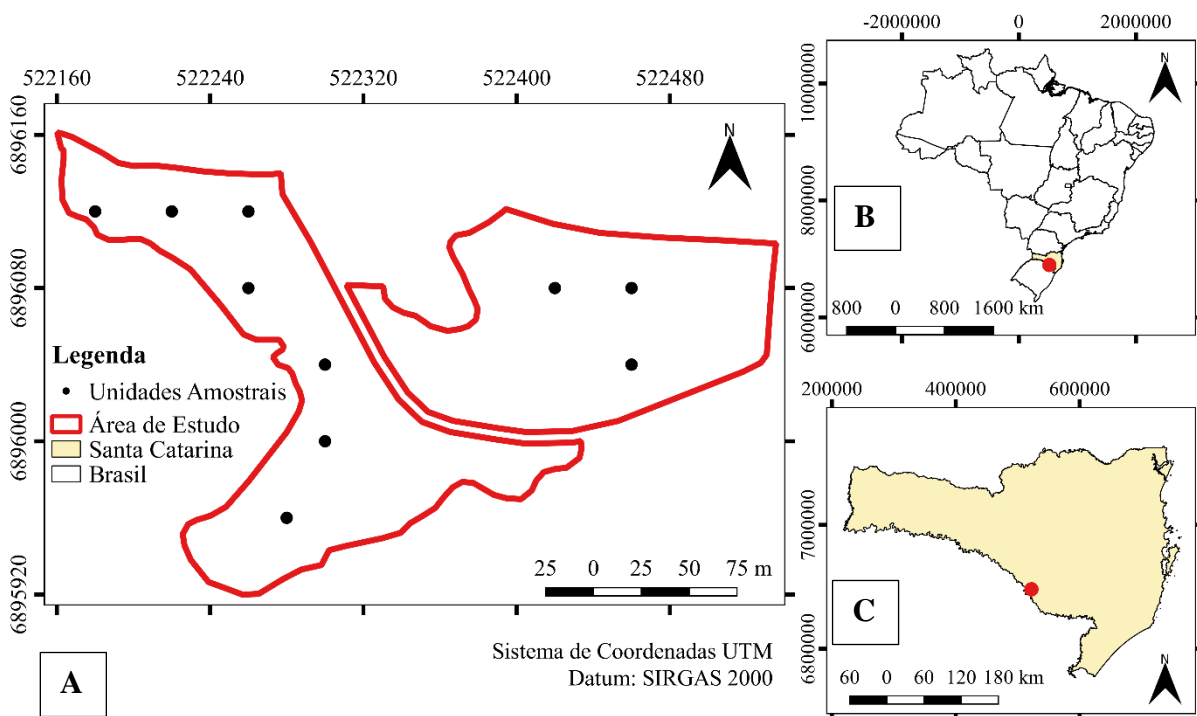
a existência de correlação entre as variáveis de *Cupressus lusitanica* e a distância das árvores de *Pinus taeda*.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição da área

O estudo foi conduzido em uma área experimental implantada no município de Capão Alto, Sul do Estado de Santa Catarina, Brasil (28° 03' 35'' S e 50° 46' 22'' O), em uma área de aproximadamente 2 ha (Figura 1). O clima é classificado como subtropical úmido com verão temperado, com temperatura média anual de 13°C, uma altitude em torno de 1.000 m e precipitação bem distribuída durante o ano, com média de 1.750 mm (ALVARES et al., 2013).

Figura 1 – Localização da área de estudo e das unidades amostrais instaladas. A) Área de estudo e unidades amostrais; B) Brasil; C) Santa Catarina.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O componente do sistema *P. taeda* foi plantado em 1982 e desbastado como plantio comercial até 2005, ou seja, primeiro desbaste, sistemático e seletivo, aos 10 anos e segundo desbaste, sistemático e seletivo, aos 17 anos e colheita parcial aos 23 anos, quando os povoamentos das proximidades foram colhidos. Um dos povoamentos foi selecionado para esse experimento, submetido a colheita parcial com densidade remanescente de 60 árvores ha<sup>-1</sup>. O

segundo componente, *C. lusitanica*, foi plantado nesse mesmo ano sob as árvores de *Pinus*, usando um espaçamento de 2,5 x 2,5 m (1.600 árv ha<sup>-1</sup>). A Figura 2 ilustra a atual situação do povoamento, com a formação dos dois estratos pelas espécies.

Figura 2 – Ilustração dos dois estratos formados por *Cupressus lusitanica* (estrato inferior) e *Pinus taeda* (estrato superior).

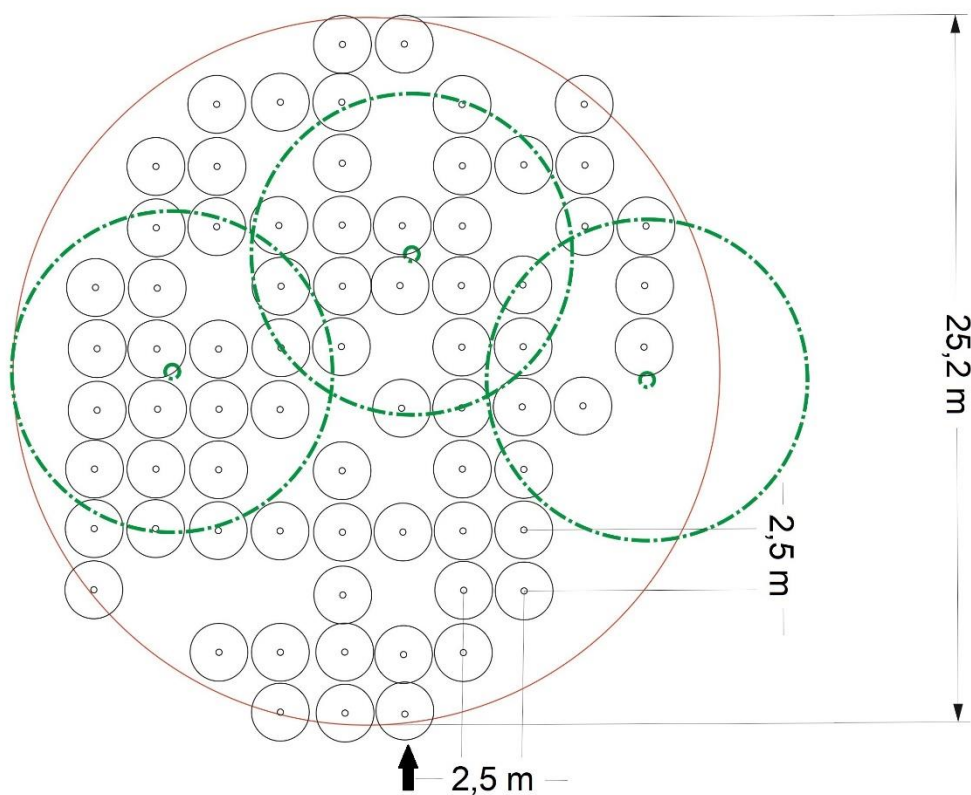


Fonte: A autora, 2018.

### Coleta de dados

Foi feito inventário florestal a partir da instalação de 10 unidades amostrais circulares temporárias de 500 m<sup>2</sup> usando como processo de amostragem a amostragem sistemática e o método de área fixa (Figura 1). Foram mensuradas 722 árvores de *C. lusitanica* e 30 árvores de *P. taeda*, obtendo-se o Diâmetro à Altura do Peito (dap), altura total e raios de copa. Foram mensurados os diâmetros de todos os indivíduos de *C. lusitanica* e *P. taeda* nas parcelas de campo. A altura total foi aferida em todas as árvores de *C. lusitanica* localizadas na linha central de cada parcela mais as cinco árvores dominantes, totalizando 132 árvores, e em todas as árvores de *P. taeda* encontradas nas parcelas (Figura 3). O dap e as medições de altura foram obtidos com uma fita diamétrica e com um hipsômetro digital tipo Vertex IV®, respectivamente.

Figura 3 – Croqui ilustrando uma das parcelas mensuradas durante o inventário conduzido no plantio sob cobertura.



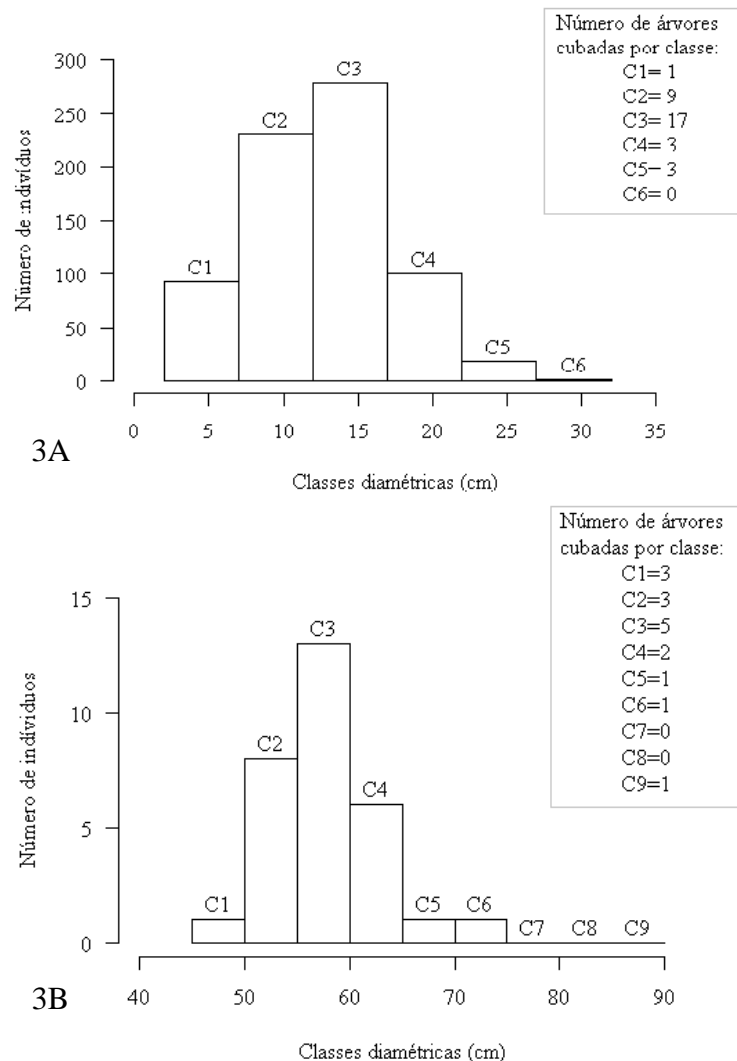
Nota: o círculo em vermelho representa a delimitação da parcela; os círculos com linha tracejada em verde representam a área de copa ocupada pelas árvores de *P. taeda*; os círculos com linha preta representam a área de copa das árvores de *C. lusitanica*; a seta preta indica a linha onde foram mensuradas as alturas totais e raios de copa das árvores de *C. lusitanica*. Fonte: VAZ, Douglas Rufino, 2019.

Das copas das árvores foram medidos quatro raios, a partir do tronco, seguindo a direção dos pontos cardeais. Os raios de copa foram medidos em aproximadamente 13% das árvores de *C. lusitanica* (das árvores localizadas na linha central, totalizando 94 indivíduos) e de todas as árvores de *P. taeda* usando um telêmetro a laser TruPulse 200® (Figura 3).

Além disso, para obtenção do volume individual das árvores, com base na distribuição diamétrica de ambas espécies pelo critério empírico (Figura 4), 33 árvores de *C. lusitanica* e 16 árvores de *Pinus taeda* foram cubadas nas seguintes posições do fuste: 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m, 0,9 m, 1,3 m, 2 m e, depois disso, a cada 1 metro até o topo da árvore, usando uma suta. Depois disso, o volume de cada seção foi calculado com base na fórmula de Smalian e somado ao volume do cone da árvore. Então, cinco modelos volumétricos foram testados para o conjunto de dados (Tabela 1) e a qualidade deles foi analisada em termos da distribuição dos resíduos, do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), erro padrão da estimativa absoluto e

relativo (%), valor de F, Critério de Informação Akaike (AIC) e Critério de Informação Bayesiano (BIC). Os melhores resultados são aqueles com maior valor de  $R^2_{aj}$ , menor erro padrão da estimativa (absoluto e relativo), maior valor de F e menores valores de AIC e BIC.

Figura 4 – A) Distribuição diamétrica de *Cupressus lusitanica* e B) *Pinus taeda* com base nos dados obtidos em inventário e das árvores cubadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Tabela 1 – Modelos avaliados para estimar o volume individual de *Pinus taeda* e *Cupressus lusitanica* em plantio sob cobertura localizado em Capão Alto, Santa Catarina.

| Autores         | Modelos   |
|-----------------|---|
| Husch           | $Ln v_i = \beta_0 + \beta_1 \ln d_i + e_i$  |
| Spurr           | $v_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 h_i + e_i$   |
| Schumacher-Hall | $Ln v_i = \beta_0 + \beta_1 \ln d_i + \beta_2 \ln h_i + e_i$                              |
| Meyer           | $v_i = \beta_0 + \beta_1 d_i + \beta_2 d_i^2 + \beta_3 d_i h_i + \beta_4 d_i^2 h_i + e_i$ |
| Stoate          | $v_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 + \beta_2 d_i^2 h_i + \beta_3 h_i + e_i$                   |

Nota:  $v_i$  = volume individual da  $i$ -ésima árvore, em  $m^3$ ;  $d_i$  = DAP da  $i$ -ésima árvore, em cm;  $h_i$  = altura total da  $i$ -ésima árvore, em m;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  e  $\beta_4$  = coeficientes das equações;  $\ln$  = logaritmo natural e  $e_i$  = erro aleatório.

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

A área transversal, área basal e volume total por hectare foram obtidos para ambas as espécies segundo as fórmulas dendrométricas disponíveis no livro de Machado e Figueiredo Filho (2009). Já a área de projeção de copa (1) foi obtida através da seguinte fórmula.

$$AC = \left[ \left( \frac{R_1 * R_2 * \pi}{4} \right) + \left( \frac{R_2 * R_3 * \pi}{4} \right) + \left( \frac{R_3 * R_4 * \pi}{4} \right) + \left( \frac{R_4 * R_1 * \pi}{4} \right) \right] \quad (1)$$

Onde AC é a área de projeção de copa, em m<sup>2</sup>;  $R_1 \dots R_4$  representam os raios de copa, em m.

Além dessas mensurações, também foi feito um croqui localizando as árvores de *P. taeda*, tomando a distância delas em relação ao centro da parcela, conforme Figura 3, e a posição das árvores de *C. lusitanica* foi determinada com base no espaçamento de plantio.

### Análise estatística

Os dados foram analisados no software estatístico R® (R CORE TEAM, 2019). As distribuições diamétrica e de altura para ambas as espécies foram calculadas através da fórmula de Sturges. O diâmetro dominante e altura dominante de *C. lusitanica* foram obtidos pela média do diâmetro e da altura das 100 árvores com maior diâmetro por hectare, respectivamente. Para o *P. taeda*, como foram mensuradas em média 3 árvores por parcela, o diâmetro e altura dominantes correspondem às médias gerais para a espécie, ou seja, 60 árv ha<sup>-1</sup>.

Os modelos volumétricos foram testados no software R também usando a função *linear model (lm)*, e os modelos logaritmizados (Husch e Schumacher-Hall) tiveram sua discrepância corrigida pelo fator de Meyer e sua análise de variância recalculada para comparação com os demais.

A área de projeção de copa foi somada para ambas as espécies para verificar a área ocupada pelo sistema. Além disso, a correlação entre as variáveis de *C. lusitanica* e a distância do *P. taeda* foi verificada por meio da correlação de Pearson, a 5% de significância, usando como critério um raio de distância de 10 metros (adotada em alguns estudos de sistema sob cobertura, como o de Strand et al., 2006). Tais resultados foram plotados em termos de distância usando gráficos de dispersão. Foi, também, calculada a precisão do inventário a 95% de probabilidade e intervalos de confiança para o volume de ambas as espécies, utilizando as fórmulas referentes à população finita de acordo com Soares et al. (2011).

## RESULTADOS

De acordo com os cálculos da precisão do inventário, a quantidade de unidades amostrais foi suficiente para atender a um erro de amostragem de 20% com confiabilidade de 90% de probabilidade para o volume de *C. lusitanica* (8 unidades amostrais necessárias) e *P. taeda* (7 unidades amostrais necessárias), considerando o tamanho das amostras que foi de 500 m<sup>2</sup>. O intervalo de confiança do volume da média estimada para a floresta para *C. lusitanica* é  $IC = 12,54 \pm 1,14$  m<sup>3</sup> a 90% de probabilidade. Já para *P. taeda*, o intervalo de confiança é  $IC = 10,98 \pm 1,70$  a 90% de probabilidade.

Os modelos que apresentaram o melhor desempenho na estimativa de volume individual de *P. taeda* e *C. lusitanica* para esse conjunto de dados foram Schumacher-Hall e Spurr, respectivamente, conforme Tabela 2. Assim, esses dois modelos foram escolhidos para estimar o volume das demais árvores das duas espécies. A distribuição dos resíduos dos modelos testados para *P. taeda* e *C. lusitanica* pode ser visualizada nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Tabela 2 – Desempenho dos modelos volumétricos testados para a estimativa do volume individual de *Pinus taeda* e *Cupressus lusitanica* em plantio sob cobertura (Continua).

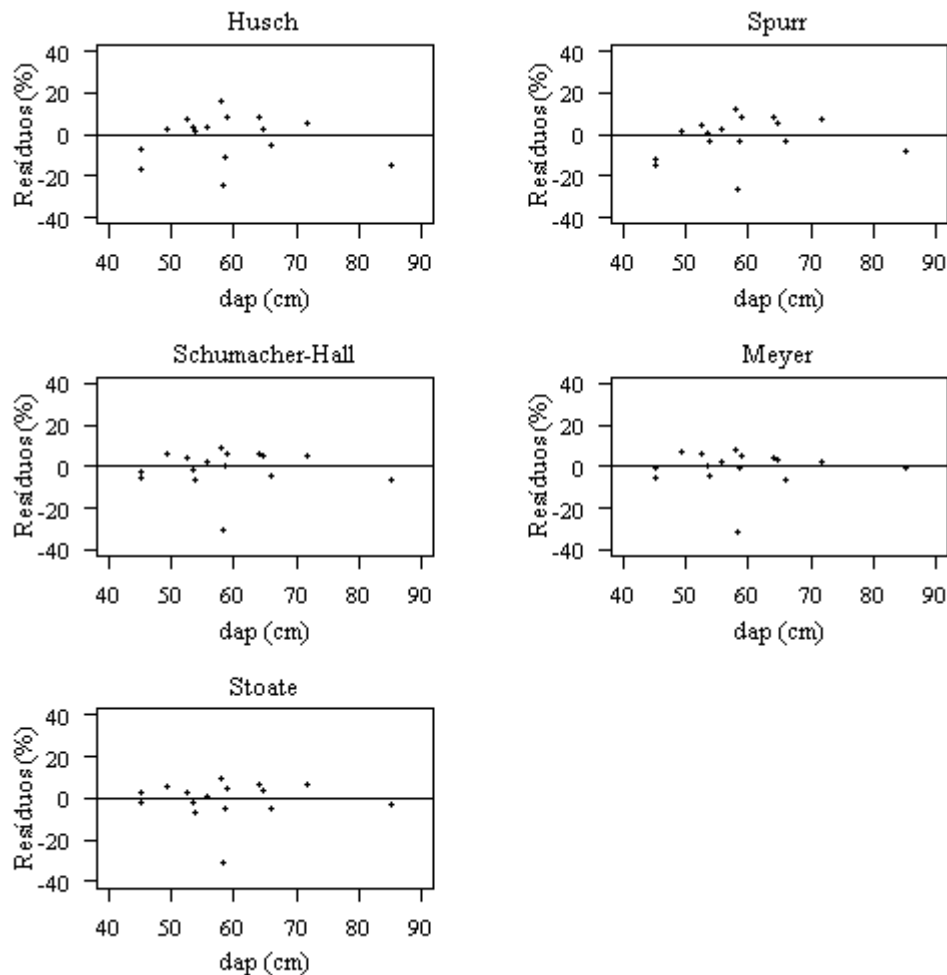
| <i>Pinus taeda</i>          |          |           |                  |            |            |
|-----------------------------|----------|-----------|------------------|------------|------------|
| Parâmetros                  | Husch    | Spurr     | Schumacher-Hall* | Meyer      | Stoate     |
| $\beta_0$                   | -56,271  | -0,954    | -8,96            | -3,4376    | -5,61      |
| $\beta_1$                   | 16,987   | 0,0000263 | 1,539            | 0,3212     | 0,1035     |
| $\beta_2$                   |          |           | 1,1802           | -0,0047    | -0,002092  |
| $\beta_3$                   |          |           |                  | -0,0061    | 0,1181     |
| $\beta_4$                   |          |           |                  | 0,000150   |            |
| <b>R<sup>2</sup> aj</b>     | 0,85     | 0,88      | 0,90             | 0,90       | 0,89       |
| <b>Syx (m<sup>3</sup>)</b>  | 0,42     | 0,36      | 0,34             | 0,34       | 0,34       |
| <b>Syx%</b>                 | 11,43    | 9,80      | 9,13             | 9,18       | 9,39       |
| <b>F</b>                    | 54,09    | 121,3     | 75,77            | 35,83      | 45,06      |
| <b>AIC</b>                  | -21,81   | 16,87     | -26,05           | 16,90      | 17,05      |
| <b>BIC</b>                  | -19,49   | 19,18     | -22,96           | 21,54      | 20,92      |
| <i>Cupressus lusitanica</i> |          |           |                  |            |            |
| Parâmetros                  | Husch    | Spurr*    | Schumacher-Hall  | Meyer      | Stoate     |
| $\beta_0$                   | -8,31049 | 0,008828  | -9,3848          | 0,0009234  | -0,0005763 |
| $\beta_1$                   | 2,18170  | 0,0000318 | 1,8222           | 0,001213   | 0,0006727  |
| $\beta_2$                   |          |           | 0,849            | 0,00002588 | 0,00003008 |
| $\beta_3$                   |          |           |                  | 0,00002325 | 0,0003926  |
| $\beta_4$                   |          |           |                  | 0,0000318  |            |
| <b>R<sup>2</sup> aj</b>     | 0,95     | 0,98      | 0,91             | 0,98       | 0,98       |
| <b>Syx (m<sup>3</sup>)</b>  | 0,014    | 0,0084    | 0,0084           | 0,0088     | 0,0086     |

Tabela 2 – Desempenho dos modelos volumétricos testados para a estimativa do volume individual de *Pinus taeda* e *Cupressus lusitanica* em plantio sob cobertura (Conclusão).

|             |        |         |        |         |         |
|-------------|--------|---------|--------|---------|---------|
| <b>Syx%</b> | 15,71  | 9,03    | 9,41   | 9,44    | 9,27    |
| <b>F</b>    | 338,41 | 2104    | 950,45 | 481,4   | 666,3   |
| <b>AIC</b>  | -36,96 | -217,36 | -53,64 | -211,79 | -213,86 |
| <b>BIC</b>  | -32,47 | -212,87 | -47,65 | -202,81 | -206,38 |

Nota:  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  e  $\beta_4$  = coeficientes dos modelos;  $R^2_{aj}$  = coeficiente de determinação ajustado; Syx = erro padrão da estimativa; Syx% = erro padrão em porcentagem; F = valor F; AIC = Critério de Informação Akaike; BIC = Critério de Informação Bayesiano. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

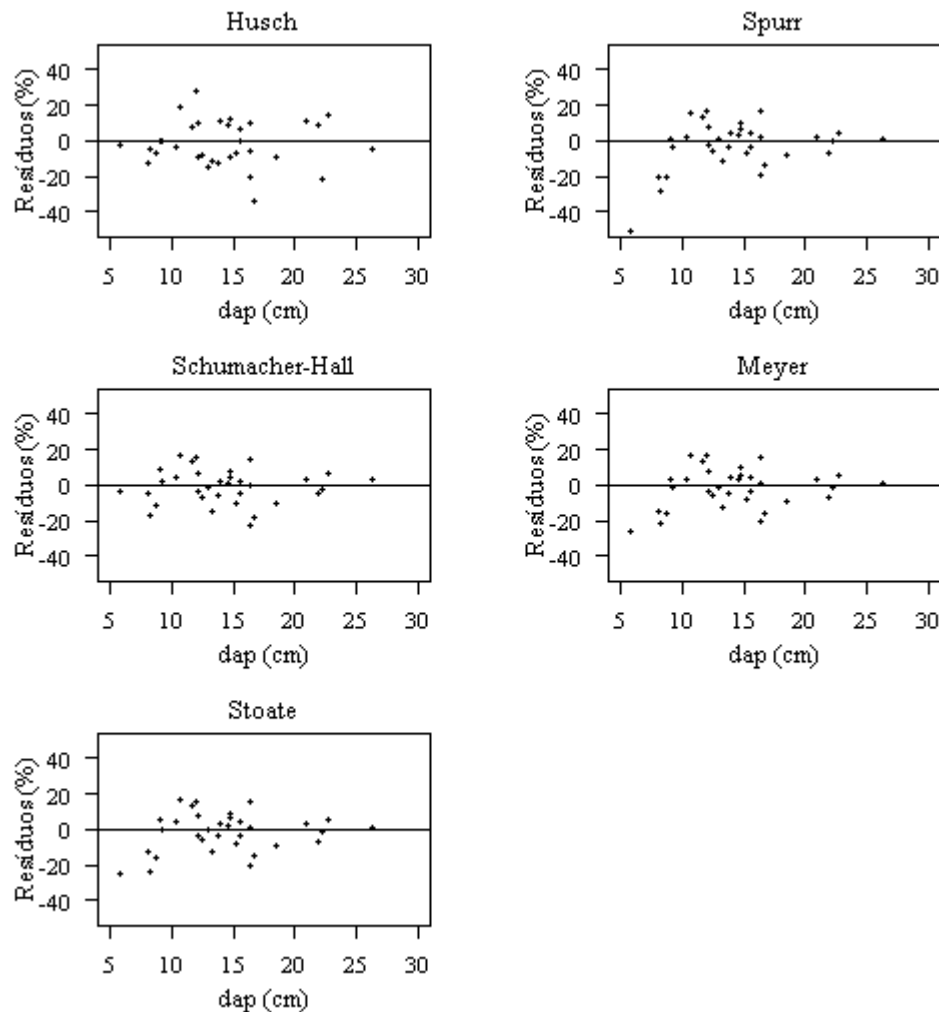
Figura 5 – Distribuição dos resíduos dos modelos testados para a estimativa do volume de *Pinus taeda*.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.



Figura 6 – Distribuição dos resíduos dos modelos testados para a estimativa do volume de *Cupressus lusitanica*.



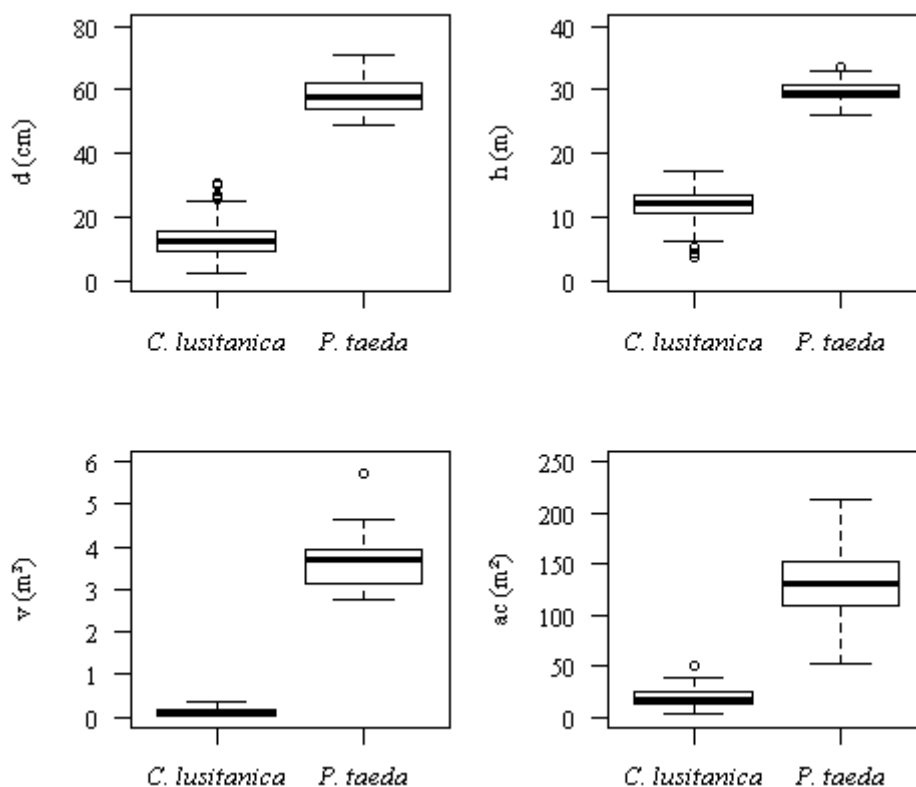
Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

De fato, Schumacher-Hall e Spurr são modelos amplamente utilizados para a estimativa de volume de espécies florestais (SCHNEIDER et al., 1997; AZEVEDO et al., 2011; MÜLLER et al., 2014; RACHID et al., 2014; MENDONÇA et al., 2015; RODRIGUES et al., 2017; PERTILLE et al., 2018; TSEGA et al., 2019), devido a suas características estatísticas e fácil ajuste (CAMPOS; LEITE, 2013).

A variação em dap, altura, volume individual e área de copa estão representados na Figura 7. Nos gráficos de caixa (*boxplots*), é possível observar a estatística descritiva de cada variável (valores máximo e mínimo, representados pelas “caudas” da caixa), o primeiro e terceiro quartis (a base e o topo da caixa, respectivamente), a mediana, representada pela linha em negrito e a distribuição de 50% dos dados, localizado entre o primeiro e terceiro quartis.

Nesse gráfico, também podem ser visualizados os *outliers*, em círculos, que são dados discrepantes do padrão dos demais.

Figura 7 – Distribuição dos dados de *Cupressus lusitanica* e *Pinus taeda* em um plantio sob cobertura.



Nota: d = dap (cm); h = altura total (m); v = volume individual (m³) e ac = área de copa (m²). Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

A espécie de cobertura *P. taeda* apresentou valores superiores em todas as variáveis analisadas, com destaque para o volume individual e área de copa. Esse resultado já era esperado, devido à diferença de idade das espécies adotadas nesse sistema sob cobertura, assim como mostram os valores médios das variáveis dendrométricas (Tabela 3).

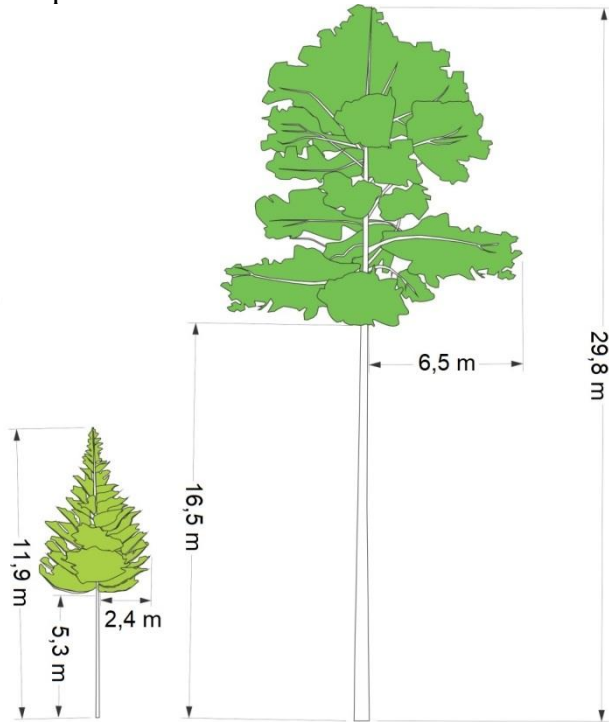
Tabela 3 – Valores médios de diâmetro à altura do peito, altura, volume individual e área de copa para *Cupressus lusitanica* e *Pinus taeda*.

|     | <i>Cupressus lusitanica</i> | <i>Pinus taeda</i> |
|-----|-----------------------------|--------------------|
| dap | 12,6                        | 58,0               |
| h   | 12,0                        | 29,8               |
| v   | 0,1190                      | 3,6612             |
| ac  | 2,4                         | 128,0              |

Nota: dap = diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total (m); v = volume individual (m³ arv<sup>-1</sup>) e ac = área de copa (m²). Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Em termos de altura, a Figura 8 ilustra as diferenças entre as duas espécies, onde *C. lusitanica* ainda não atinge a base da copa das árvores de *P. taeda*, comprovando o tamanho significativo destas na cobertura. As distribuições do dap e altura total estão dispostas na Figura 9.

Figura 8 – Ilustração das alturas médias e raio de projeção de copa de *Cupressus lusitanica* e *Pinus taeda* em um plantio sob cobertura.



Fonte: VAZ, Douglas Rufino, 2019.

Figura 9 – Distribuição diamétrica para *Cupressus lusitanica* (A), *Pinus taeda* (B) e distribuição de altura para *Cupressus lusitanica* (C) e *Pinus taeda* (D) (Continua).

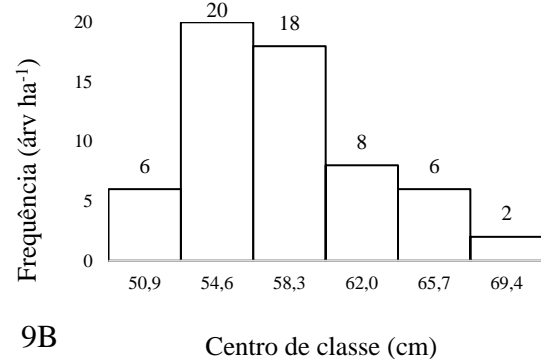
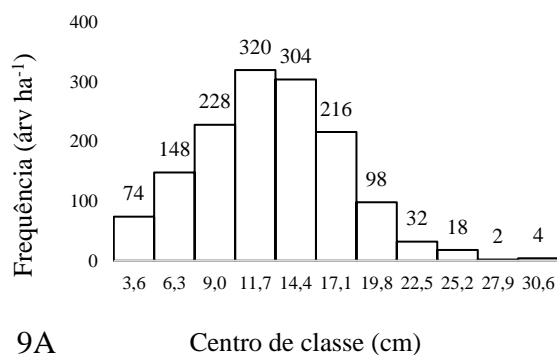
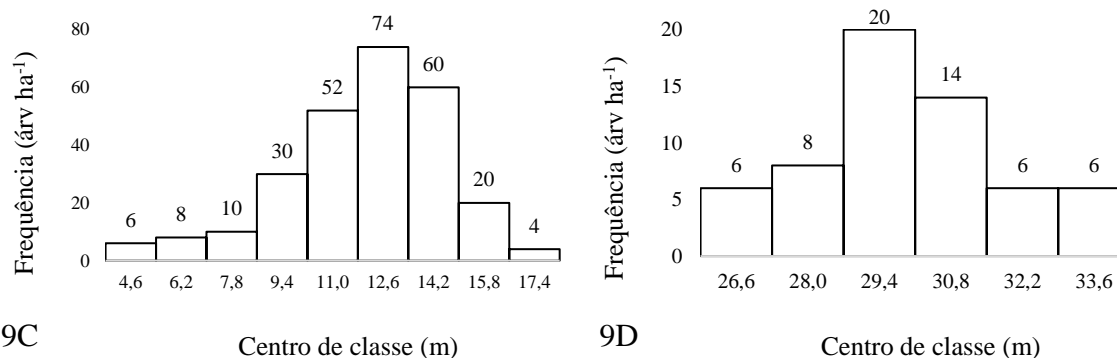


Figura 9 – Distribuição diamétrica para *Cupressus lusitanica* (A), *Pinus taeda* (B) e distribuição de altura para *Cupressus lusitanica* (C) e *Pinus taeda* (D) (Conclusão).



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

A Tabela 4 traz o resultado das duas espécies em termos de área de copa, área basal e volume. Em termos de área basal, *C. lusitanica* mostrou um valor maior que *P. taeda*, devido ao maior número de árvores por hectare, mas *P. taeda* apresentou uma maior soma de área de projeção de copa por hectare.

Tabela 4 – Densidade, área basal, área de copa, volume total, altura e diâmetros dominantes de *Cupressus lusitanica* e *Pinus taeda*.

|                      | Dens.        | G           | AC             | AC*             | V            | h <sub>100</sub>   |     | d <sub>100</sub>   |     |
|----------------------|--------------|-------------|----------------|-----------------|--------------|--------------------|-----|--------------------|-----|
|                      |              |             |                |                 |              | Variação           | s   | Variação           | s   |
| <i>C. lusitanica</i> | 1.444        | 20,6        | 1.726,4        | 3.452,5         | 171,9        | 13,6(10,9 – 17,3)  | 1,5 | 20,9(16,0 – 30,6)  | 2,9 |
| <i>P. taeda</i>      | 60           | 15,9        | 3.841,5        | 7.682,9         | 219,7        | 29,8(26,0 – 33,7)* | 2,1 | 58,0(49,0 – 70-7)* | 4,7 |
| <b>Soma</b>          | <b>1.504</b> | <b>36,5</b> | <b>5.567,9</b> | <b>11.135,8</b> | <b>391,4</b> |                    |     |                    |     |

Nota: Dens. = densidade (árv ha<sup>-1</sup>); G = área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); AC = soma da área de projeção de copa (m<sup>2</sup>); AC\* = soma da área de projeção de copa (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); V = volume total (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>); h<sub>100</sub> = altura dominante; d<sub>100</sub> = diâmetro dominante; variação = média (mínimo e máximo); s = desvio padrão (m para altura e cm para diâmetro); \*valores referentes a 60 árvores ha<sup>-1</sup>. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

A soma de área de projeção de copa por hectare corrobora com a perspectiva de melhor eficiência do uso do espaço produtivo por sistemas multiestratos. Mesmo com apenas 60 árvores ha<sup>-1</sup> em contraste a 1.444 árvores ha<sup>-1</sup>, *P. taeda* mostrou uma soma de área de projeção de copa por hectare duas vezes maior. A soma da área de projeção de copa por hectare das duas espécies ultrapassa 10.000 m<sup>2</sup>, indicando maior eficiência no uso do espaço produtivo comparado ao sistema tradicional com apenas um estrato devido à sobreposição de copas das espécies.

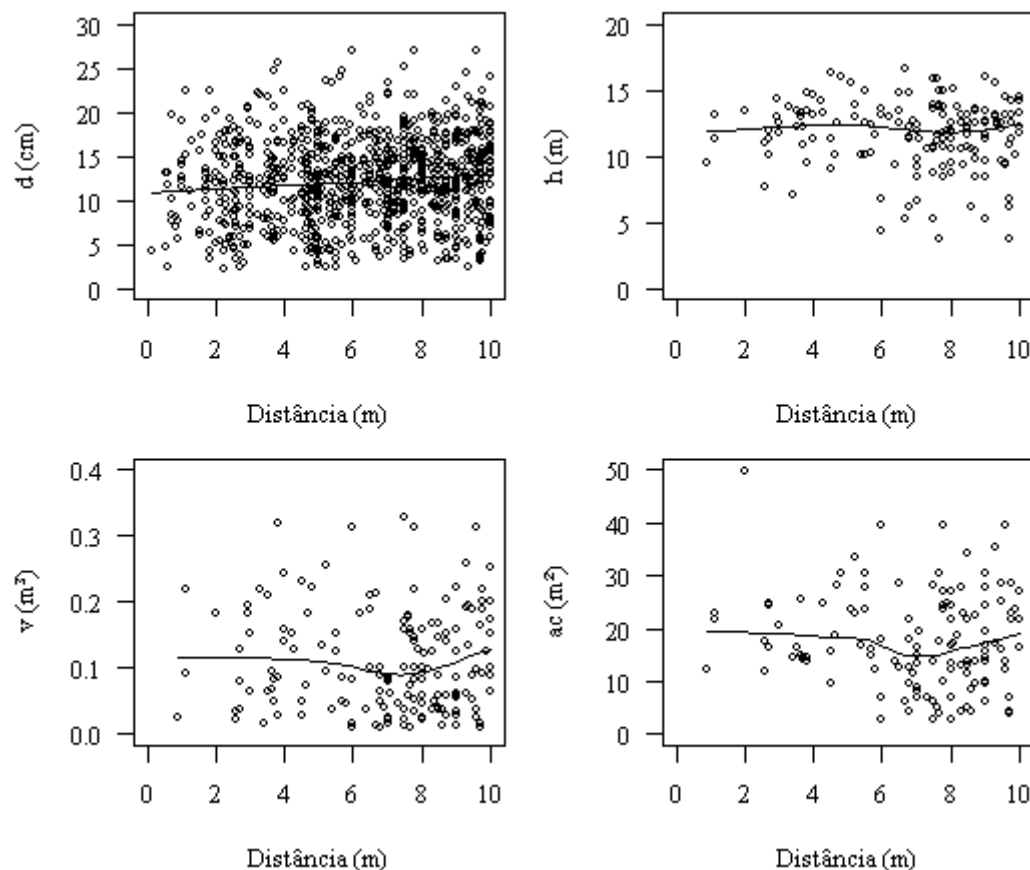
Os coeficientes de correlação entre as variáveis de *C. lusitanica* e distância de *P. taeda* estão dispostos na Tabela 5. Não há tendência evidente entre as variáveis e a distância, sendo que uma correlação significativa foi observada apenas para o dap. A Figura 10 mostra a distribuição das variáveis de *C. lusitanica* ao longo de 10 metros de distância das árvores de *P. taeda*.

Tabela 5 – Valores de correlação para dap (cm), altura (m), volume individual (m<sup>3</sup>) e área de projeção de copa (m<sup>2</sup>) de *Cupressus lusitanica* em função da distância de *Pinus taeda*.

| 10 m distância  |       |      |       |                  |          |         |                   |
|-----------------|-------|------|-------|------------------|----------|---------|-------------------|
| Variáveis       | r     | g.l. | t     | t <sub>tab</sub> | $\alpha$ | p-valor | Conclusão         |
| dap x distância | 0,10  | 886  | 2,99  | 1,96             | 0,05     | 0,0028  | Significante      |
| h x distância   | -0,06 | 160  | -0,85 | 1,97             | 0,05     | 0,3933  | Não significativa |
| v x distância   | -0,01 | 160  | -0,13 | 1,97             | 0,05     | 0,8904  | Não significativa |
| ac x distância  | -0,10 | 126  | -1,16 | 1,97             | 0,05     | 0,2458  | Não significativa |

Note: dap = diâmetro a altura do peito (cm); h = altura total (m); v = volume individual (m<sup>3</sup> arv<sup>-1</sup>); ac = área de projeção de copa (m<sup>2</sup>); r = coeficiente de correlação; g.l. = graus de liberdade; t = valor *t* calculado; t<sub>tab</sub> = valor *t* da tabela de Student;  $\alpha$  = valor de significância; p-valor = valor de significância da correlação. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 10 – Distribuição das variáveis de *Cupressus lusitanica* ao longo do critério de 10 metros de distância de *Pinus taeda*.



Nota: d – diâmetro a altura do peito (cm), h – altura total (m), v – volume individual (m<sup>3</sup>), ac – área de projeção de copa (m<sup>2</sup>). Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Os valores não significantes de correlação entre as variáveis de *C. lusitanica* e o critério de 10 metros de distância de *P. taeda* demonstram que *C. lusitanica* não teve tendência a apresentar perdas em altura, volume e área de projeção de copa próximo às árvores de *P. taeda*. A única variável que foi afetada foi o dap de *C. lusitanica*, o qual teve uma leve tendência a aumentar à medida que se afastou da cobertura de *P. taeda*.

## DISCUSSÃO

De maneira geral, *C. lusitanica* apresentou valores médios de diâmetro e altura total menores que em plantios puros com idades similares (Tabela 6), especialmente em comparação aos estudos de Venturini et al. (2018) e Souza et al. (2018), que foram desenvolvidos em talhões da espécie na mesma região geográfica. De acordo com a *Farm Forestry New Zealand* (2005), na Nova Zelândia, espera-se que os plantios dessa espécie apresentem um dap médio entre 15 a 25 cm aos 10 anos em bons sítios. Na Tabela 6, estudos com árvores mais jovens dessa espécie já apresentavam uma média de dap igual ou superior a do presente trabalho.

Tabela 6 – Variáveis dendrométricas de *Cupressus lusitanica* encontradas em outros estudos com plantios puros.

| País       | Idade | Densidade | d    | h    | G    | h <sub>100</sub> | V     | Autores                  |
|------------|-------|-----------|------|------|------|------------------|-------|--------------------------|
| Etiópia    | 10    | 1.503     | 12,6 | 18,2 | 4,7  |                  |       | Asaye; Zewdie (2013)     |
| Costa Rica | 10    | 1.293     | 15,5 |      | 24,1 | 14,0             |       | Chinchilla et al. (2011) |
| Costa Rica | 10    | 1.427     | 16,8 |      | 27,8 | 14,9             |       | Chinchilla et al. (2011) |
| Etiópia    | 12    |           |      |      |      | 18,8             |       | Mamo; Sterba (2006)      |
| Brasil     | 13    | 1.444     | 12,6 | 12,0 | 20,6 | 13,6             | 171,9 | Presente Estudo          |
| Etiópia    | 13    |           |      |      |      | 19,2             |       | Teshome; Petty (2000)    |
| Etiópia    | 14    |           |      |      |      | 20,4             |       | Mamo; Sterba (2006)      |
| Brasil*    | 14    | 833       | 20,0 | 11,6 |      |                  |       | Souza et al. (2018)      |
| Etiópia    | 15    | 803       |      |      |      |                  | 220,0 | Lemenih et al. (2004)    |
| Brasil*    | 15    | 833       | 20,0 | 20,0 | 28,2 |                  |       | Venturini et al. (2018)  |
| Etiópia    | 16    | 1.250     |      |      | 42,5 | 19,0             | 296,5 | Mamo; Adilo (2004)       |
| Costa Rica | 18    | 408       | 28,0 | 19,2 |      |                  |       | Roque et al. (2010)      |
| Tanzânia   | 19    | 1.690     | 16,4 | 20,3 | 43,0 |                  | 349,0 | Malimbwi et al. (1992)   |
| Tanzânia   | 23    |           | 25,0 | 22,4 | 34,1 |                  | 350,2 | Luoga et al. (1994)      |
| Tanzânia   | 23    |           | 23,4 | 22,1 | 35,2 |                  | 352,4 | Luoga et al. (1994)      |
| Etiópia    | 27    | 444       | 31,5 | 18,6 |      |                  |       | Alem et al. (2015)       |

Nota: Idade (anos); Densidade (árv ha<sup>-1</sup>), dap (cm); h = altura total (m); G = área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); h<sub>100</sub> = altura dominante (m); V = volume total (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>); \* Estudos conduzidos na mesma região geográfica do presente estudo. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Estudos sobre o crescimento em diâmetro e espaçamento de *C. lusitanica* observaram a tendência esperada que as árvores com maior espaço apresentassem maior crescimento, como discutido por Malimbwi et al. (1992) e Kimberley e Nicholas (2006). Assim como observado na Tabela 6, as florestas com espaçamento similar ao do presente estudo, como Malimbwi et al. (1992) e Asaye e Zewdie (2013) tiveram valores de diâmetro médio próximos.

Conforme observado nos valores de correlação, pode-se dizer que o menor valor de dap médio comparado a plantios puros é um efeito da cobertura de *P. taeda* (Fig. 10). Em uma pesquisa conduzida por Alem et al. (2015), na Etiópia, os autores observaram que *C. lusitanica* teve uma média maior de diâmetro em plantio puro do que em um plantio misto com *Eucalyptus camaldulensis*, com uma diferença de quase 10 cm para a mesma idade. De acordo com Milne (2006), espécies de *Cupressus* que crescem com árvores de cobertura em uma floresta mista estão protegidas contra exposição, desenvolvem melhor forma do fuste e diminuem a produção de galhos, mas como um efeito negativo, podem sofrer uma redução no crescimento em diâmetro.

Para *P. taeda*, as grandes árvores remanescentes de 36 anos de idade alcançaram uma média de 58,0 cm de diâmetro. Como são raras as empresas que trabalham com uma rotação de *P. taeda* acima de 20 anos, são praticamente inexistentes os estudos que abordem o desempenho dendrométrico dessa espécie com idades mais velhas. Dobner Jr. (2014) observou uma média de diâmetro dominante de 57,8 cm para *P. taeda* aos 30 anos submetidos a desbaste pesado.

De maneira semelhante ao comportamento em diâmetro, a altura média e altura dominante de *C. lusitanica* são menores comparadas a plantios homogêneos de idades próximas (Tabela 6). Entretanto, mesmo sob cobertura, a distribuição de frequência das variáveis manteve o comportamento de uma floresta normal. Na Nova Zelândia, *Farm Forestry New Zealand* (2005) estipula que essa espécie pode atingir 12 metros de altura com 10 anos de idade em bons sítios. Alem et al. (2015) perceberam que *C. lusitanica* teve uma altura média menor em um plantio misto com *E. camaldulensis* do que em plantio puro, indicando um possível efeito negativo de uma camada superior (pois, nesse caso, *Eucalyptus* cresceu mais em altura do que *Cupressus*, ocupando o estrato superior do plantio misto) na altura dessa espécie.

Em termos de área basal, as espécies somaram, juntas, 36,5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> (Tabela 4), e *C. lusitanica* representa a maior parte disso, com 20,6 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. No estudo de Venturini et al. (2018), *C. lusitanica* apresentou uma área basal de 28,2 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> e *P. taeda* alcançou 37,7 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, em plantios puros, ambos aos 15 anos de idade.

Como qualquer outra espécie florestal, a área basal de *C. lusitanica* pode ser afetada pela densidade/espaçamento, assim como discutido por Kimberley e Nicholas (2006), que

avaliaram o efeito da densidade, desbaste e poda nessa espécie em três locais na Nova Zelândia. Os autores verificaram que o tratamento sem desbaste (com estoque inicial de 1.000 árvores ha<sup>-1</sup>, parecido com o do presente estudo) e o tratamento com desbaste precoce (aos 5 anos de idade, com estoque residual de 700 árvores ha<sup>-1</sup>) foram os que tiveram maior área basal aos 13 anos, 37,4 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> e 38,2 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Além disso, baseado no estudo deles e no de Malimbwi et al. (1992), cujos resultados para área basal aos 19 anos foram 43 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, um valor de área basal levemente superior era esperado.

Com relação ao volume, *C. lusitanica* apresentou um volume total de 171,9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> aos 13 anos, o que representa uma boa produção em contraste com resultados de trabalhos com plantios puros (Tabela 6).

Quanto aos resultados para *P. taeda*, os dados de área basal (15,9 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) e volume (219,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) são coerentes quando comparados a outros trabalhos com um número maior de árvores por hectare. Nascimento et al. (2015) obtiveram um valor de área basal de 52,9 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, volume de 775,8 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para uma densidade de 586,2 árv ha<sup>-1</sup> para *P. taeda* para árvores com 33 a 34 anos de idade. Dobner Jr. (2014) obteve uma área basal de 47,7 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> aos 30 anos para o tratamento extremo de desbastes, que permaneceu com 150 árv ha<sup>-1</sup>.

A área basal do estrato superior é um critério que pode ser adotado para reduzir o efeito de sombra sobre as árvores do estrato inferior. Kerr e Haufe (2016) estabelecem critérios máximos de área basal das árvores da cobertura para o sucesso de estabelecimento das árvores plantadas no sub-bosque em virtude da característica de tolerância à sombra das espécies, para o Reino Unido. No caso desse estudo, como *P. taeda* e *C. lusitanica* podem ser consideradas espécies não tolerantes à sombra (CHAVERRI et al., 1997; SCHULTZ, 1997; SHIMIZU et al., 2006), a área basal máxima da cobertura deve ser de 20 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, o que está de acordo com o valor obtido no presente estudo, onde a área basal do estrato superior foi de 15,9 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> para *P. taeda*.

No que se refere à área de copa, as árvores de *P. taeda* ocupam 7.682,9 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, ou seja, um pouco mais de 75% de um hectare. Dobner Jr. et al. (2009), cujo estudo foi desenvolvido no mesmo povoamento original de *P. taeda*, encontraram uma área de copa total de 2.154 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> para árvores da espécie com 23 anos de idade e 50 árv ha<sup>-1</sup>, comprovando o potencial de uso do espaço produtivo que as árvores podem atingir em idades mais avançadas.

Como discutido previamente, o diâmetro e altura médios de *C. lusitanica* encontrados no presente estudo são menores que as médias de plantações puras e, baseado na bibliografia consultada, há indicativos de que eles podem ser afetados pela existência de um estrato superior.



A correlação positiva entre o dap de *C. lusitanica* e distância de *P. taeda* reforça essa ideia, pelo menos para essa variável.

Entretanto, é importante ressaltar que a densidade da cobertura tem um impacto importante no crescimento. No trabalho de Agestam et al. (2003), os autores observaram que o crescimento em altura de *Fagus sylvatica* (Beech) foi maior no sistema sob cobertura mais esparsa nos primeiros anos, mas, posteriormente, os aumentos em altura foram maiores nas áreas de corte raso. Essa mudança pode ser explicada pelo “fechamento” do dossel, resultando em menor aporte de luz para as plantas do estrato inferior.

Nesse caso, a densidade da cobertura de *P. taeda* mantida sobre *C. lusitanica*, de 60 árv ha<sup>-1</sup>, foi uma densidade bem baixa, com árvores bem espessadas, permitindo a entrada de luz no sub-bosque. Örlander e Karlsson (2000) verificaram que as mudas de *Picea abies* (L.) Karsten plantadas sob a cobertura de *P. abies* e *Pinus sylvestris* L. apresentaram a maior média anual de crescimento em altura nos sistemas com cobertura de 80 e 160 árv ha<sup>-1</sup>, que são valores de densidade inclusive maiores do que a do presente estudo. É possível, todavia, que as copas de *P. taeda* tenham gerado o fechamento do dossel nos últimos anos, explicado pelos valores significativos de área de copa dessa espécie, reduzindo a entrada de luz no sub-bosque e, consequentemente, o crescimento em diâmetro de *C. lusitanica*.

Por outro lado, os registros de possíveis efeitos negativos da cobertura de árvores sob o crescimento das plantas do estrato inferior se referem mais ao comportamento em altura. Dobner Jr et al. (2009), testando os efeitos de um sistema sob cobertura de *P. taeda* sobre *Eucalyptus dunnii* Maiden., na mesma região onde esse estudo foi conduzido, verificaram que a cobertura de *P. taeda* afetou negativamente o crescimento de *E. dunnii* em termos de diâmetro do colo e altura total. Além disso, os autores também detectaram um maior efeito negativo na altura de *E. dunnii* em um raio de 4 metros de distância das árvores de *P. taeda*.

Strand et al. (2006), estudando o crescimento em altura de mudas em um sistema sob cobertura com *Pinus sylvestris*, na Suécia, perceberam que as três espécies avaliadas tiveram redução no crescimento em altura devido à proximidade das árvores de cobertura. Valkonen et al. (2002) notaram uma redução entre 9 e 17% no potencial de crescimento em altura das mudas devido ao estrato superior, em um raio de 10 metros das árvores de cobertura, na Finlândia. Já Bergqvist (1999) não encontrou nenhum efeito em altura nas espécies sob cobertura de *Betula* spp. na Suécia, mas reporta um efeito negativo no crescimento em diâmetro dessa espécie.

Nota-se, portanto, que o efeito da presença de um estrato superior no crescimento de uma determinada espécie dependerá de suas características ecológicas e do manejo adotado no sistema, sobretudo no que se refere à luminosidade, que é fator determinante para o crescimento do estrato inferior em um plantio sob cobertura (STRAND et al., 2006; DEY et al., 2012; O'HARA, 2014).

## CONCLUSÃO

Baseado nessa caracterização inicial, é possível afirmar que o desempenho nas variáveis dendrométricas analisadas foi compatível com as idades das espécies componentes do plantio sob cobertura. Os valores de área basal e área de projeção de copa indicam um uso eficiente do espaço produtivo pelas espécies do plantio sob cobertura. A proximidade às árvores no estrato superior teve efeito negativo no crescimento em diâmetro de *Cupressus lusitanica*, porém não afetou o desempenho em altura, volume e área de copa dessa espécie.

## 6. CAPÍTULO II: CRESCIMENTO, PRODUÇÃO DAS ESPÉCIES DO SISTEMA SOB COBERTURA E DENSIDADE DA MADEIRA DE *Pinus taeda*

### RESUMO

Um plantio sob cobertura é caracterizado pelo estabelecimento de um sub-bosque jovem sob a cobertura de um estrato antigo, onde há obrigatoriamente dois estratos na floresta e, muito comumente, mais de uma espécie envolvida. Um dos benefícios desse sistema é o ganho de incremento das árvores da cobertura com consequente produção de toras de maior diâmetro e com alta qualidade. Assim, informações referentes ao crescimento, produção e densidade da madeira das árvores de um plantio sob cobertura são necessárias para verificar o real potencial do sistema. Esse capítulo teve por objetivo: (i) analisar o crescimento de *P. taeda* e *C. lusitanica* em rotações de 36 e 13 anos, respectivamente; (ii) avaliar a densidade dos anéis de crescimento de *P. taeda* como cobertura de um plantio de *C. lusitanica*; (iii) verificar o efeito da colheita parcial na espessura e densidade dos anéis de crescimento de *P. taeda*. Para análise do crescimento de *C. lusitanica*, foram utilizados os dados obtidos do inventário florestal feito aos 13 anos de idade. Para *P. taeda*, foram coletadas seções transversais do fuste de 15 árvores, em que os discos foram coletados nas alturas de 0,1 m, 2,0 m, 7,0 m, 13,2 m, 17,0 m e 23,7 m. Para contagem e mensuração da largura dos anéis foram obtidas imagens dos discos, que foram processadas no software Image Pro Plus®. Foram utilizados discos de 5 árvores de *P. taeda* para a análise de densitometria, de onde foram retiradas amostras de 1,3 mm de espessura para serem radiografadas no equipamento Faxitron®. Posteriormente, as amostras foram analisadas em relação ao anel (densidade), lenho inicial e tardio (largura, densidade e porcentagem) no software WinDendro™. A espécie *C. lusitanica* teve um incremento médio anual em diâmetro de aproximadamente 1,0 cm ano<sup>-1</sup>, enquanto que a análise de tronco de *P. taeda* permitiu observar que a espécie apresentou anéis variando entre 0,4 cm a 1,7 cm, com anéis mais largos observados nos primeiros anos de crescimento. Em relação aos incrementos médios anuais em altura e volume, *C. lusitanica* apresentou valores levemente superiores devido à densidade final das árvores no inventário, a qual foi maior que a de *P. taeda*. No geral, a densidade dos anéis de *P. taeda* aumentou com a idade, e foram verificadas densidades maiores nas porções de até 7,0 m de altura. Como efeito da colheita parcial, foi verificado um aumento na espessura e densidade médias dos anéis nos anos subsequentes, mas esse feito teve pouco tempo de duração para a densidade da madeira. A colheita parcial também gerou perfis de densidade e espessura dos anéis de crescimento desuniformes.

**Palavras-chave:** análise de tronco completa; incremento; densitometria de raios-X.

### ABSTRACT

An underplanting is characterized by the establishment of a young understory under the cover of an old layer, with, mandatorily, two strata and, commonly, more than one species involved. One of the advantages of this system is the increment gain by the shelter trees and consequent production of wider and high-quality logs. Thus, information about trees' growth, yield and wood density in an underplanting are necessary to verify the real potential of the system. This chapter aimed to (i) analyse the growth of *P. taeda* and *C. lusitanica* in 36-y and 13-y rotations, respectively; (ii) evaluate the annual rings density of *P. taeda* as a cover species on an underplanting system and (iii) verify the effect of partial harvest on annual rings width and density of *P. taeda*. For the *C. lusitanica* growth analysis, data from the forest inventory was

used. For *P. taeda*, transversal cross-sections were collected from 15 trees, and the sections were obtained at 0.1 m, 2.0 m, 7.0 m, 13.2 m, 17.0 m and 23.7 m. To measure and count the annual rings, images from the disks were taken and processed on Image Pro Plus® software. For the densitometry analysis, disks from 5 trees were used, from where samples of 1.3 mm were obtained to be screened on Faxitron®. Then, the samples were analyzed in terms of ring (density), earlywood and latewood (width, density, and percentage) on WinDendro™ software. The species *C. lusitanica* showed a mean annual increment in diameter of nearly 1.0 cm ano<sup>-1</sup> whereas the stem analysis on *P. taeda* showed that the species annual ring width varied between 0.4 cm and 1.7 cm, with widest rings on the first years of growth. Regarding the mean annual increment in height and volume, *C. lusitanica* showed slightly higher values due to its final stocking which was higher than *P. taeda*. Overall, the *P. taeda* annual rings density increased with age, and the higher densities were verified on the lower portions of the stem (up to 7.0 m). As effects of the partial harvest, an increase on mean wood width and density was verified on the following years, but this effect lasted a short time on density. The partial harvest also generated uneven wood density and width rings profiles.

**Keywords:** complete stem analysis; increment; X-ray densitometry.

## INTRODUÇÃO

O sistema silvicultural sob cobertura é um sistema que vem sendo adotado em diversos países com o objetivo de regenerar uma floresta, naturalmente ou artificialmente, abaixo da proteção de uma camada superior de árvores pré-existentes. Nos casos onde a regeneração natural não é suficiente, ou deseja-se introduzir uma nova espécie de interesse e/ou aumentar a proporção de uma determinada espécie no sub-bosque, é feita a regeneração artificial através do plantio de mudas no sistema sob cobertura (SCOLFORO, 1998; PUKKALA; GADOW, 2012).

Definido como plantio sob cobertura, “*underplanting*”, ou plantio de enriquecimento, “*enrichment planting*”, esse termo se refere ao estabelecimento de um sub-bosque jovem sob a cobertura de um estrato antigo, onde há obrigatoriamente dois estratos na floresta e, muito comumente, mais de uma espécie envolvida (SCOLFORO, 1998; KERR; HAUFE, 2016).

Além da proteção contra condições climáticas adversas, redução do risco contra pestes e patógenos, melhoria das condições do solo, inserção de espécies com um melhor genótipo, controle das espécies competidoras no sub-bosque, melhor estabilidade e resiliência da floresta (THAM, 1994; MASON et al., 1999; BURTON et al., 2000; HANELL et al., 2000; KELTY, 2006; SIMPSON; OSBORNE, 2006; BALANDIER et al., 2007; BARBEITO et al., 2011; DEY et al., 2012; PUKKALA; GADOW, 2012; KERR; HAUFE, 2016), esse sistema também apresenta vantagens em termos de aproveitamento do espaço produtivo, no que se refere ao ganho de incremento das árvores da cobertura com consequente produção de toras de maior

diâmetro e com alta qualidade. Esse processo é concomitante à formação de uma floresta bem estabelecida no sub-bosque, que estará apta para usar o espaço de maneira eficiente quando as árvores que ocupam o dossel forem colhidas (MASON et al., 1999; HANELL et al., 2000; DOBNER Jr. et al., 2009).

No Brasil, vários trabalhos já abordaram plantios de enriquecimento com objetivo de aumentar a diversidade no sub-bosque de florestas nativas através do plantio de espécies de interesse (SCHULZE, 2008; KEEFE et al., 2009; VENTUROLI et al., 2011). Foi encontrado um trabalho com plantio de uma espécie exótica, *Eucalyptus dunnii*, sob a cobertura de outra espécie também exótica, *Pinus taeda*, ambas destinadas à produção madeireira, onde a cobertura de *P. taeda* se mostrou eficiente na proteção de eucalipto contra geadas (DOBNER Jr. et al., 2009).

Assim, informações referentes ao crescimento e produção das árvores de um plantio sob cobertura são necessárias para verificar o real potencial do sistema. Além disso, dados sobre a densidade da madeira produzida pelas espécies componentes do sistema também são importantes para atestar o desempenho deste.

O crescimento de uma árvore pode ser entendido como o resultado da atividade meristemática desta, o que promove o alongamento, em altura, e o engrossamento, em diâmetro, das estruturas das árvores (raízes, galhos e troncos). A produção, por sua vez, consiste no crescimento acumulado (HUSCH et al., 2003; FINGER, 2006; PRETZSCH, 2009; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Já a densidade da madeira é um critério físico muito importante para definir a qualidade da madeira devido a sua alta correlação com a força e dureza. Também é uma propriedade fácil de ser mensurada e é fundamental para definir o produto final para o qual uma determinada madeira pode ser destinada (BARNETT; JERONIMIDIS, 2003).

Além disso, a estrutura dos anéis de crescimento, como largura, distribuição do lenho inicial e tardio e proporção de madeira juvenil e adulta, são alguns elementos que caracterizam a qualidade da madeira de coníferas (DOBNER Jr. et al., 2018).

A madeira juvenil é aquela produzida próximo à medula em qualquer altura, encontrada como uma coluna cilíndrica central de madeira formada da base até o ápice da árvore, ou aquela produzida por árvores jovens. Essa madeira é obtida através da ação do câmbio jovem, e é encontrada em proporções maiores nas partes mais altas do tronco. Já madeira adulta é produzida na porção externa do tronco, por atividade do câmbio maduro fisiologicamente, ou seja, é formada com o amadurecimento da árvore (LARSON, 1969; FOELKEL et al., 1975; COWN, 1992; BARNETT; JERONIMIDIS, 2003; GULLER et al., 2012).

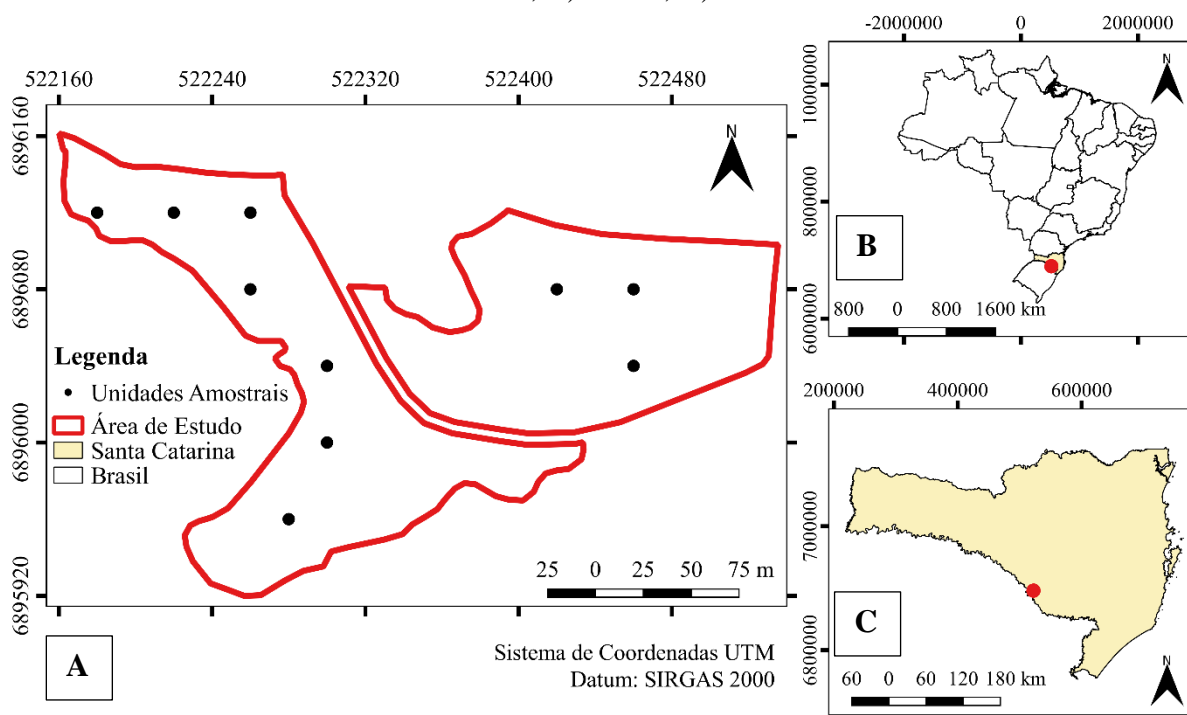
Dessa forma, o objetivo desse capítulo foi: (i) analisar o crescimento de *P. taeda* e *C. lusitanica* em rotações de 36 e 13 anos, respectivamente; (ii) avaliar a densidade dos anéis de crescimento de *P. taeda* como cobertura de um plantio de *C. lusitanica*; (iii) verificar o efeito da colheita parcial na espessura e densidade dos anéis de crescimento de *P. taeda*.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição da área

O estudo foi conduzido em uma área experimental implantada no município de Capão Alto, Sul do Estado de Santa Catarina, Brasil ( $28^{\circ} 03' 35''$  S e  $50^{\circ} 46' 22''$  O), em um talhão de aproximadamente 2 ha (Figura 11). O clima é classificado como subtropical úmido com verão temperado, com temperatura média anual de  $13^{\circ}\text{C}$ , uma altitude em torno de 1.000 m e precipitação bem distribuída durante o ano, com média de 1.750 mm (ALVARES et al., 2013).

Figura 11 – Localização da área de estudo e das unidades amostrais instaladas. A) Área de estudo e unidades amostrais; B) Brasil; C) Santa Catarina.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

O componente do sistema *P. taeda* foi plantado em 1982 e desbastado como plantio comercial até 2005, ou seja, primeiro desbaste, sistemático e seletivo, aos 10 anos e segundo desbaste, sistemático e seletivo, aos 17 anos e colheita parcial aos 23 anos, quando os

povoamentos das proximidades foram colhidos. Um dos povoamentos foi selecionado para esse experimento, submetido a colheita parcial com densidade remanescente de 60 árvores ha<sup>-1</sup>. O segundo componente, *C. lusitanica*, foi plantado nesse mesmo ano sob as árvores de *Pinus*, usando um espaçamento de 2,5 x 2,5 m (1.600 árv ha<sup>-1</sup>). A Figura 12 ilustra a atual situação do povoamento, com a formação dos dois estratos pelas espécies.

Figura 12 – Ilustração dos dois estratos formados por *Cupressus lusitanica* (estrato inferior) e *Pinus taeda* (estrato superior).

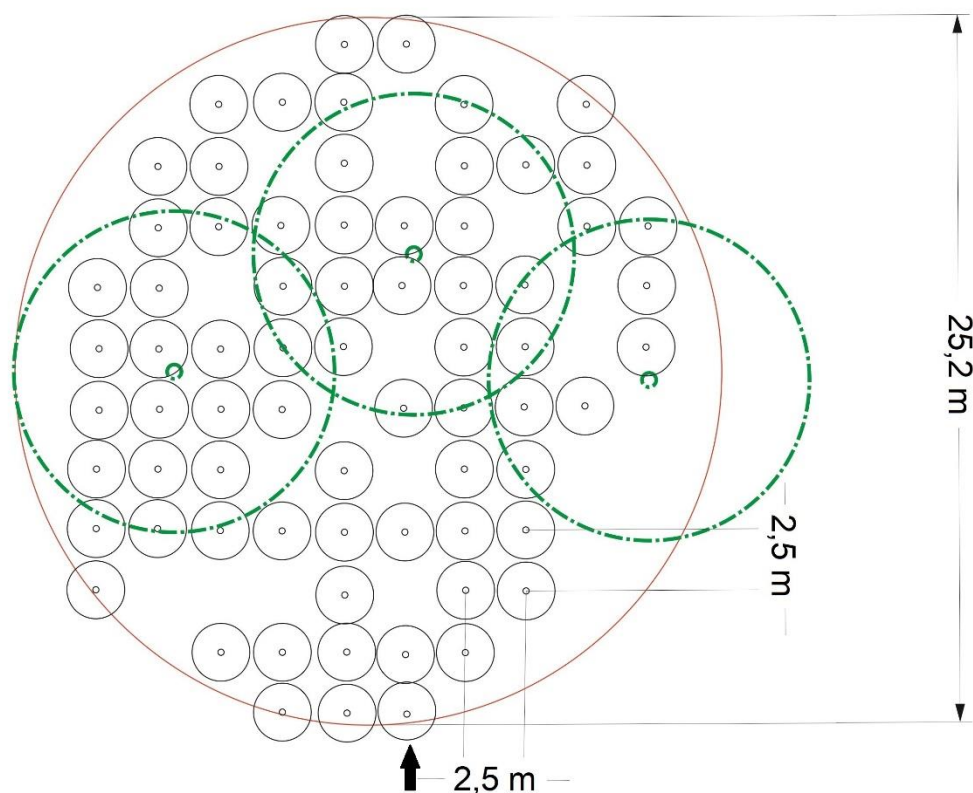


Fonte: A autora, 2018.

### Coleta de dados

Foi feito inventário florestal a partir da instalação de 10 unidades amostrais circulares temporárias de 500 m<sup>2</sup> usando como processo de amostragem a amostragem sistemática e o método de área fixa (Figura 11). Foram mensuradas 722 árvores de *C. lusitanica* e 30 árvores de *P. taeda*, obtendo-se o Diâmetro à Altura do Peito (dap) de todos os indivíduos de *C. lusitanica* e *P. taeda* nas parcelas de campo. A altura total foi aferida em todas as árvores de *C. lusitanica* localizadas na linha central de cada parcela mais as cinco árvores dominantes, totalizando 132 árvores, e em todas as árvores de *P. taeda* encontradas nas parcelas (Figura 13). O dap e as medições de altura foram obtidos com uma fita diamétrica e com um hipsômetro digital tipo Vertex IV®, respectivamente.

Figura 13 – Croqui ilustrando uma das parcelas mensuradas durante o inventário conduzido no plantio sob cobertura.



Nota: o círculo em vermelho representa a delimitação da parcela; os círculos com linha tracejada em verde representam a área de copa ocupada pelas árvores de *P. taeda*; os círculos com linha preta representam a área de copa das árvores de *C. lusitanica*; a seta preta indica a linha onde foram mensuradas as alturas totais das árvores de *C. lusitanica*. Fonte: VAZ, Douglas Rufino, 2019.

Das copas das árvores foram medidos quatro raios, a partir do tronco, seguindo a direção dos pontos cardeais. Os raios de copa foram medidos em aproximadamente 13% das árvores de *C. lusitanica* (das árvores localizadas na linha central, totalizando 94 indivíduos) e de todas as árvores de *P. taeda* usando um telêmetro a laser TruPulse 200®.

Além disso, para obtenção do volume individual das árvores, com base na distribuição diamétrica de ambas espécies pelo critério empírico, 33 árvores de *C. lusitanica* e 16 árvores de *Pinus taeda* foram cubadas nas seguintes posições do fuste: 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m, 0,9 m, 1,3 m, 2 m e, depois disso, a cada 1 metro até o topo da árvore, usando uma suta. Depois disso, o volume de cada seção foi calculado com base na fórmula de Smalian e somado ao volume do cone da árvore. Então, cinco modelos volumétricos foram testados para o conjunto de dados: Husch, Spurr, Schumacher-Hall, Meyer e Stoate, para estimar o volume das demais árvores. Os modelos que apresentaram o melhor desempenho, nos critérios de qualidade de



ajuste adotados, foram Schumacher-Hall e Spurr para os dados de *P. taeda* e *C. lusitanica*, respectivamente.

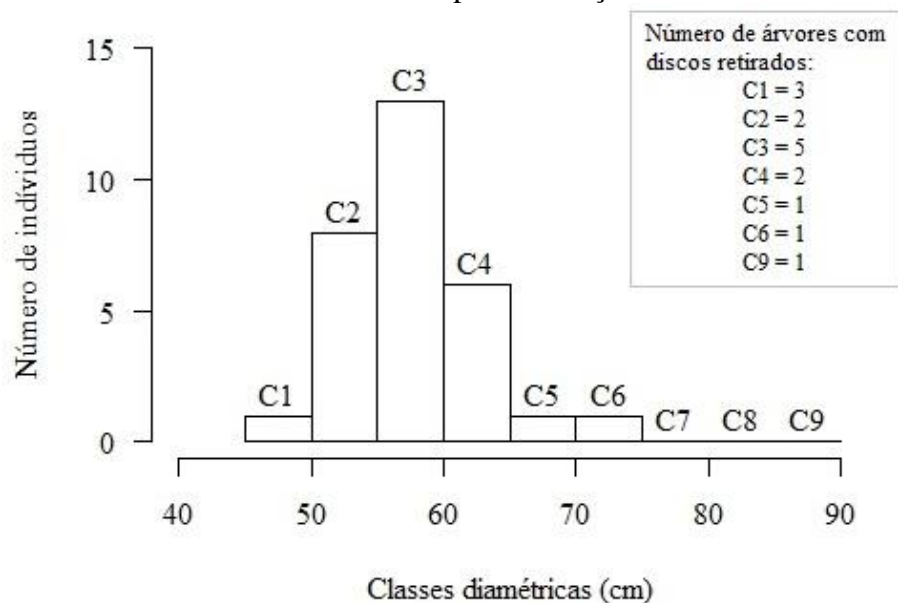
O volume total por hectare foi obtido para ambas as espécies segundo as fórmulas dendrométricas disponíveis no livro de Machado e Figueiredo Filho (2009). Já a área de projeção de copa (Eq. 4) foi obtida através da seguinte fórmula.

$$AC = \left[ \left( \frac{R_1 * R_2 * \pi}{4} \right) + \left( \frac{R_2 * R_3 * \pi}{4} \right) + \left( \frac{R_3 * R_4 * \pi}{4} \right) + \left( \frac{R_4 * R_1 * \pi}{4} \right) \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde AC é a área de projeção de copa, em m<sup>2</sup>;  $R_1 \dots R_4$  representam os raios de copa, em m.

Além das mensurações realizadas no inventário, foram retirados discos de 15 árvores de *Pinus taeda* seguindo a distribuição diamétrica do povoamento e coletando-se discos de uma árvore maior, fora da distribuição, representando as classes de diâmetro que as árvores de *P. taeda* ainda podem alcançar (Figura 14). Os discos de 10 árvores de *P. taeda* foram retirados de árvores que estavam caídas no local, em virtude de uma tempestade que ocorreu em 2014, nas posições 0,1 m, 1,3 m, 25%, 50% e 75% da altura total. Para *P. taeda*, foram, ainda, derrubadas outras 5 árvores, retirando discos na base (0,1 m), quando possível, e entre os intervalos das toras utilizadas para diversos sortimentos pela empresa. A altura exata de retirada dos discos está disposta na Tabela 22 em Apêndices. Para facilitar a visualização dos resultados, as alturas de retirada dos discos transversais foram padronizadas segundo dados da Tabela 7.

Figura 14 – Distribuição diamétrica de *Pinus taeda* com base nos dados obtidos em inventário e das árvores com discos retirados para avaliação do crescimento e densidade.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Tabela 7 – Altura padronizada de retirada dos discos transversais para análise do crescimento de *Pinus taeda*.

| Disco | Posição (m) |
|-------|-------------|
| 1     | 0,1         |
| 2     | ~2,0        |
| 3     | ~7,0        |
| 4     | ~13,2       |
| 5     | ~17,0       |
| 6     | ~21,7       |

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 60°C por aproximadamente 12 dias e depois foram polidas com lixas de diferentes gramaturas (granulometria de 60 a 150) em lixadeira de cinta, de forma a gerar melhor contraste dos anéis para facilitar a sua identificação e mensuração. Em cada disco, foram desenhados quatro raios, tomando como referência a delimitação do maior raio, e, a partir desse, foi desenhado um raio num ângulo de 45°, e os demais a 90° um do outro.

Imagens das amostras foram digitalizadas com uma escala para calibração, as quais foram utilizadas para reconhecimento e delimitação da largura dos anéis de crescimento no Software Image Pro Plus® (MEDIA CYBERNETICS). Em alguns discos, não foi possível obter informações de quatro raios devido ao seu estado avançado de decomposição. Portanto, foram tomados apenas de três ou dois, em que a média foi adotada como raio representativo.

### Análise do crescimento das árvores

O conjunto de dados considerado para análise das mensurações dos anéis compreende o período de 1982-2018 (36 anos). Julho foi adotado como o mês no qual as árvores completariam um ano. Os anéis foram nomeados de acordo com o ano de início do período de crescimento: por exemplo, o anel 2017 foi formado no período de agosto de 2017 a julho de 2018. O número de anéis de crescimento anuais foi contabilizado a partir do ano que o primeiro anel foi formado.

Com base nos dados dos anéis de crescimento, foram obtidos o Incremento Corrente Anual (ICA, Eq. 5) e Incremento Médio Anual (IMA, Eq. 6) para o diâmetro de *P. taeda*. Para altura e volume de *P. taeda*, além do IMA, foi também calculado o Incremento Periódico Anual (IPA, Eq. 7) conforme equações a seguir, descritas para a variável volume.

$$ICA = \frac{V_{n+1} - V_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$IMA = \frac{V_t}{t} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$IPA = \frac{V_{n+1} - V_n}{a} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:  $V_n$  = volume no início do período;  $V_{n+1}$  = volume no final do período;  $a$  = período de tempo entre os levantamentos (maior que 1);  $V_t$  = volume na idade  $t$ ;  $t$  = idade do povoamento.

Com base nos resultados do ajuste de modelos hipsométricos para as idades de 7, 12, 16, 19 e 30 anos e de modelos volumétricos aos 12, 19 e 30 anos de *P. taeda*, descritos no trabalho de Nicoletti et al. (2017), foi utilizado o modelo matemático de Naslund para predição das alturas totais e o modelo de Meyer Modificado para predizer o volume ao longo dos anos para *P. taeda*, conforme Tabela 8. Tais coeficientes foram utilizados para estimar a altura total e volume total aos 36 anos, cujas predições foram comparadas com os dados do inventário florestal realizado nesta idade.

Tabela 8 – Coeficientes de determinação obtidos para os modelos para estimar a altura e volume totais em diferentes idades para *Pinus taeda* (Continua).

| Modelo hipsométrico (Naslund)   | Coeficientes           | Idades utilizadas |
|---|------------------------|-------------------|
| $\frac{(1,30 + d_i)}{h_i} = \beta_0 + \beta_1 * d_i + e_i$                                  | $\beta_0 = 0,4527$     | 7                 |
|   | $\beta_1 = 0,0523$     |                   |
|   | $\beta_0 = 0,4810$     | 12                |
|   | $\beta_1 = 0,0416$     |                   |
|   | $\beta_0 = 0,2778$     | 16                |
|   | $\beta_1 = 0,0308$     |                   |
|   | $\beta_0 = 0,2910$     | 19                |
|   | $\beta_1 = 0,0305$     |                   |
|   | $\beta_0 = 0,2077$     | 30 e 36           |
|   | $\beta_1 = 0,0275$     |                   |
| Modelo volumétrico (Meyer modificado)   | Coeficientes           | Idades utilizadas |
| $v_i = \beta_0 + \beta_1 d_i + \beta_2 d_i^2 + \beta_3 d_i h_i^2 + \beta_4 d_i^2 h_i + e_i$ | $\beta_0 = 0,01381$    | 12                |
|   | $\beta_1 = 0,0009$     |                   |
|   | $\beta_2 = 0,000038$   |                   |
|   | $\beta_3 = 0,00000902$ |                   |
|   | $\beta_4 = 0,0000264$  |                   |
|   | $\beta_0 = 0,2120$     | 19                |
|   | $\beta_1 = 0,0005$     |                   |
|   | $\beta_2 = -0,00042$   |                   |
|   | $\beta_3 = -0,00001$   |                   |
|   | $\beta_4 = 0,000053$   | 30 e 36           |
|   | $\beta_0 = -0,9833$    |                   |
|   | $\beta_1 = 0,01125$    |                   |

Tabela 8 – Coeficientes de determinação obtidos para os modelos para estimar a altura e volume totais em diferentes idades para *Pinus taeda* (Conclusão).

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| $\beta_2 = 0,00133$   |         |
| $\beta_3 = 0,0000455$ | 30 e 36 |
| $\beta_4 = -0,000025$ |         |

Nota:  $d_i$  = DAP da enésima árvore, em cm;  $h_i$  = altura total da enésima árvore, em m;  $v_i$  = volume individual da enésima árvore, em  $m^3$ ;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  e  $\beta_4$  = coeficientes das equações;  $e_i$  = erro aleatório. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Como não foi possível obter os dados de crescimento através da análise de tronco completa para *C. lusitanica*, foram calculados apenas o IMA em diâmetro, altura e volume com base nos dados de inventário e cubagem.

Com relação à colheita parcial de *P. taeda*, que manteve uma densidade final de 60 árv  $ha^{-1}$  e onde foi plantado *C. lusitanica*, esta foi conduzida em 2005. Então, para fins de discussão, foi considerado que a colheita parcial tenha ocorrido aos 24 anos de idade de *P. taeda*.

### Avaliação da densidade dos anéis de crescimento

Para a análise de densitometria de raios-X, foram utilizadas as amostras das 5 árvores que foram derrubadas, e foi seguida a metodologia proposta por Tomazello et al. (2008), que consiste nas seguintes etapas:

1. Corte de uma faixa central da seção transversal contendo a medula (5 cm de largura) (Figura 15A);
2. Redução da amostra para 1 cm de espessura e corte em serra fita (Figura 15B);
3. Colagem da amostra de 1 cm de espessura em um suporte de madeira (Figura 15C);
4. Após 24 horas, corte de uma amostra de 1,3 mm de espessura com um serra dupla (Figura 15 D);
5. Armazenamento em estufa sob temperatura de 20° C e umidade de 60% controladas por, no mínimo, 12 h para estabilização da umidade da madeira;
6. Obtenção das imagens de raios-X com a disposição das amostras de madeira, uma cunha de acetato, com densidade conhecida de  $1,48 \text{ g.cm}^{-3}$  e uma peça graduada, para calibração da densidade em função de uma escala de cor e das dimensões, respectivamente, no equipamento de leitura de raios-X Faxitron 43805N (Figura 15E);
7. Abertura das imagens e leitura das mesmas no software Windendro™, integrado ao equipamento de leitura de raios-X (Figura 15F).



e inicial, densidade do anel, do lenho tardio e inicial, e o cálculo dessas variáveis foi feito como a média de 2 raios por árvore (DOBNER Jr et al., 2018).

A detecção dos anéis de crescimento, bem como do lenho inicial e tardio, no software foi feita automaticamente através do método de diferenças de intensidade de luz (*light intensity differences*). Para garantir a acuracidade das mensurações feitas pelo software, perfis de densidade foram construídos e ajustados com a imagem da respectiva amostra.

Para fins de análise, também foi verificada a existência de correlação entre a densidade média dos anéis, densidade do lenho tardio e densidade do lenho inicial com a espessura dos anéis. As análises estatísticas e os gráficos foram desenvolvidos no software R (R CORE TEAM, 2019).

## RESULTADOS

### Análise do crescimento

A espécie de cobertura *P. taeda* apresentou valores superiores em todas as variáveis analisadas, com destaque para o volume individual e área de copa (Tabela 9). Esse resultado já era esperado, devido à diferença de idade das espécies adotadas nesse sistema sob cobertura.

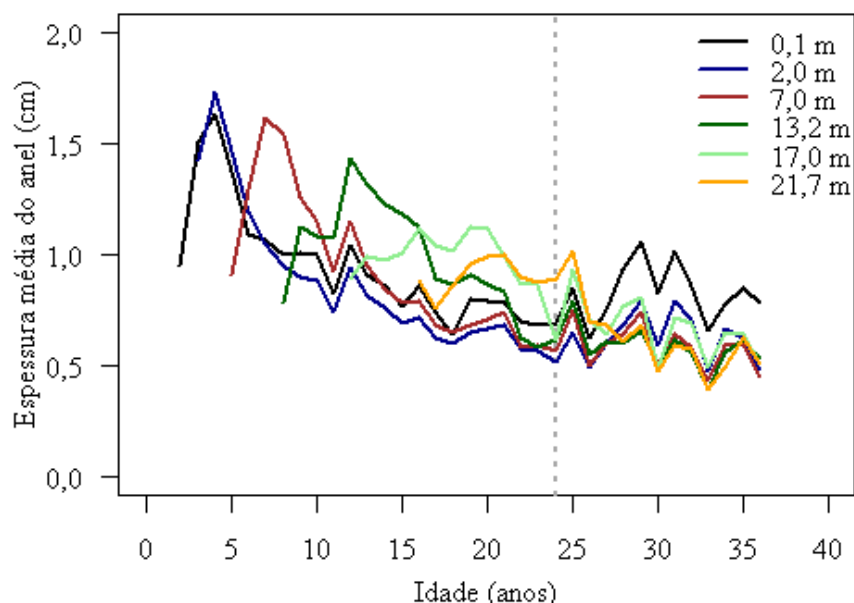
Tabela 9 – Valores médios de diâmetro à altura do peito, altura, volume individual e área de copa para *Cupressus lusitanica* e *Pinus taeda*.

|                                       | <i>Cupressus lusitanica</i> | <i>Pinus taeda</i> |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| dap (cm)                              | 12,6                        | 58,0               |
| h (m)                                 | 12,0                        | 29,8               |
| v (m <sup>3</sup> arv <sup>-1</sup> ) | 0,1190                      | 3,6612             |
| ac (m <sup>2</sup> )                  | 2,4                         | 128,0              |

Nota: dap = diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total (m); v = volume individual (m<sup>3</sup> arv<sup>-1</sup>) e ac = área de copa (m<sup>2</sup>). Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Assim, o IMA em diâmetro de *C. lusitanica* foi de 0,97 cm ano<sup>-1</sup> a 1,3 m de altura. Já os dados obtidos com a mensuração dos anéis de crescimento de *P. taeda* permitiram uma análise detalhada do crescimento dessa espécie em diferentes posições do fuste, conforme observado na Figura 16.

Figura 16 – Espessura média do anel (cm) em diferentes posições no fuste das árvores.



Nota: linha pontilhada em cinza que corresponde ao ano onde *P. taeda* sofreu a colheita parcial para plantio de *C. lusitânica*. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A espessura média dos anéis de crescimento apresenta um comportamento semelhante nas diferentes posições ao longo do fuste. Considerando as avaliações feitas a 0,1 m, com exceção do valor observado aos 2 anos de idade, a espessura média dos anéis de crescimento foi superior a 1 cm entre os 3 e 11 anos de idade, quando caiu para 0,82 cm. O maior valor de espessura média foi obtido aos 4 anos, o que representa um crescimento em diâmetro de 3,26 cm, e depois disso, a espessura média começou a cair, o que indica o momento de início da competição entre as árvores.

A espessura média dos anéis de crescimento do disco retirado a ~2,0 m seguiu um padrão semelhante aos anéis da base, com picos e reduções da espessura, de maneira similar aos dos anéis de crescimento nas demais posições do fuste.

Esse comportamento do crescimento, com picos e quedas, ambos abruptos, pode estar relacionado aos tratos silviculturais aplicados no talhão, como podas e desbastes, a questões climáticas, como média de precipitação e temperatura, condições de solo, entre outros. Assim, pode-se inferir, com relação aos tratos silviculturais, que houve desbastes entre os 10 e 11 anos de idade, 17 e 18 anos de idade e aos 24 anos de idade.

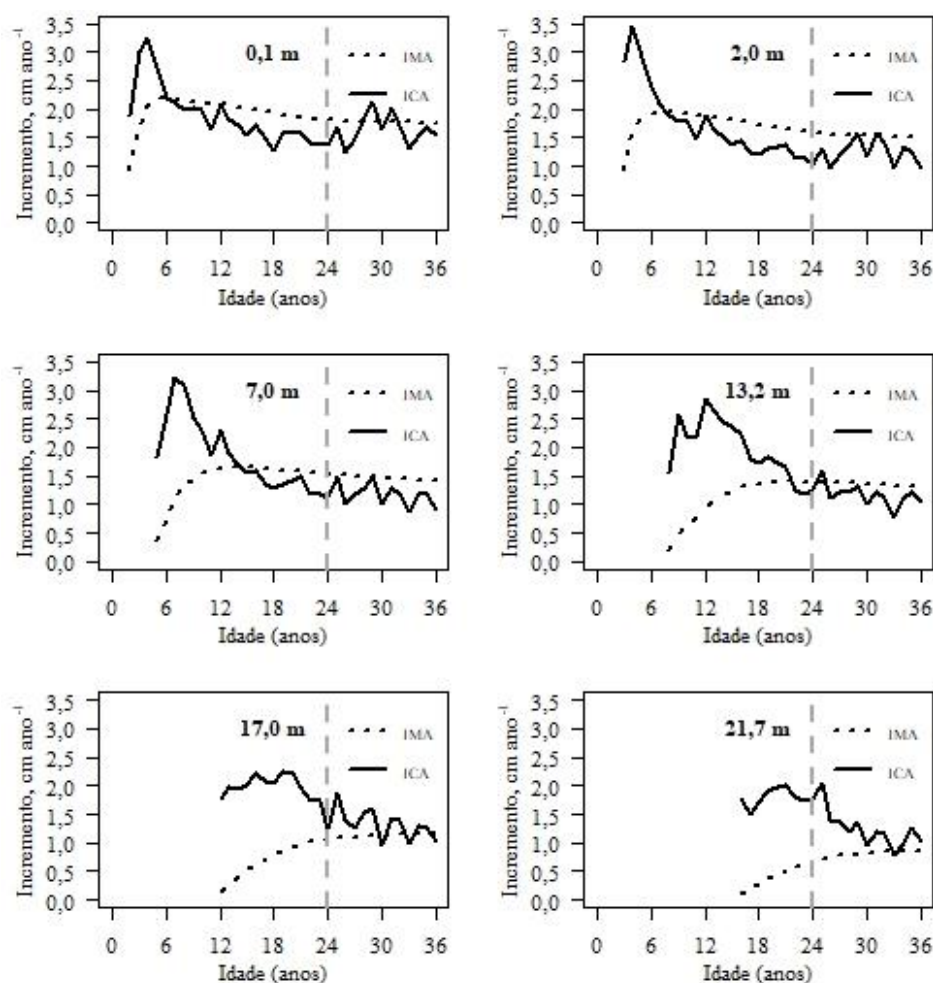
Aos 24 anos, a colheita parcial das árvores de *P. taeda* promoveu uma liberação da competição que, por consequência, induziu a um aumento na espessura média dos anéis de crescimento aos 25 anos, seguida de uma leve redução aos 26 anos e novamente um aumento a partir dos 27 anos (Figura 16).



É interessante observar que há uma alternância dos maiores valores de espessura observados ao longo do tronco de *P. taeda*, o que indica que há diferentes respostas a intervenções, como desbastes, em diferentes alturas da árvore. Nos primeiros anos, as maiores médias de espessura de anel são visualizadas em alturas mais próximas à base da árvore e esse comportamento vai se deslocando conforme aumenta a altura da árvore, até os 25 anos. Por exemplo: aos 4 e 5 anos de idade, as maiores médias de espessura são observadas a 2,0 m; dos 6 aos 11 anos de idade, destaca-se a altura de 7,0 m; e, a partir do 26º ano, as maiores médias foram obtidas na base das árvores.

A Figura 17 ilustra o incremento médio (IMA) e corrente (ICA) anuais em diâmetro em diferentes posições ao longo do fuste. Como esperado, o ICA foi maior nos anos iniciais, e aumentou um ano após a colheita parcial, já o IMA tendeu a apresentar valores menores nos anos iniciais.

Figura 17 – Incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA) em diâmetro em diferentes posições no fuste das árvores.

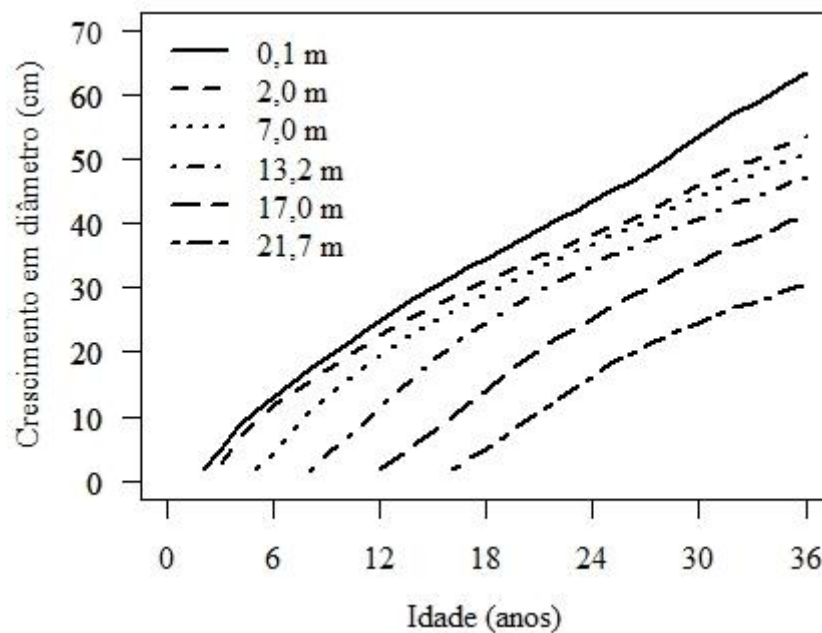


Nota: A linha em cinza representa o ano de plantio de *Cupressus lusitanica*. Em negrito a altura de cada disco.  
Fonte: Elaborado pela autora, 2019.



A Figura 18 demonstra a produção em diâmetro sem casca ao longo dos anos e em diferentes posições do fuste. De acordo com a curva de produção em diâmetro, as árvores acumularam, em média, em torno de 60 cm de diâmetro na base e um pouco mais de 30 cm de diâmetro aos 21,7 m de altura.

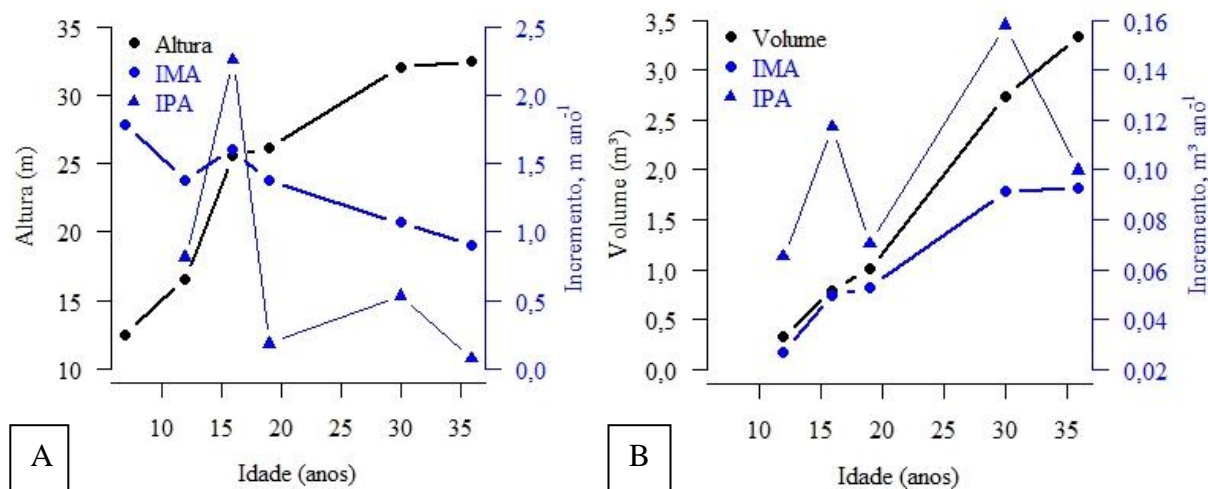
Figura 18 – Curva de produção (diâmetro acumulado) de *Pinus taeda* ao longo de 36 anos em diferentes posições no fuste.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Com relação ao crescimento em altura e volume, *C. lusitanica* teve um IMA em altura de  $0,92 \text{ m ano}^{-1}$ , IMA em volume individual de  $0,0091 \text{ m}^3 \text{ árv ano}^{-1}$  e,  $13,22 \text{ m}^3 \text{ ha ano}^{-1}$  para o povoamento. Já *P. taeda*, com base nos dados do inventário (ou seja, das  $60 \text{ árv ha}^{-1}$ ), teve um IMA em altura um pouco menor,  $0,83 \text{ m ano}^{-1}$ , IMA em volume de  $0,1017 \text{ m}^3 \text{ árv ano}^{-1}$  e, por unidade de área,  $6,1028 \text{ m}^3 \text{ ha ano}^{-1}$ . O crescimento em volume e altura ao longo dos anos para *P. taeda*, IMA e IPA, estimado pelas equações, pode ser observado nas Figuras 19A e 19B.

Figura 19 – Curva de produção, incrementos médio e periódico anuais em altura (A) e volume (B) de *Pinus taeda* ao longo de 36 anos.



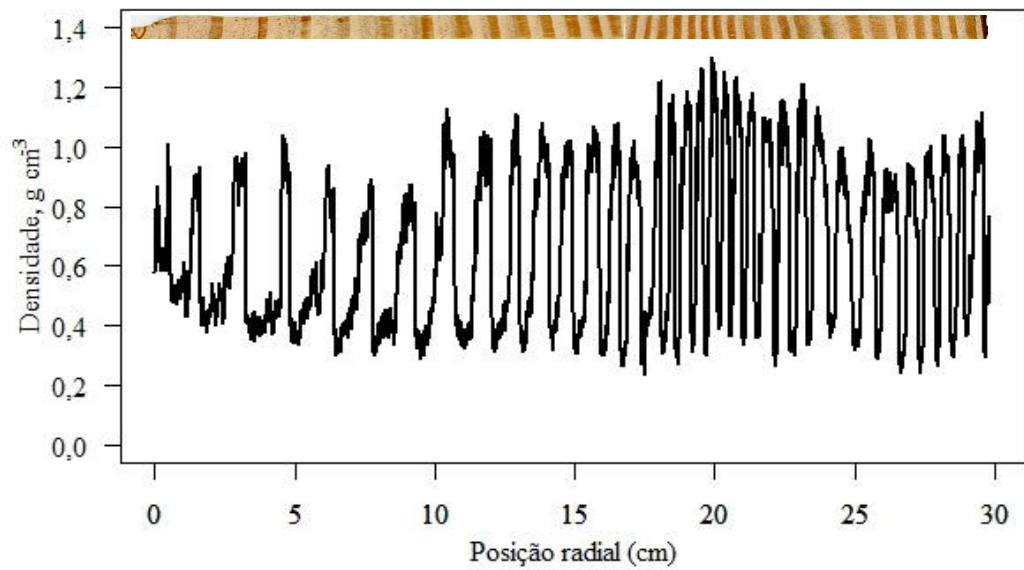
Nota: IMA = incremento médio anual; IPA = incremento periódico anual (altura – m ano<sup>-1</sup>; volume – m³ ano<sup>-1</sup>).  
 Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Aos 15 anos, observa-se um ganho de quase 2,5 metros em altura em comparação aos 12 anos. Para o volume, o maior crescimento se dá aos 30 anos, quando há um aumento de quase 0,16 m³ anuais em comparação ao período avaliado anteriormente, aos 19 anos. É possível visualizar que o incremento médio anual em altura segue em acréscimo até os 30 anos, e a partir daí, praticamente estabiliza.

### Análise da densidade

Com a finalidade de comprovar a acuracidade das medições de densidade obtidas, o perfil de densidade para a base de uma das árvores foi reconstituído, e pode ser visualizado na Figura 20. Nesta ilustração, é possível observar a acuracidade do método, podendo este também ser aplicado para a obtenção das espessuras do anel e dos lenhos tardio e inicial. A construção de um perfil de densidade também permite visualizar, de maneira bem clara, a diferença abrupta de densidade entre os lenhos inicial e tardio.

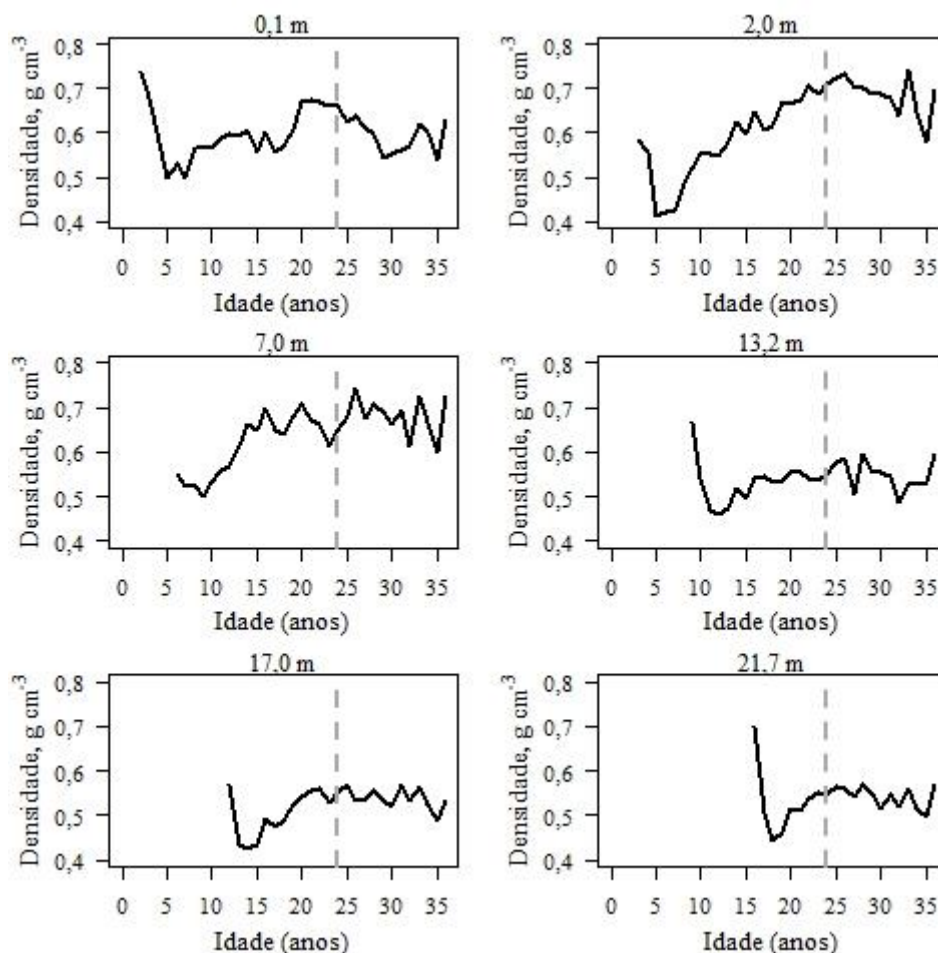
Figura 20 – Perfil de densidade de uma amostra da medula até a casca.



Fonte: Elaborado pela Autora (2019).

A média da densidade dos anéis, em g cm<sup>-3</sup>, pode ser visualizada na Figura 21, para as diferentes posições ao longo do fuste. Percebe-se, de maneira geral, que a densidade dos anéis tende a aumentar com a idade, e que os altos valores de densidade encontrados nos primeiros anos (próximos à medula) seguem um padrão esperado de variação de densidade no sentido radial da madeira.

Figura 21 – Densidade média dos anéis em diferentes posições no fuste de *Pinus taeda*.



Nota: a linha cinza pontilhada representa o ano em que a colheita parcial foi efetuada. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Aos 25 anos, um ano após a colheita parcial, foi observado um leve aumento da densidade média dos anéis em todas as posições do fuste, o qual é sustentado até o ano seguinte, aos 26 anos. Todavia, essa tendência não se mantém, pois os valores reduzem a partir dos 27 anos, e os picos de densidade após os 30 anos estão, provavelmente, relacionados a questões meteorológicas.

Em comparação com a espessura média dos anéis (Figura 16), o comportamento da densidade segue, em geral, uma tendência contrária. Isso fica evidente ao se observar os valores de correlação obtidos entre as variáveis analisadas (Tabela 10), onde a espessura média do anel, do lenho inicial e a proporção de lenho inicial apresentam uma correlação negativa com a densidade média do anel. Por outro lado, a espessura do lenho tardio demonstrou ter uma correlação positiva com a densidade média do anel em algumas alturas do fuste, mas a variável que apresentou ter maior implicação no comportamento da densidade média dos anéis de

crescimento foi a proporção de lenho tardio, que teve correlações positivas para todas as alturas avaliadas.

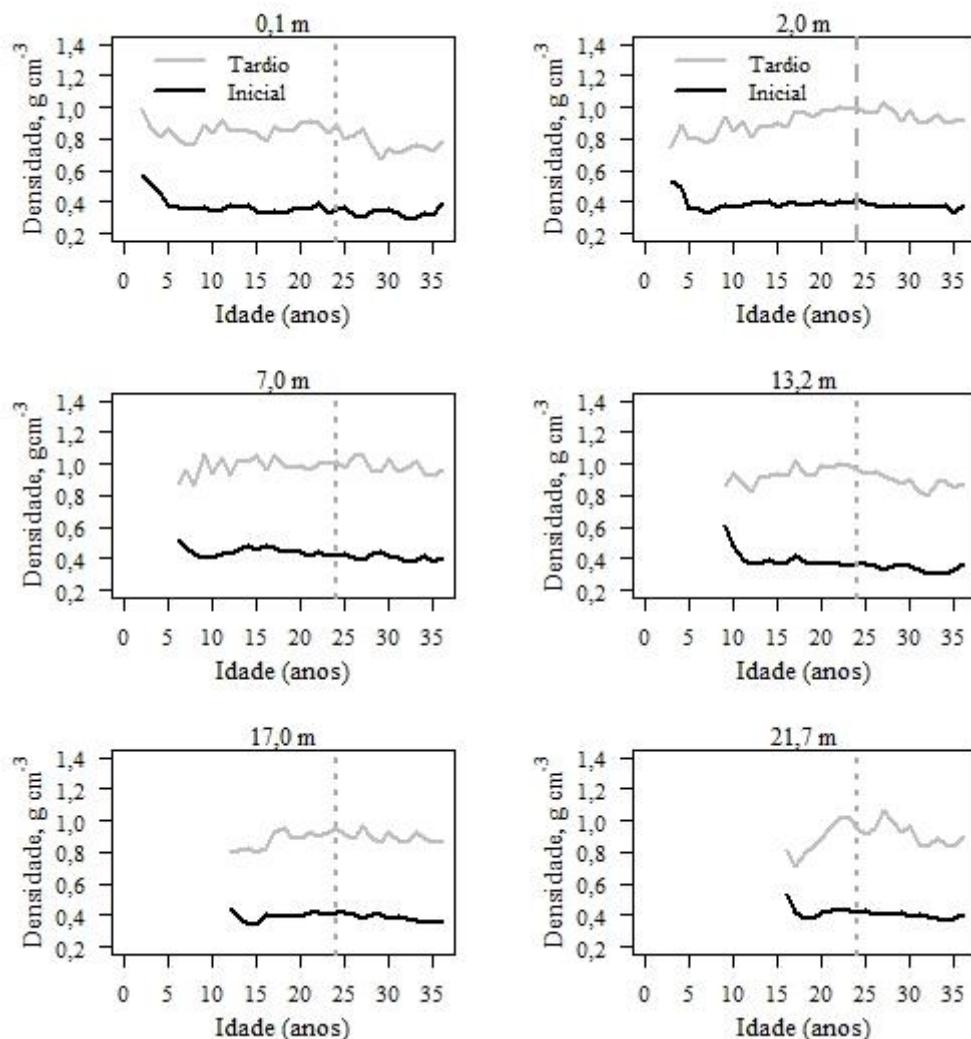
Tabela 10 – Valores de correlação entre espessura média do anel, do lenho inicial e do lenho tardio e proporções do lenho inicial e tardio com a densidade média do anel.

| Variáveis\Alturas                                    | 0,1 m | 2,0 m | 7,0 m | 13,2 m | 17,0 m | 21,7 m | Média |
|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Espessura média do anel x densidade média do anel    | -0,57 | -0,76 | -0,81 | -0,40  | -0,39  | -0,12  | -0,51 |
| Espessura do lenho inicial x densidade média do anel | -0,42 | -0,83 | -0,86 | -0,39  | -0,57  | -0,38  | -0,58 |
| Espessura do lenho tardio x densidade média do anel  | -0,06 | 0,41  | 0,32  | -0,15  | 0,52   | 0,59   | 0,27  |
| Proporção de lenho inicial x densidade média do anel | -0,24 | -0,92 | -0,91 | -0,39  | -0,82  | -0,79  | -0,68 |
| Proporção de lenho tardio x densidade média do anel  | 0,24  | 0,92  | 0,91  | 0,39   | 0,82   | 0,79   | 0,68  |

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A densidade dos lenhos inicial e tardio seguiu o padrão esperado, com lenho inicial menos denso ( $0,293 \text{ g cm}^{-3}$  a  $0,608 \text{ g cm}^{-3}$ ) e lenho tardio com densidade superior ( $0,673 \text{ g cm}^{-3}$  a  $0,963 \text{ g cm}^{-3}$ ). A densidade do lenho inicial foi maior nos primeiros anos, e depois apresentou pouca oscilação, em torno de  $0,400 \text{ g cm}^{-3}$ , com um leve acréscimo mais próximo à casca (34 a 36 anos). O lenho tardio, por sua vez, assemelhou-se a curva média de densidade, com picos observados também após os 30 anos de idade (31, 33 e 36 anos) (Figura 22).

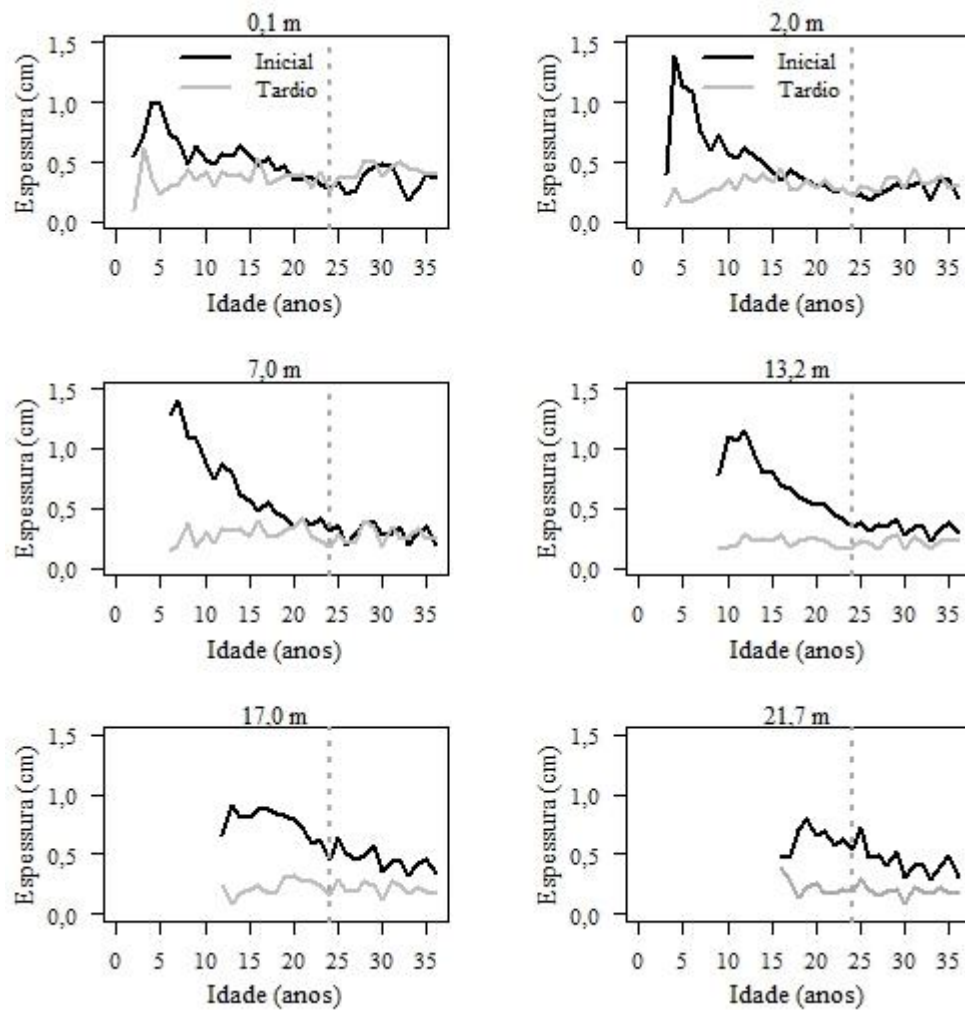
Figura 22 – Densidade dos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento de *Pinus taeda*.



Nota: a linha cinza pontilhada representa o ano em que a colheita parcial foi efetuada. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

No que se refere aos efeitos da colheita parcial na densidade dos lenhos inicial e tardio dos anéis, percebe-se que um ano após a colheita parcial, os valores de densidade do lenho inicial aumentaram (25 anos), porém, novamente, não mantêm a tendência nos anos seguintes. De maneira semelhante, houve também um singelo aumento na densidade do lenho tardio aos 25 anos em todas as posições do fuste avaliadas. A Figura 23 reforça esses resultados, pois nessa mesma idade, há um leve aumento nas espessuras do lenho inicial e tardio em praticamente todas as alturas analisadas. Além disso, nota-se que a espessura do lenho inicial é maior nos primeiros anos e vai reduzindo com o envelhecimento da árvore e consequente formação de madeira adulta.

Figura 23 – Espessuras médias do lenho inicial e tardio dos anéis de crescimento de *Pinus taeda*.

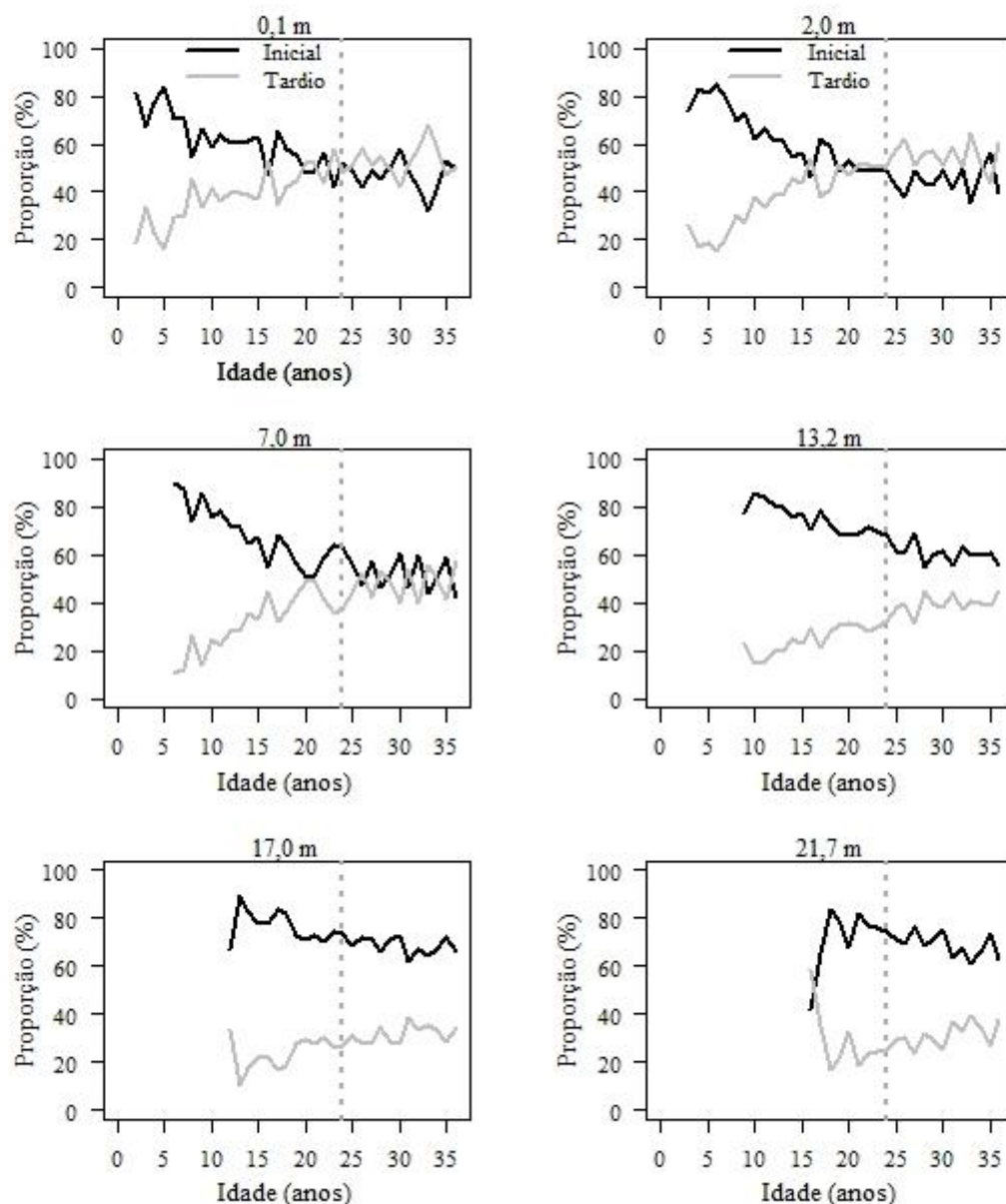


Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Com relação às proporções, o lenho inicial apresenta os maiores valores nos anos iniciais, semelhante ao padrão da espessura desse lenho. A proporção do lenho tardio tende a aumentar com a idade das árvores, possivelmente contribuindo para o aumento da densidade média dos anéis ao longo dos anos, observada na Figura 21. Em todas as alturas, foi observado que há um ganho na proporção de lenho tardio nos dois anos subsequentes à colheita parcial (Figura 24).



Figura 24 – Proporção do lenho inicial e tardio nos anéis de crescimento de *Pinus taeda*.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Em todos os parâmetros citados, foi possível observar diferenças em relação à madeira produzida ao longo do fuste de *P. taeda*, como era esperado. No geral, a madeira formada até 7,0 metros de altura apresentou maiores valores médios de densidade, maiores espessura e proporção de lenho inicial nos primeiros anos em comparação com o comportamento dessas variáveis em porções superiores do tronco.

No que se refere à transição de madeira juvenil à madeira adulta, esse processo ocorreu de forma gradual. Ao se observar as curvas de densidade média nas diferentes porções do tronco, nota-se que a região de transição ocorre entre o 10° e 15° anel de crescimento, e que, a partir do 16° anel de crescimento madeira adulta passa então a ser formada. A proporção de



lenho tardio (Figura 24) também corrobora com esses resultados, uma vez que há um aumento na proporção desse lenho na região de transição e na madeira adulta.

## DISCUSSÃO

### Análise do crescimento

As características de crescimento em diâmetro de *P. taeda* obtidas nesse trabalho reforçam seu comportamento pioneiro e de rápido crescimento, com maiores médias de espessura nos anos iniciais de crescimento. No presente trabalho, o crescimento máximo em diâmetro foi observado aos 4 anos, similar ao resultado de Dobner Jr. (2014) em estudo sobre a influência da intensidade de desbastes no crescimento de *P. taeda*, onde o ápice do crescimento foi verificado aos 3 anos. A partir do 4º ano as árvores passaram a competir por recursos (espaço, luz e nutrientes), resultando em uma redução da espessura dos anéis após esse período, evidenciando novamente o rápido crescimento da espécie.

Panshin e Zeeuw (1970) afirmam que a madeira mais próxima ao centro apresenta anéis largos, a qual é formada nos estágios iniciais de desenvolvimento das coníferas. Essa tendência já ficou evidente em vários trabalhos, como no de Foelkel et al. (1975) com *P. elliottii* e Tasissa e Burkhart (1997) com *P. taeda*.

Os acréscimos e decréscimos na largura dos anéis e, conseqüentemente, no diâmetro das árvores nas diferentes alturas, são possíveis reflexos dos desbastes conduzidos na empresa. Assim, pode-se afirmar que houveram desbastes entre os 10 e 11 anos de idade, 17 e 18 anos de idade e aos 23 anos de idade. Como um efeito geral, o crescimento das árvores reduz nos anos em que desbastes são conduzidos, de acordo com os resultados de Dobner Jr (2014).

Foi observado, também, que houve uma alternância nas maiores respostas em diâmetro ao longo do tronco da árvore. Até os 11 anos, as maiores médias de espessura dos anéis foram obtidas até os 7,0 m de altura, e depois os maiores crescimentos em diâmetro foram verificados nas maiores alturas. Com a colheita parcial, entretanto, as maiores médias passassem a ser visualizadas, novamente, na base das árvores a partir dos 26 anos (0,1 m e 0,7 m).

De acordo com Andrade et al. (2007), árvores que estão sob competição, em virtude do crescimento e aumento da idade das árvores, tendem a deslocar os máximos em incremento para maiores alturas do tronco, como uma estratégia para buscar mais luminosidade para as copas e manter a taxa de crescimento.

Entretanto, os mesmos autores afirmam que, após a diminuição da competição por intervenções na floresta como desbaste, os maiores incrementos voltam a ocorrer nas porções

inferiores do tronco, assim como observado neste estudo. De fato, a densidade da floresta é um fator determinante no padrão de deposição de madeira ao longo do tronco. A liberação da competição promove a produção de uma árvore mais afilada devido a maior estimulação da produção do xilema na base do tronco do que em alturas maiores (KOZLOWSKI, 1971), como uma tática para melhorar a sustentação das árvores também.

A tendência das árvores de *P. taeda* apresentarem as maiores médias de espessura dos anéis de crescimento na base após uma liberação de competição, geralmente por desbastes, foi observada em outros estudos também. Dobner Jr. (2014) destaca que as influências positivas no crescimento após desbastes em *P. taeda* são mais rapidamente detectadas na base das árvores, e que a resposta em alturas maiores demora mais para ser observada. Tasissa e Burkhart (1997), cujo estudo também foi o efeito dos desbastes no crescimento de *P. taeda*, observaram que, nos três primeiros anos após o desbaste, houve um efeito no crescimento apenas na base das árvores, indicando que a resposta em alturas maiores na árvore necessita de mais tempo para serem detectadas. De maneira semelhante, Peltola et al. (2002) verificaram uma resposta ao desbaste em *P. sylvestris* aos três anos após desbaste somente na base das árvores, e que ao longo de 12 anos após desbaste, os maiores incrementos foram observados nos tratamentos com desbaste mais pesado e nas porções mais próximas à base das árvores.

Já com relação aos menores incrementos, estes foram observados nos anéis obtidos a ~2,0 m até os 26 anos de idade e, entre 28 e 34 anos, na porção correspondente à ~21,7 m. Segundo Assmann (1970), em povoamentos jovens onde as árvores estão sujeitas à concorrência, os menores incrementos são visualizados nas alturas próximo à altura do peito (dap), como observado no presente trabalho, e em povoamentos mais velhos, isso ocorre em alturas maiores, em torno de 12 m de altura. Assim, percebe-se que os menores valores e incremento estão relacionados, também, à classe sociológica das árvores (ANDRADE et al., 2007).

Dobner Jr. (2014) verificou que os efeitos dos desbastes são observados por mais tempo em alturas maiores do que na base de árvores de *P. taeda*. O autor percebeu que dos 21 aos 30 anos, a taxa de crescimento a 50% da altura total das árvores foi significativamente maior que na base das árvores, e o mesmo aconteceu a 75% da altura total (~23 m de altura).

Todavia, esse efeito não foi constatado no presente trabalho, pois, a partir do 25º ano, os anéis de crescimento em diferentes alturas apresentaram a mesma tendência e não mantêm uma taxa de crescimento, pois há uma queda logo aos 26 anos, com posterior retomada aos 27 anos. Isso pode ser explicado pelo fato de que as árvores primeiramente direcionam os produtos derivados da fotossíntese para a região ativa em crescimento da copa e, uma vez que a

necessidade dessa região em termos de crescimento e fotossíntese é atendida, tais materiais são transportados para a base do tronco para estoque e outras funções (KOZLOWSKI, 1971).

Com relação ao ICA e IMA diamétricos de *P. taeda*, houve o cruzamento das linhas mais de uma vez em diferentes alturas ao longo do fuste. Isso é um possível resultado das intervenções feitas no talhão de *Pinus* ao longo dos anos, as quais resultaram em um aumento do diâmetro nos anos seguintes, uma vez que a interceptação da curva do IMA e ICA representa a idade aproximada de maiores ganhos no crescimento em diâmetro, ou IMA máximo (SILVA, 2012; CARNEIRO et al., 2018).

A produção em diâmetro de *P. taeda* também demonstra o potencial de crescimento da mesma e justifica, portanto, sua ampla utilização para plantios florestais no Sul do Brasil. A 1,3 m de altura, aos 21 anos, a espécie já acumulava aproximadamente 35 cm de diâmetro, desempenho muito semelhante ao obtido por Souza et al. (2018), em trabalho conduzido na mesma região, onde os autores constataram uma produção em diâmetro a 1,3 m de 33,6 cm para a mesma idade. Nesse caso, os autores discutem ainda que esse notável resultado, em comparação à produção diamétrica de *P. elliottii*, *Pinus patula* e *Cupressus lusitanica*, se deve aos dois desbastes que foram conduzidos no talhão, o que promoveu uma resposta maior do que as demais espécies que sofreram apenas um desbaste.

O comportamento do incremento médio de *C. lusitanica* em diâmetro, altura e volume indica um crescimento mais lento em comparação a *P. taeda*. Com relação a variável diâmetro, analisados a 1,3 m, *C. lusitanica* apresentou um IMA de 0,97 cm ano<sup>-1</sup> aos 13 anos. Para a mesma idade e mesma altura, *P. taeda* tinha um IMA de 1,85 cm ano<sup>-1</sup>, ou seja, 90% superior.

Tais resultados são inferiores aos encontrados por Souza et al. (2018), que observaram um IMA em diâmetro de aproximadamente 1 cm ano<sup>-1</sup> para *C. lusitanica*, e também menores que os obtidos por Rauschkolb (2017), cujo IMA foi de 1,67 cm ano<sup>-1</sup> em um plantio puro de *C. lusitanica*, ambos conduzidos na mesma região onde o presente estudo foi realizado. Com relação ao IMA volumétrico, Souza et al. (2018) encontraram um valor de aproximadamente 0,0150 m<sup>3</sup> árv ano<sup>-1</sup>, que é superior ao do presente trabalho, 0,0091 m<sup>3</sup> árv ano<sup>-1</sup>. Por unidade de área, *C. lusitanica* cresceu em média 13,22 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>, também menor que o obtido em plantios puros da espécie, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Variáveis dendrométricas de *Cupressus lusitanica* encontrada em outros estudos com plantios puros.

| País       | Idade | D     | d    | IMAd | h    | IMAh | V     | IMAV  | IMAv   | Autores                  |
|------------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|--------|--------------------------|
| Etiópia    | 10    | 1.503 | 12,6 | 1,26 | 18,2 | 1,82 |       |       |        | Asaye; Zewdie (2013)     |
| Costa Rica | 10    | 1.293 | 15,5 | 1,55 |      |      |       |       |        | Chinchilla et al. (2011) |
| Costa Rica | 10    | 1.427 | 16,8 | 1,68 |      |      |       |       |        | Chinchilla et al. (2011) |
| Brasil     | 13    | 1.444 | 12,6 | 0,97 | 12   | 0,92 | 171,9 | 13,22 | 0,0091 | Presente estudo          |
| Etiópia    | 15    | 803   |      |      |      |      | 220   | 14,67 | 0,0183 | Lemenih et al. (2004)    |
| Brasil     | 15    | 833   | 20   | 1,33 | 20   | 1,33 |       |       |        | Venturini et al. (2018)  |
| Etiópia    | 16    | 1.250 |      |      |      |      | 296,5 | 18,53 | 0,0148 | Mamo; Adilo (2004)       |
| Costa Rica | 18    | 408   | 28   | 1,55 | 19,2 | 1,06 |       |       |        | Roque et al. (2010)      |
| Tanzânia   | 19    | 1.690 | 16,4 | 0,86 | 20,3 | 1,06 | 349   | 18,36 | 0,0108 | Malimbwi et al. (1992)   |
| Tanzânia   | 23    |       | 25   | 1,08 | 22,4 | 0,97 | 350,2 | 15,22 | -      | Luoga et al. (1994)      |
| Tanzânia   | 23    |       | 23,4 | 1,02 | 22,1 | 0,96 | 352,4 | 15,32 | -      | Luoga et al. (1994)      |
| Etiópia    | 27    | 444   | 31,5 | 1,16 | 18,6 | 0,68 |       |       |        | Alem et al. (2015)       |

Nota: Idade (anos); D = Densidade (árvores ha<sup>-1</sup>), d = dap (cm); IMAd = incremento médio anual em diâmetro (cm ano<sup>-1</sup>); h = altura total (m); IMAh = incremento médio anual em altura (m ano<sup>-1</sup>); V = volume total (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>); IMAV = incremento médio anual em volume por hectare (m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>); IMAv = incremento médio anual individual em volume (m<sup>3</sup> árv ano<sup>-1</sup>). Os valores de IMA foram aqui calculados e não estão descritos nos trabalhos citados. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

O incremento médio anual em altura para *C. lusitanica* também foi menor que o de outros trabalhos, com um valor de 0,92 m ano<sup>-1</sup> (Tabela 11). No trabalho de Chaverri et al. (1997), avaliando quatro espécies nativas da Costa Rica em plantio misto com *C. lusitanica*, a espécie apresentou os maiores incrementos em diâmetro aos 11 anos, com destaque também no ICA em altura, atingindo um valor de 2,0 m ano<sup>-1</sup>. Os autores comentam que esse resultado já era esperado, pois *C. lusitanica* apresenta crescimento rápido a médio, em contrapartida às espécies nativas costariquenhãs, que possuem um crescimento mais lento.

Comparando os dados obtidos no presente estudo com os da Tabela 10, os incrementos médios anuais em diâmetro, altura e volume são menores que os observados em outros trabalhos com *C. lusitanica* em outros países. As únicas exceções se referem ao IMA em diâmetro do trabalho de Malimbwi et al. (1992), na Tanzânia e IMA em altura do trabalho de Alem et al. (2015), na Etiópia, cujos valores foram inferiores aos encontrados neste estudo.

Ainda de acordo com informações obtidas por Chaves e Fonseca (1991), os dados de plantios de *C. lusitanica* na América Central giram em torno de 1 m de incremento anual em altura e dap entre 0,65 a 1,4 cm ano<sup>-1</sup>. Assim, os dados obtidos no presente trabalho estão dentro dessa faixa de abrangência.

Com relação à estimativa de altura e volume de *P. taeda*, as equações utilizadas apresentaram estimativas bem próximas aos resultados obtidos no inventário, aos 36 anos, por

exemplo. Aos 36 anos, a média de altura observada foi de 29,8 m e o volume foi de 3,7057 m<sup>3</sup>, enquanto que a altura estimada foi de 32,44 m e o volume médio estimado foi de 3,3402 m<sup>3</sup>. Nota-se, portanto, que a equação usada para a altura tende a superestimar a altura e subestimar o volume.

Nas demais idades, de acordo com a Tabela 12, as médias de altura estimadas são semelhantes aos dados de altura de Dobner Jr. (2014) e Nicoletti et al. (2017), os quais obtiveram tais dados através de medições a campo, por inventário e cubagem, respectivamente. Assim, de maneira geral, a equação e coeficientes utilizados para estimar a altura de *P. taeda* aos 7, 12, 16, 19 e 30 anos foram adequados para o conjunto de dados analisado.

Tabela 12 – Dados de altura e volume estimados para as idades de 7, 12, 16, 19, 30 e 36 anos para *Pinus taeda*.

| Idade | dap  | h    | Ima_h | v      | h <sub>1</sub> | Ima <sub>1</sub> | h <sub>2</sub> | Ima <sub>2</sub> |
|-------|------|------|-------|--------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| 7     | 13,7 | 12,5 | 1,8   |        | 11,0           | 1,6              | 14,5           | 2,1              |
| 12    | 22,5 | 16,6 | 1,4   | 0,3259 | 17,6           | 1,5              | 17,5           | 1,5              |
| 16    | 28,5 | 25,6 | 1,6   | 0,7951 | 21,1           | 1,4              | 27,1           | 1,7              |
| 19    | 32,3 | 26,1 | 1,4   | 1,0060 | 26,2           | 1,3              | 27,4           | 1,4              |
| 30    | 45,9 | 32,0 | 1,1   | 2,7423 | 34,4           | 1,1              | 32,4           | 1,1              |
| 36    | 53,4 | 32,4 | 0,9   | 3,3402 |                |                  |                |                  |

Nota: dap, em cm; h = altura, em m; Ima\_h = incremento médio anual em altura, em m ano<sup>-1</sup>; v = volume individual, em m<sup>3</sup>; h<sub>1</sub> = dados de altura de Dobner Jr. (2014), em m; Ima<sub>1</sub> = incremento médio anual em altura de Dobner Jr. (2014), em m ano<sup>-1</sup>; h<sub>2</sub> = dados de altura de Nicoletti et al. (2017), em m; Ima<sub>2</sub> = incremento médio anual em altura de Nicoletti et al. (2017), em m ano<sup>-1</sup>. Os dados de dap foram obtidos pela análise de tronco. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Para o incremento em altura, há maiores ganhos nos primeiros anos, onde o IMA atinge seu pico aos 7 anos, com um ganho anual de quase 2 metros de altura. Com o tempo, os ganhos em altura reduzem, chegando a atingir 0,9 m ano<sup>-1</sup> aos 36 anos. Em comparação com os outros dois trabalhos, os resultados em ganhos anuais de altura são semelhantes, comprovando as maiores taxas de crescimento nos primeiros anos.

Assim como a altura, observa-se que o volume aumenta com o tempo, atingindo seu pico aos 36 anos. Já o IMA volumétrico, ao contrário do IMA em altura, tende a aumentar com a idade, atingindo seu máximo aos 36 anos. Esse comportamento já era esperado, pois o volume está diretamente relacionado ao diâmetro, o qual também apresenta ganhos relativos significativos.

Além disso, vale ressaltar que o ganho em volume também se deve ao aumento do diâmetro após a colheita parcial. Dobner Jr. (2014) verificou que as médias de volume

individual aumentaram com a intensidade dos desbastes executados, além de respostas imediatas do diâmetro aos desbastes.

### **Análise da densidade**

As curvas médias de densidade dos anéis em diferentes posições ao longo do fuste seguiram um padrão semelhante entre si (Figura 21). Mesmo em diferentes alturas, as curvas apresentaram aumentos e reduções na densidade nos mesmos anos. Além disso, os valores elevados de densidade já nos primeiros anos seguem um dos modelos de variação desta variável no sentido radial, como exposto por Panshin e Zeeuw (1970), onde a densidade é alta na medula, decresce nos anéis formados na sequência e depois aumenta até atingir um máximo próximo à casca.

Entretanto, seguindo esse modelo, o pico de densidade próximo à casca foi observado apenas para a curva da densidade aos 2,0 m de altura. Nas porções superiores, a partir dos 13 m de altura, o valor máximo de densidade foi obtido na medula.

Além desse comportamento característico, outro fato que pode ter influenciado nos altos valores de densidade nos anéis mais próximos à medula foi o conteúdo de resina. No trabalho de Dobner Jr. (2014), com *P. taeda*, o autor verificou que a presença de resina na madeira na região mais próxima à medula superestimou os valores de densidade.

Outro padrão observado foi o de aumento da densidade média da madeira com a idade de *P. taeda*, que é o padrão mais comum para as coníferas (FOELKEL et al., 1975). Vários estudos com coníferas perceberam esse mesmo modelo da densidade média no sentido medula-casca, como Iwakiri et al. (2002), Sousa et al. (2007), Dobner Jr. (2014) e Melo (2015) para *P. taeda*, Guller et al. (2012) para *Pinus brutia* Ten., Cown (1992) para *P. radiata* e Rios et al. (2018) para *P. patula*.

Mesmo seguindo um ou outro padrão de comportamento, a densidade pode ser afetada por diversos fatores. Megraw (1985) aponta que a combinação entre solo, umidade, temperatura e luminosidade podem, eventualmente, produzir interações que influenciam na densidade da madeira. Assim, os pontos elevados de densidade que foram observados após os 30 anos de idade são possivelmente relacionados a condições meteorológicas locais, uma vez que não foi feito nenhum trato silvicultural na área nesse período.

De fato, as diferenças em densidade da madeira de coníferas estão possivelmente mais relacionadas à qualidade do sítio, como clima e solo (MEGRAW, 1985). Guller et al. (2012) notaram que, na área com índice de sítio 19,8, a densidade e proporção do lenho tardio foram maiores do que na área com índice de sítio 13,7, para *P. brutia*. Ainda, os autores afirmam que

os componentes do lenho tardio, como densidade e proporção, tendem a ser mais sensíveis às condições ambientais, e que, além da densidade, tanto lenho inicial quanto lenho tardio apresentaram espessuras maiores no melhor sítio do que no de qualidade inferior.

Para o período de 36 anos, a média geral da densidade foi de  $0,576 \text{ g cm}^{-3}$ , que é próximo à valores médios de densidade de *P. taeda* com idades parecidas, como o obtido por Dobner Jr. (2014),  $0,530 \text{ g cm}^{-3}$  para árvores com 30 anos, e por Ballarin e Palma (2003), que encontraram uma densidade média de  $0,605 \text{ g cm}^{-3}$  para árvores com 37 anos. Isso comprova o fato de que a densidade média de uma árvore está, dentre outros fatores, relacionada à sua idade, assim como verificado por Sousa et al. (2007).

No sentido longitudinal, foram constatados maiores valores de densidade média nas porções inferiores da árvore (até os 7 metros de altura), especialmente entre os 2,0 m e 7,0 m de altura. Com relação aos lenhos, foi observado que a proporção de lenho inicial tende a ser maior em porções superiores do tronco.

De acordo com Barnett e Jeronimidis (2003), a densidade básica da madeira de coníferas e angiospermas oscila com a altura da árvore. Para *P. sylvestris*, a densidade da madeira gira em torno de  $0,460 \text{ g cm}^{-3}$  na base e vai reduzindo ao longo da altura da árvore até atingir em torno de  $0,360 \text{ g cm}^{-3}$  no topo. Já para *P. abies*, a densidade da base é de aproximadamente  $0,410 \text{ g cm}^{-3}$ , reduz ao longo do tronco, e atinge  $0,400 \text{ g cm}^{-3}$  no topo da árvore. Para tais espécies, a média de densidade da árvore fica em torno de 25% da altura total. A redução da densidade da base do tronco para o topo da árvore também foi constatada por Melo (2015) para *P. taeda*, por Vincent et al. (2011) para *Picea mariana*, no Canadá e por Rios et al. (2018), para *P. patula*, no Brasil, e é uma tendência que a madeira na porção basal do tronco seja mais densa que em níveis mais altos, sobretudo em coníferas (PANSKIN; ZEEUW, 1970). Isso se deve ao fato de que a madeira formada na copa das árvores é composta, em sua maioria, por madeira juvenil, que naturalmente tem densidade menor que madeira adulta.

### **Madeira juvenil e adulta**

A transição entre madeira juvenil e adulta ocorreu de forma gradual, ou seja, foi observada uma zona de transição entre esses dois tipos de madeira, entre o 10° e 15° anel de crescimento, onde houve um aumento da densidade média do anel de crescimento. Esse comportamento fica bem evidente ao se observar o perfil de densidade, por exemplo (Figura 21), onde observa-se a formação de madeira juvenil até os 9 anos, depois há uma região de transição até os 15 anos, e a partir do 16° ano, ocorre a formação de madeira adulta.

Esses resultados estão de acordo com a literatura. Para *Pinus* em geral, a madeira juvenil é formada entre os 10 e 15 anos das árvores (ZOBEL; SPRAGUE, 1998). De acordo com Megraw (1985), a transição entre esses dois tipos de madeira, em *P. taeda*, geralmente ocorre entre 8 e 12 anos. Em seu trabalho, o autor também observou que a madeira adulta produzida após os 11 anos apresentou características consideravelmente distintas em comparação à madeira produzida em idades mais jovens.

Dobner Jr. (2014) observou que *P. taeda* passa a produzir madeira adulta aos 13 e aos 17 anos, de acordo com a intensidade e idade onde são feitos os desbastes. Tasissa e Burkhart (1998) indicam uma idade de aproximadamente 11 anos como a idade cambial ou fisiológica de produção de madeira adulta, em *P. taeda* também. Ballarin e Palma (2003) observaram a formação de madeira juvenil até o 14º anel de crescimento, região de transição do 14º ao 18º anel, e formação de madeira adulta a partir do 18º anel de crescimento em *P. taeda* com 37 anos. No trabalho de Guller et al. (2012), o período de transição entre madeira juvenil e adulta para *P. brutia* foi aos 12 anos. Larson et al. (2001) indicam que a madeira juvenil compreende os 8 primeiros anéis de crescimento, com adição de 2 anéis a 4 anéis de transição para as espécies de *Pinus* do Sul dos EUA, incluindo *P. taeda*.

A partir da produção de madeira adulta, foi observado, de maneira geral, um aumento na densidade do anel. Esse comportamento, de que a madeira adulta apresente densidade maior que a madeira juvenil, já é esperado, uma vez que foi observado em diversos estudos (BENDTSON, 1978; LARSON et al., 2001; BALLARIN; PALMA, 2003; DOBNER Jr. et al., 2018).

O desempenho da densidade na madeira juvenil e adulta está associado a características dos lenhos inicial e tardio, como densidade, espessura e proporção. De acordo com Dobner Jr. et al. (2018), madeira adulta passa a ser formada a partir da estabilização da densidade do anel, da densidade e proporção do lenho tardio. Koubaa et al. (2002) verificaram que a madeira juvenil de *Picea mariana* apresentou maiores médias de densidade do lenho inicial na madeira juvenil do que na madeira adulta, enquanto que, na madeira adulta, observa-se uma maior densidade média do lenho tardio do que na madeira juvenil.

No presente trabalho, as maiores médias de densidade do lenho inicial também foram obtidas na madeira juvenil, com um decréscimo nos primeiros anéis próximos à medula, passando por uma certa estabilização e apresentando um singelo aumento mais perto da casca, assim como descrito por Foelkel et al. (1975). O aumento da densidade do lenho tardio na madeira adulta foi verificado nas porções a 2,0 m, 7,0 m e 21,7 m (Figura 22).



O aumento da densidade do lenho tardio em comparação com o lenho inicial acontece devido à redução do lúmen dos traqueídeos, redução do comprimento e aumento da espessura da parede celular tanto no sentido tangencial quanto no radial, e também a mudanças químicas, como uma consequência da variação da estrutura da parede celular (LARSON et al., 2001; DECOUX et al., 2004).

A espessura e a proporção de lenho inicial, expressos nas Figuras 23 e 24, respectivamente, são maiores na madeira juvenil (primeiros anos) e começam a reduzir já na região de transição. A espessura do lenho tardio não apresenta grandes diferenças ao longo dos anos, mas observa-se uma espessura melhor distribuída entre lenho inicial e tardio na madeira adulta. Já a proporção do lenho tardio é visivelmente menor na madeira juvenil e aumenta ao longo dos anos, com a formação de madeira adulta.

Esses resultados são semelhantes ao de Koubaa et al. (2002), onde a espessura do lenho inicial foi maior na madeira juvenil de *P. mariana*. Os mesmos autores observaram um aumento na proporção de lenho tardio na madeira adulta em comparação à proporção deste na madeira juvenil. Foelkel et al. (1975) obtiveram altos teores, em porcentagem de volume, de lenho inicial na madeira juvenil, com redução do teor de lenho inicial e aumento do lenho tardio com o envelhecimento de *P. elliotii*.

Dentre esses atributos, o que demonstrou ter maior influência no comportamento da densidade média dos anéis no presente estudo foi a proporção do lenho tardio, que atingiu um coeficiente de correlação maior que 0,9 nas alturas de 2,0 m e 7,0 m, por exemplo. De fato, Panshin e Zeeuw (1970) estabelecem que a proporção de lenho tardio apresenta uma alta correlação com a densidade da madeira, assim como Melo et al. (2010).

Madeira juvenil, em geral, apresenta um menor desempenho em propriedades físicas em comparação à madeira adulta, incluindo a densidade. Isso se deve à características anatômicas e químicas, como paredes celulares mais finas, traqueídeos mais curtos com lúmens grandes, baixo conteúdo de celulose, alto teor de lignina (ZOBEL; SPRAGUE, 1998), maior ângulo das microfibrilas, maior grã espiral, encolhimento longitudinal maior e baixa porcentagem de lenho tardio (BENDTSON, 1978).

Bao et al. (2001), analisando as propriedades anatômicas, físicas e mecânicas de 10 espécies arbóreas de coníferas e angiospermas na China, incluindo *P. taeda*, indicaram que as propriedades da madeira de árvores plantadas dependem, principalmente, de suas madeiras juvenis e do período de rotação. Assim, árvores que são plantadas para fins estruturais devem ser manejadas por um período maior a fim de produzir toras maiores com uma menor proporção de madeira juvenil, pois, de maneira geral, quanto maior a idade de rotação, menor o conteúdo

de madeira juvenil, e melhores as propriedades mecânicas da madeira produzida. Larson et al. (2001) apontam que quanto mais velha e larga a árvore, menor o volume de madeira juvenil. O mesmo foi verificado por Sousa et al. (2007), que determinam que há maiores proporções de madeira adulta árvores mais velhas.

Além disso, Cown (1992) afirma que o mercado de madeira limpa, *clean wood*, exige qualidade na aparência, estabilidade e maquinabilidade, o que não pode ser garantido com a madeira juvenil. Assim, uma rotação maior, com árvores mais velhas, é o jeito mais simples de minimizar a proporção de madeira juvenil, mas tal mudança silvicultural apenas justifica-se com um forte argumento econômico.

### **Efeitos da colheita parcial na largura e densidade dos anéis**

Foi observado que houve um aumento da espessura dos anéis um ano após a colheita parcial (Figura 16), de 1,4 a 2 cm de diâmetro, sendo que também houve um acréscimo na densidade nos dois anos subsequentes (Figura 21). Entretanto, essa tendência não foi sustentada nos anos seguintes, o que permite afirmar que a liberação de espaço teve um efeito pouco duradouro na densidade da madeira de *P. taeda*, porém teve efeito na largura média dos anéis, que aumentaram com a colheita parcial.

Mesmo que os efeitos de intervenções possam durar até 12 anos, como no trabalho de Tasissa e Burkhart (1997), os impactos de tratamentos silviculturais na densidade da madeira podem ter um efeito em curto prazo, resultando em diferenças nos primeiros anos após a aplicação do tratamento silvicultural, e depois tender a desaparecer (LARSON et al., 2001; MORA et al., 2007), como observado no presente estudo.

Conforme já citado, vários trabalhos demonstram o efeito positivo de intervenções, como desbastes, no aumento da largura de anéis de crescimento (TASSISSA; BURKHART, 1997; PELTOLA et al., 2007; GULLER et al., 2012; DOBNER Jr., 2014). Em termos de liberação de competição mais abruptas, como colheita parcial, e seus efeitos no crescimento em diâmetro, Bebbert et al. (2004) avaliaram a resposta de árvores maduras de *Pinus strobus* L. à colheita parcial para formação de sistema sob cobertura, no Canadá, e perceberam a primeira resposta em crescimento em diâmetro somente três anos após a intervenção, a qual aumentou até, pelo menos, os oito anos após a colheita parcial. No presente estudo, mesmo aos 10 anos após a colheita parcial (34 anos), a espessura dos anéis foi maior que 0,5 cm, ou seja, incremento em diâmetro de, pelo menos, 1 cm ano<sup>-1</sup>.

Assim, percebe-se que o aumento na largura dos anéis pela colheita parcial não representou um ganho na densidade dos mesmos, possivelmente como um resultado da

espessura do lenho inicial. No perfil de densidade construído com os dados da base de uma das árvores (Figura 20), fica bem evidente a espessura dos anéis e sua relação com a densidade, onde os anéis mais largos tiveram uma densidade média menor.

A correlação negativa entre essas duas variáveis também permite afirmar que ganhos em espessura dos anéis de crescimento está acompanhando de redução na densidade, assim como constatado por Dobner Jr. et al. (2018). Panshin e Zeeuw (1970) afirmam que há uma propensão de redução da densidade do anel de crescimento com o aumento da largura deste.

### **Efeitos da colheita parcial na qualidade da madeira**

A largura dos anéis é uma variável muito utilizada em alguns mercados para analisar a qualidade da madeira (DOBNER Jr. et al., 2018). Nos EUA, Castillo et al. (2000) reportam que os anéis de crescimento de *P. taeda* devem ter uma largura de até 0,6 cm para a madeira ser empregada em fins estruturais. Pollet et al. (2017) indicam que a média de largura dos anéis de 0,4 cm para madeira juvenil e 0,6 cm para madeira adulta de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Douglas-fir, são valores aceitáveis para acomodar todos os potenciais usos da madeira dessa espécie.

Todavia, como a espessura dos anéis de crescimento, sozinha, não está necessariamente correlacionada com a qualidade da madeira (LARSON et al., 2001), Dickens e Moorhead (2005) relacionaram a espessura dos anéis com a quantidade de lenho tardio por anel para classificar as madeiras como “densas”, as quais apresentariam maior resistência e, conseqüentemente, maiores valores de mercado, nos EUA. Assim, os autores definem que uma madeira densa deve ter uma espessura de 0,6 cm por anel para aqueles com  $\geq 30\%$  de lenho tardio por anel ou 0,4 cm para anéis com  $\geq 50\%$  de lenho tardio. Nesse sentido, os autores ainda afirmam que *P. taeda* deve apresentar uma média de crescimento em diâmetro de até 1,27 cm ano<sup>-1</sup> (ou ~0,64 cm de largura dos anéis).

Considerando toda a idade das árvores, as espessuras dos anéis variaram de 0,39 cm a 1,72 cm no presente estudo. As maiores espessuras foram obtidas nos primeiros anos, mas mesmo durante a formação de madeira adulta, anéis com espessura acima de 0,6 cm foram observados. No geral, o ICA diamétrico teve uma média de 1,61 cm ano<sup>-1</sup>, chegando a atingir até mesmo um ICA em diâmetro de 1,81 cm ano<sup>-1</sup> na base das árvores. Assim, em contraste com os limites determinados por Dickens e Moorhead (2005) para o mercado estadunidense, pode-se afirmar que a madeira produzida não pode ser considerada como densa. Além disso, os mesmos autores discutem que anéis largos reduzem a uniformidade da madeira, pois as áreas

com baixa (lenho inicial) e alta (lenho tardio) densidade geram grandes diferenças na resistência ao longo de uma peça de madeira para fins estruturais, por exemplo.

É importante, também, analisar a uniformidade dos anéis de crescimento ao se falar em qualidade da madeira. Geralmente, a uniformidade se refere à largura dos anéis, que é diretamente influenciada pelas condições de crescimento das plantas. Nesse sentido, mudanças abruptas nessas condições podem contribuir para taxas desuniformes de crescimento radial. Assim, anéis de crescimento mais homogêneos podem ser obtidos com desbastes frequentes e leves, às custas de um menor volume de produção de madeira (LARSON et al., 2001).

Além disso, a madeira de coníferas de melhor qualidade e uniformidade em termos de densidade é produzida sob uma taxa de crescimento normal (PANSWIN; ZEEUW; 1970). No trabalho de Dobner Jr. (2014), o autor observou que os tratamentos com desbastes resultaram em perfis de densidade mais homogêneos. A produção de madeira mais uniforme em relação à densidade como resultado de desbastes também foi obtida no trabalho de Guller et al. (2012). Observando as Figuras 16 e 21, nota-se que a colheita parcial acabou gerando perfis de largura dos anéis e de densidade desuniformes.

## CONCLUSÃO

Os resultados discutidos no presente capítulo permitem concluir que a madeira de *Pinus taeda* apresentou um crescimento mais rápido que *Cupressus lusitanica*, e, considerando a mesma idade, 13 anos, *P. taeda* do estrato superior teve um incremento médio diamétrico anual quase duas vezes maior que *C. lusitanica*. No geral, *P. taeda* apresentou anéis variando de 0,4 cm a 1,7 cm, e os anéis mais largos foram obtidos nos primeiros anos de crescimento. Além disso, a densidade dos anéis de crescimento de *P. taeda* apresentou uma tendência de aumento com a idade e de altas densidades na medula. Como efeito da colheita parcial de *P. taeda* no estrato superior, foi verificado aumento da espessura e da densidade dos anéis nos anos subsequentes à intervenção, porém esse efeito foi pouco duradouro na densidade da madeira. A liberação de competição através da colheita parcial também gerou perfis de espessura e densidade dos anéis desuniformes.

## 7. CAPÍTULO III: AFILAMENTO DO TRONCO E AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE *Cupressus lusitanica* SOB COBERTURA DE *Pinus taeda*

### RESUMO

Um plantio sob cobertura é definido como o plantio de uma floresta jovem sob a cobertura de um estrato arbóreo pré-estabelecido. Uma das vantagens desse sistema se refere ao melhor aproveitamento do espaço produtivo, com ganho de incremento das árvores da cobertura com consequente produção de toras de maior diâmetro e com alta qualidade. Ao mesmo tempo, uma floresta bem estabelecida é formada no sub-bosque, que estará apta para usar o espaço de maneira eficiente com a colheita das árvores do dossel. Outro benefício desse sistema é a redução dos riscos vinculados ao mercado, através da diversificação de produtos e obtenção de rendimentos periódicos em diferentes rotações. Assim, a quantificação dos produtos de um plantio sob cobertura é fundamental para subsidiar sua avaliação econômica e, assim, validar o seu potencial de retorno econômico. Dessa forma, os objetivos desse capítulo foram (i) ajustar modelos de afilamento para *P. taeda* aos 23 e 36 anos e para *C. lusitanica* aos 13 anos com o intuito de quantificar os sortimentos das espécies; e (ii) avaliar economicamente o plantio de *C. lusitanica* sob cobertura de *P. taeda*. Com os dados da cubagem, foram ajustados 6 modelos de afilamento para descrever o perfil do tronco de *P. taeda* aos 36 anos e *C. lusitanica*. Já os dados da análise de tronco foram utilizados para ajustar os modelos de afilamento para *P. taeda* aos 23 anos. As equações de afilamento de *P. taeda* aos 36 anos e *C. lusitanica* foram utilizadas para quantificar os sortimentos usando o software FlorExcel® e a produção de *P. taeda* aos 23 anos foi estimada usando o software SisPinus. Estas informações foram utilizadas para subsidiar a avaliação econômica do plantio de *C. lusitanica*, comparando três cenários por meio do Valor Presente Líquido ao infinito sob uma taxa de juros real de 3% a.a. As equações mostraram um ótimo ajuste aos dados, com valores de coeficiente de determinação maiores que 0,8 em todos os conjuntos de dados, e desempenho satisfatório nos demais critérios estatísticos avaliados e na distribuição de resíduos. O polinômio de 5º grau foi adotado para descrever o afilamento de *P. taeda* aos 36 anos e de *C. lusitanica*, e o modelo de Kozak 1988 foi adotado para *P. taeda* aos 23 anos. As espécies utilizadas no plantio sob cobertura tiveram desempenhos econômicos diferentes, onde a manutenção das árvores de *P. taeda* por mais 13 anos resultou em toras de maior diâmetro e mais valiosas. Os incrementos médios em diâmetro, altura e volume de *C. lusitanica* indicam que é pouco provável que esse componente produza madeira suficiente para ser equiparada ao retorno financeiro do corte raso de *P. taeda* aos 23 anos. Todavia, haja vista os ótimos resultados obtidos no estrato superior, é possível afirmar que há potencial econômico no sistema sob cobertura, já que permitiu obter uma floresta no estrato inferior enquanto as árvores do estrato superior valorizaram conforme apresentado.

**Palavras-chave:** manejo florestal; economia florestal; planejamento florestal.

### ABSTRACT

An underplanting is defined as a planting of a young forest under the cover of a pre-existing tree layer. One of this system's advantages refers to the better use of the productive space, where the cover trees gain in increment and produce larger and high-quality logs. At the same time, a well-established forest is formed on the understory, which will be able to efficiently use the space when the cover trees are harvested. Another benefit of this system is the reduction of market risks due to product diversification and gain of periodic incomes in different rotations.

Thus, the products' quantification of an underplanting is crucial to subsidize its economic valuation and, consequently, validate its economic return potential. The objectives of this chapter were (i) to adjust tapering models for *P. taeda* at 23 and 36 years old and for *C. lusitanica* at 13 years old in order to quantify their assortments and (ii) to economically evaluate the underplanting system of *C. lusitanica* and *P. taeda*. Based on the scaling data, 6 taper models were adjusted to describe the trunk profile of *P. taeda* at 36 years old and *C. lusitanica*. The stem analysis data were used to adjust the tapering models for *P. taeda* at 23 years old. The tapering equations of *P. taeda* at 36 years old and *C. lusitanica* were used to quantify the assortments using the FlorExcel® software and the production of *P. taeda* at 23 years old was estimated using the SisPinus software. Such information was used to support the economic evaluation of the underplanting system, comparing three scenarios with the aid of the economic criterion Net Present Value to perpetuity under a real interest rate of 3% a.a. The equations showed an excellent fit performance, with values of determination coefficient greater than 0.8 in all data sets, and satisfactory performance in the other evaluated statistical criteria and residuals distribution. The 5th degree polynomial was adopted to describe the tapering of 36-y *P. taeda* and 13-y *C. lusitanica*, and the Kozak 1988 model was adopted for 23-y *P. taeda*. The species on the underplanting system showed different economic performance, where the maintenance of *P. taeda* trees in the stand resulted in larger and more valuable logs. The mean annual increments in diameter, height and volume of *C. lusitanica* indicate that it is unlikely that this component will produce enough wood to be equated with the financial return of the clear cut of *P. taeda* at age 23. However, in view of the excellent results obtained in the upper stratum, it is possible to affirm that there is economic potential in the underplanting system since it allowed obtaining a forest in the lower stratum while the trees of the upper stratum increased as presented.

**Keywords:** forest management; forest economy; forest planning.

## INTRODUÇÃO

Um plantio sob cobertura, ou “*underplanting*”, se refere ao plantio de uma floresta jovem sob um estrato já estabelecido. Nesse caso, existem, pelo menos, dois estratos no sistema, e na maioria das vezes, mais de uma espécie. Esse sistema tem sido implantado em diversos países da Europa, América do Norte e Oceania, com o intuito de promover a regeneração natural, através do plantio de espécies, aumentar a proporção de uma determinada espécie e/ou enriquecer ou diversificar a estrutura da floresta (SCOLFORO, 1998; KERR; HAUFÉ, 2016).

No Brasil, vários trabalhos já abordaram plantios de enriquecimento com objetivo de aumentar a diversidade no sub-bosque de florestas nativas através do plantio de espécies de interesse (SCHULZE, 2008; KEEFE et al., 2009; VENTUROLI et al., 2011). Foi encontrado um trabalho com plantio de uma espécie exótica, *Eucalyptus dunnii*, sob a cobertura de outra espécie também exótica, *Pinus taeda*, ambas destinadas à produção madeireira, onde a cobertura de *P. taeda* se mostrou eficiente na proteção de eucalipto contra geadas (DOBNER Jr. et al., 2009).

Uma das vantagens desse sistema se refere ao melhor aproveitamento do espaço produtivo, com ganho de incremento das árvores da cobertura com consequente produção de toras de maior diâmetro e com alta qualidade. Esse processo é concomitante à formação de uma floresta bem estabelecida no sub-bosque, que estará apta para usar o espaço de maneira eficiente quando as árvores que ocupam o dossel forem colhidas (MASON et al., 1999; HANELL et al., 2000; DOBNER Jr. et al., 2009).

Outro ponto positivo do plantio sob cobertura é a redução dos riscos vinculados ao mercado, através da diversificação de produtos. Isso envolve a opção de direcionar todos os recursos para um único produto que tenha o maior valor no presente ou diversificar a produção. Geralmente, o maior problema relacionado a plantios florestais para os produtores é o período de tempo entre o investimento inicial relacionado ao preparo do solo, plantio e controle de mato competição e o retorno econômico proveniente dos produtos florestais no final da rotação. Além disso, o manejo de monoculturas inclui desbastes precoces assim que um produto útil possa ser colhido, mas grande parte das espécies que são valorizadas como madeira sólida em grandes diâmetros não apresenta valor em pequenos diâmetros. O cultivo de múltiplas espécies em um plantio pode fornecer mais opções de rendimentos periódicos em diferentes rotações (KELTY, 2006).

Assim, as formas e ferramentas utilizadas para quantificar e qualificar os produtos provenientes de um sistema sob cobertura são imprescindíveis para o planejamento da atividade florestal desse sistema e, consequentemente, validar o potencial econômico deste. Uma dessas formas de quantificação é através dos modelos de afilamento, que permitem conhecer o volume e diâmetro em diferentes partes do tronco de uma árvore e representar a forma do tronco das árvores, que é uma variável imprescindível para a determinação da quantidade e qualidade dos multiprodutos florestais (YOSHITANI Jr et al., 2012; KOHLER, 2013; NICOLETTI, 2017).

É com base nos resultados obtidos com os modelos de afilamento que é possível quantificar o número de toras para um determinado diâmetro e comprimento pré-definido, o que pode ser entendido como sortimento florestal. Assim, sortimento pode ser descrito como a divisão da árvore em seções pelo diâmetro e comprimento das toras, possibilitando quantificar os multiprodutos e, consequentemente, melhorar o planejamento para buscar maior retorno financeiro. Quanto maior o diâmetro e comprimentos, maiores as peças resultantes e maior preço de mercado (FIGUEIREDO FILHO, 1991; KOHLER, 2013; FIGUEIREDO FILHO et al., 2014).

Os sortimentos são, então, definidos pelo diâmetro mínimo de uso (diâmetro de topo) e do comprimento das toras, as quais são estabelecidas pelas indústrias madeireiras em função de

suas máquinas de processamento da madeira e do rendimento obtido com a industrialização. É a destinação final dos produtos para os diversos sortimentos que definirá a receita a ser adquirida com a colocação no produto no mercado, cujos valores são fundamentais para realizar uma avaliação econômica de um projeto florestal (FIGUEIREDO FILHO, 1991).

Na avaliação econômica de um projeto florestal, é importante considerar todos os custos de implantação e manutenção da floresta e o regime de manejo adotado (densidade inicial, desbastes, podas, etc) submetidos a uma taxa de juros. Além disso, o projeto florestal é avaliado por alguns critérios de avaliação econômica, sendo que os principais são o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Relação Benefício/Custo (B/C) (REZENDE; OLIVEIRA, 2001; SILVA et al., 2005; SILVA; RIBEIRO, 2006; VITALE; MIRANDA, 2010).

Assim, os objetivos desse capítulo são: (i) ajustar modelos de afilamento para *P. taeda* aos 23 e 36 anos e para *C. lusitanica* aos 13 anos com o intuito de quantificar os sortimentos destes; (ii) avaliar economicamente o plantio de *C. lusitanica* sob cobertura de *P. taeda*.

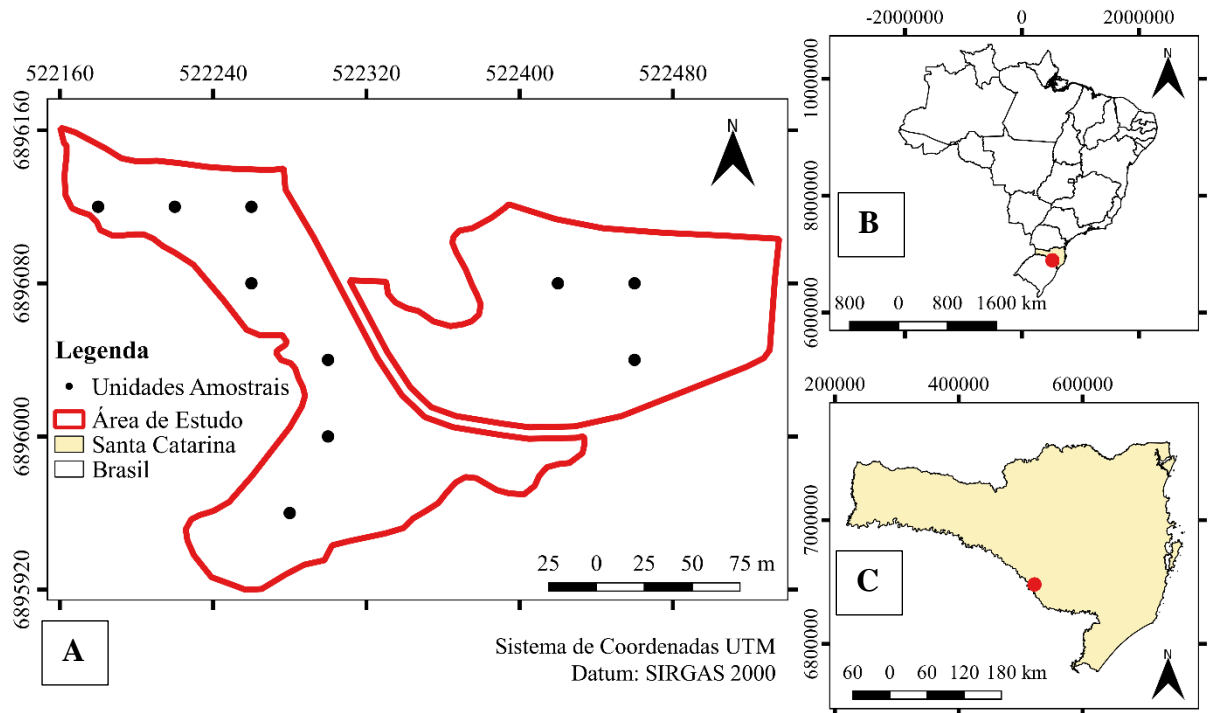
## MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição da área

O estudo foi conduzido em uma área experimental implantada no município de Capão Alto, Sul do Estado de Santa Catarina, Brasil (28° 03' 35'' S e 50° 46' 22'' O), em um talhão de aproximadamente 2 ha (Figura 25). O clima é classificado como subtropical úmido com verão temperado, com temperatura média anual de 13°C, uma altitude em torno de 1.000 m e precipitação bem distribuída durante o ano, com média de 1.750 mm (ALVARES et al., 2013).



Figura 25 – Localização da área de estudo e das unidades amostrais instaladas. A) Área de estudo e unidades amostrais; B) Brasil; C) Santa Catarina.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

O componente do sistema *P. taeda* foi plantado em 1982 e desbastado como plantio comercial até 2005, ou seja, primeiro desbaste, sistemático e seletivo, aos 10 anos e segundo desbaste, sistemático e seletivo, aos 17 anos e colheita parcial aos 23 anos, quando os povoamentos das proximidades foram colhidos. Um dos povoamentos foi selecionado para esse experimento, submetido a colheita parcial com densidade remanescente de 60 árvores ha<sup>-1</sup>. O segundo componente, *C. lusitanica*, foi plantado nesse mesmo ano sob as árvores de *Pinus*, usando um espaçamento de 2,5 x 2,5 m (1.600 árv ha<sup>-1</sup>). A Figura 26 ilustra a atual situação do povoamento, com a formação dos dois estratos pelas espécies.

Figura 26 – Ilustração dos dois estratos formados por *Cupressus lusitanica* (estrato inferior) e *Pinus taeda* (estrato superior).



Fonte: A autora, 2018.

### Coleta de dados

Foi feito inventário florestal a partir da instalação de 10 unidades amostrais circulares temporárias de 500 m<sup>2</sup> usando como processo de amostragem a amostragem sistemática e o método de área fixa (Figura 25). Foram mensuradas 722 árvores de *C. lusitanica* e 30 árvores de *P. taeda*, obtendo-se o Diâmetro à Altura do Peito (dap) de todos os indivíduos de *C. lusitanica* e *P. taeda* nas parcelas de campo. A altura total foi aferida em todas as árvores de *C. lusitanica* localizadas na linha central de cada parcela mais as cinco árvores dominantes, totalizando 132 árvores, e em todas as árvores de *P. taeda* encontradas nas parcelas. O dap e as medições de altura foram obtidos com uma fita diamétrica e com um hipsomêtro digital tipo Vertex IV®, respectivamente.

Com base na distribuição diamétrica de ambas espécies pelo critério empírico, 33 árvores de *C. lusitanica* e 16 árvores de *Pinus taeda* foram cubadas nas seguintes posições do fuste: 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m, 0,9 m, 1,3 m, 2 m e, depois disso, a cada 1 metro até o topo da árvore, usando uma suta. Esses dados foram utilizados para o ajuste dos modelos de afilamento para *P. taeda* aos 36 anos e *C. lusitanica* aos 36 e 13 anos, respectivamente.

Para ajustar equações para o afilamento de *P. taeda* aos 23 anos foram usados os dados de 10 árvores através da ANATRO completa. Foram obtidos discos transversais de árvores que estavam caídas no local, em virtude de uma tempestade que ocorreu em 2014, nas posições 0,1 m, 1,3 m, 25%, 50% e 75% da altura total. A altura exata de retirada dos discos está disposta na Tabela 23 em Apêndices.

Os diâmetros com casca ( $d_{cc}$ ) para essas alturas e para essa idade foram obtidos através do modelo de Schneider e Silva descrito por Figueiredo Filho et al. (2014). Já as alturas totais das árvores aos 23 anos foram estimadas usando a equação hipsométrica de Naslund, descrita a seguir:

$$\frac{(1,30 + d_i)}{h_i} = 0,2910 + 0,0305 * d_i + e_i$$

Onde:  $d_i$  = DAP da enésima árvore, em cm;  $h_i$  = altura total da enésima árvore, em m;  $e_i$  = erro aleatório.

### Afilamento do tronco

Foram ajustados 6 modelos de afilamento para obter as estimativas dos diâmetros ao longo do tronco das árvores de *P. taeda* aos 23 e 36 anos e para *C. lusitanica* aos 13 anos, descritos na Tabela 13.

Tabela 13 – Modelos de afilamento ajustados para estimar o diâmetro ao longo do tronco de *Pinus taeda*, com os respectivos autores.

| Modelo   | Autor                         | Tipo |
|--|-------------------------------|------|
| $\frac{d_i}{D} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{H}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{H}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{H}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{H}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{H}\right)^5 + e_i$   | Shoepfer (1966)               | NS   |
| $\frac{d_i}{D} = \sqrt{\beta_1 \left(\frac{h_i}{H} - 1\right) + \beta_2 \left[\left(\frac{h_i}{H}\right)^2 - 1\right]} + e_i$  | Kozak et al. (1969)           | NS   |
| $\frac{d_i}{D} = \left[1 - \frac{h_i}{H}\right]^{\frac{1}{\beta_2}} + e_{ij}$  | Forslund (1982)               | NS   |
| $\frac{d_i}{D} = \beta_0 (H - h_i)^{\beta_1} + e_{ij}$   | Newberry e<br>Burkhart (1986) | NS   |
| $\frac{d_i}{D} = \sqrt{\beta_1 \left(\frac{h_i}{H} - 1\right) + \beta_2 \left[\left(\frac{h_i}{H}\right)^2 - 1\right] + \beta_3 \left(a_1 - \frac{h_i}{H}\right)^2 I_i + \beta_4 \left(a_2 - \left(\frac{h_i}{H}\right)\right)^2 I_2} + e_i$   | Max e Burkhart<br>(1976)      | S    |
| $d_i = \beta_0 D^{\beta_1} \beta_2^{\beta_2} \left(\frac{1 - \sqrt{h_i/H}}{1 - \sqrt{x}}\right)^{\beta_3 \left(\frac{h_i}{H}\right)^2 + \beta_4 \ln\left(\frac{h_i}{H} + 0,001\right) + \beta_5 \sqrt{\frac{h_i}{H}} + \beta_6 e^{\left(\frac{h_i}{H}\right)} + \beta_7 \left(\frac{D}{H}\right)} + e_i$ | Kozak (1988)                  | FV   |

Onde:  $D$  = Diâmetro a Altura do Peito (DAP-cm);  $H$  = altura total da árvore (m);  $d_i$  = diâmetro medido à altura  $h_i$  do fuste;  $h_i$  = altura  $h_i$  de um referido diâmetro;  $\beta_0$  a  $\beta_4$  = coeficientes;  $e_i$  = erro da estimativa;  $p_n$  = expoentes variando entre 0,00005 e 95;  $a_1$  e  $a_2$  = pontos de junção;  $I_i = 1$ , se  $(h/H) \leq a_1$  ou  $0$  se  $(h/H) > a_1$ ;  $I = 1, 2$ ;  $J = 1$  se  $((H-h)/H) \geq a$  ou  $0$  se  $((H-h)/H) < a$ ;  $x$  = ponto de inflexão considerado em  $1,3/H$ ; NS = não segmentado; S = segmentado; FV = forma variável. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Para testar a acurácia dos modelos, foram utilizados os seguintes critérios: análise gráfica dos resíduos, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e Critério de Informação de Akaike - AIC. Foram, também, avaliados o viés (V), erro quadrático médio (MSE), viés absoluto (MD)

e desvio padrão das diferenças (DPD) do ajuste dos modelos, conforme adotado por Môra (2015) e equações descritas na Tabela 14.

Tabela 14 – Estatísticas utilizadas para avaliação do ajuste dos modelos de afilamento para *Pinus taeda* e *Cupressus lusitanica*.

| Parâmetro                          | Equação   |
|------------------------------------|---|
| Viés (V)                           | $V = \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{n}$                              |
| Erro quadrático (MSE)              | $MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}$                    |
| Viés absoluto (MD)                 | $MD = \frac{\sum_{i=1}^n  y_i - \hat{y}_i }{n}$                           |
| Desvio padrão das diferenças (DPD) | $DPD = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n d_i)^2}{n}}{n - 1}$ |

Onde:  $y_i$ ,  $\hat{y}_i$  e  $\bar{y}_i$  são os valores observados, estimados e a média dos valores das variáveis dependentes, respectivamente;  $n$  é o total de observações usados no ajuste;  $d_i$  é o diâmetro observado a uma altura  $hi$ ;  $p$  é o número de coeficientes do modelo. Fonte: Môra (2015).

Foi considerado o modelo mais acurado aquele que apresentou altos valores de  $R^2$ , os resíduos não apresentaram alto grau de tendência, e baixos valores de AIC, V, MSE, MD e DPD (MÔRA, 2015).

### Análise econômica

A avaliação econômica foi realizada para os plantios sob cobertura. Para construir os cenários econômicos do presente estudo, foram avaliados os sortimentos produzidos por *P. taeda* aos 23 anos e aos 36 anos, adotando as classes praticadas pela empresa e detalhados na Tabela 15.

Tabela 15 – Sortimentos adotados pela empresa e suas respectivas medidas e destinação (Continua).

| Destinação | Sortimento | Min DPF | MaxDPG | MinComp | MaxComp |
|------------|------------|---------|--------|---------|---------|
| Laminação  | L>52       | 52      | 99     | 2,15    | 2,15    |
| Laminação  | L42-52     | 42      | 99     | 2,60    | 2,60    |
| Laminação  | L35-42     | 35      | 99     | 2,60    | 2,60    |
| Laminação  | L25-35     | 25      | 99     | 2,60    | 2,60    |
| Laminação  | L18-25     | 18      | 99     | 2,60    | 2,60    |
| Serraria   | >45        | 45      | 99     | 2,60    | 2,60    |
| Serraria   | 35-45      | 35      | 99     | 3,06    | 3,06    |
| Serraria   | 25-35      | 25      | 99     | 3,06    | 3,06    |
| Serraria   | 20-25      | 20      | 99     | 1,90    | 1,90    |
| Serraria   | 15-20      | 15      | 99     | 2,50    | 2,50    |

Tabela 15 – Sortimentos adotados pela empresa e suas respectivas medidas e destinação (Conclusão).

| Madeira para Processo | MPP | 8 | 99 | 2,40 | 2,40 |
|-----------------------|-----|---|----|------|------|
|-----------------------|-----|---|----|------|------|

Onde: L = laminação; Min = valor mínimo; Max = valor máximo; DPF = diâmetro da ponta fina (cm); DPG = diâmetro da ponta grossa (cm); Comp = comprimento (m). Fonte: Florestal Gateados, 2019.

Foi utilizado o módulo de inventário florestal do programa FlorExel®, como adotado por Kohler (2013) para a quantificação dos sortimentos aos 36 anos de *P. taeda* e aos 13 anos para *C. lusitanica*. O software forneceu os volumes totais e por sortimento, para o número total de árvores, e as estimativas por hectare. Para isso, foram fornecidos ao sistema dados de dap e altura total das árvores, e as dimensões dos sortimentos desejados, sendo que as estimativas de volume foram feitas com base na equação de afilamento previamente ajustada aos dados (KOHLER, 2013).

Para a estimativa dos sortimentos na idade de 23 anos, ano onde ocorreu a colheita parcial de *P. taeda* para plantio de *C. lusitanica*, foi realizada por meio do software SIS Pinus, da Embrapa, modalidade *P. taeda*, visto que não foi possível obter os volumes por sortimento para essa idade no FlorExcel®. Para isso, foram utilizadas as seguintes informações:

- Densidade inicial de 1.600 árv ha<sup>-1</sup>, sobrevivência 95%;
- Índice de sítio de 25 m para todos os cenários;
- Desbastes:
  - 7 anos, sistemático seguido de seletivo, 5ª linha a ser desbastada, 1.200 árvores remanescentes;
  - 12 anos, sistemático seguido de seletivo, 8ª linha a ser desbastada, 800 árvores remanescentes;
  - 16 anos, seletivo, 400 árvores remanescentes;
  - 23 anos, corte raso (cenário 1) e colheita parcial com 80 árv ha<sup>-1</sup> (cenários 2 e 3).
- Diâmetros de toras e sortimentos conforme Tabela 15 (exceto os sortimentos Laminação>25 e Laminação>35, os quais não foram utilizados, pois se sobrepuaram aos sortimentos Serraria>25 e Serraria>35 durante a execução do programa, que não permite distinguir entre toras da mesma bitola podadas (laminação) e toras não podadas (serraria)).

Vale ressaltar que foi adotada uma densidade de 80 árv ha<sup>-1</sup> para construção dos cenários com colheita parcial, pois o software não permitiu a obtenção de resultados adotando uma densidade de 60 árv ha<sup>-1</sup>.

Os cenários considerados para a avaliação econômica do plantio sob cobertura foram os seguintes:

- Cenário 1 (*Pinus*23): plantio puro de *P. taeda*, com poda dos 3 aos 6 anos de idade até 6,0 m de altura, desbaste aos 7, 12 e 16 anos e corte raso aos 23 anos;
- Cenário 2 (*Pinus* + *Cupressus*25): plantio puro de *P. taeda*, com poda dos 3 aos 6 anos de idade até 6,0 m de altura, desbaste aos 7, 12 e 16 anos e colheita parcial aos 23 anos, mantendo uma densidade remanescente de 80 árv ha<sup>-1</sup>; plantio de *C. lusitanica*, com poda dos 3 aos 6 anos de idade até 6,0 m de altura, desbaste aos 14 anos, corte raso de *P. taeda* aos 37 anos de idade e corte raso de *C. lusitanica* aos 25 anos de idade;
- Cenário 3 (*Pinus* + *Cupressus*30): plantio puro de *P. taeda*, com poda dos 3 aos 6 anos de idade até 6,0 m de altura, desbaste aos 7, 12 e 16 anos e colheita parcial aos 23 anos, mantendo uma densidade remanescente de 80 árv ha<sup>-1</sup>; plantio de *C. lusitanica*, com poda dos 3 aos 6 anos de idade até 6,0 m de altura, desbaste aos 14 anos, corte raso de *P. taeda* aos 37 anos de idade e corte raso de *C. lusitanica* aos 30 anos de idade.

Em relação ao custo da terra, foi considerada a aquisição da terra no ano zero, pelo valor de aproximadamente R\$ 22.400,00/ha, conforme Dobner Jr. e Quadros (2019), e vendida no ano de corte raso das espécies. Para construção dos cenários, serão também considerados os custos de implantação e condução do experimento, segundo valores adotados por Dobner Jr. e Quadros (2019), descritos na Tabela 16. Não foram considerados os custos de colheita uma vez que os preços dos sortimentos estão descontados os custos de colheita, estrada e transporte.

Tabela 16 – Custos e ano de ocorrência para o estabelecimento e condução de povoamentos de *Pinus taeda* e *Cupressus lusitanica* para os diferentes regimes de manejo (Continua).

| Cenário 1                  |     |           |                      |
|----------------------------|-----|-----------|----------------------|
| Descrição                  | Ano | Valor     | Unidade              |
| Terra                      | 0   | 22.400,00 | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Estabelecimento            | 1   | 3.744,00  | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais           | 2   | 704,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais + 1ª poda | 3   | 864,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 2ª Poda                    | 4   | 320,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 3ª Poda                    | 5   | 480,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 4ª poda                    | 6   | 640,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |

Tabela 16 – Custos e ano de ocorrência para o estabelecimento e condução de povoamentos de *Pinus taeda* e *Cupressus lusitanica* para os diferentes regimes de manejo (Continuação).

|                            |       |        |                      |
|----------------------------|-------|--------|----------------------|
| Desbaste <i>P. taeda</i>   | 7     | -----  | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Desbaste <i>P. taeda</i>   | 12    | -----  | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Desbaste <i>P. taeda</i>   | 16    | -----  | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Corte Raso <i>P. taeda</i> | 23    | -----  | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Administração              | Todos | 400,00 | R\$ ha <sup>-1</sup> |

| Cenário 2  |       |           |                      |
|--|-------|-----------|----------------------|
| Descrição  | Ano   | Valor     | Unidade              |
| Terra  | 0     | 22.400,00 | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Estabelecimento <i>Pinus</i>                               | 1     | 3.744,00  | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais   | 2     | 704,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais + 1ª poda                                 | 3     | 864,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 2ª Poda  | 4     | 320,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 3ª Poda  | 5     | 480,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 4ª poda  | 6     | 640,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Desbaste <i>P. taeda</i>                                   | 7     | -----     | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Desbaste <i>P. taeda</i>                                   | 12    | -----     | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Desbaste <i>P. taeda</i>                                   | 16    | -----     | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Colheita parcial <i>P. taeda</i>                           | 23    | -----     | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Estabelecimento <i>C. lusitanica</i>                       | 1     | 3.744,00  | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais   | 2     | 704,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais + 1ª poda                                 | 3     | 864,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 2ª Poda  | 4     | 320,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 3ª Poda  | 5     | 480,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 4ª poda  | 6     | 640,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Corte raso <i>P. taeda</i> + Desbaste <i>C. lusitanica</i> | 14    | -----     | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Corte raso <i>C. lusitanica</i>                            | 25    | -----     | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Administração  | Todos | 400,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |

| Cenário 3                    |     |           |                      |
|------------------------------|-----|-----------|----------------------|
| Descrição                    | Ano | Valor     | Unidade              |
| Terra                        | 0   | 22.400,00 | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Estabelecimento <i>Pinus</i> | 1   | 3.744,00  | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais             | 2   | 704,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais + 1ª poda   | 3   | 864,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 2ª Poda                      | 4   | 320,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 3ª Poda                      | 5   | 480,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 4ª poda                      | 6   | 640,00    | R\$ ha <sup>-1</sup> |

Tabela 16 – Custos e ano de ocorrência para o estabelecimento e condução de povoamentos de *Pinus taeda* e *Cupressus lusitanica* para os diferentes regimes de manejo (Conclusão).

|  |       |          |                      |
|--|-------|----------|----------------------|
| Desbaste <i>P. taeda</i>                                   | 7     | -----    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Desbaste <i>P. taeda</i>                                   | 12    | -----    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Desbaste <i>P. taeda</i>                                   | 16    | -----    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Colheita parcial <i>P. taeda</i>                           | 23    | -----    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Estabelecimento <i>C. lusitanica</i>                       | 1     | 3.744,00 | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais   | 2     | 704,00   | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Tratos culturais + 1ª poda                                 | 3     | 864,00   | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 2ª Poda  | 4     | 320,00   | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 3ª Poda  | 5     | 480,00   | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| 4ª poda  | 6     | 640,00   | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Corte raso <i>P. taeda</i> + Desbaste <i>C. lusitanica</i> | 14    | -----    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Corte raso <i>C. lusitanica</i>                            | 30    | -----    | R\$ ha <sup>-1</sup> |
| Administração  | Todos | 400,00   | R\$ ha <sup>-1</sup> |

Fonte: Dobner Jr; Quadros, 2019.

As receitas foram obtidas por meio da comercialização dos sortimentos obtidos pela floresta e de seus respectivos preços pagos por cada produto, conforme Tabela 15. Como ainda não há um mercado consolidado para as toras de *C. lusitanica*, foram adotados os mesmos preços pagos pelas toras de *P. taeda*. Nos cenários 2 e 3, a receita obtida do corte raso de *P. taeda* se referiu a uma densidade de 80 árv ha<sup>-1</sup>, cujos dados foram provenientes do Florexcel®.

Por se tratar de cenários com horizontes diferentes, foi utilizado o VPL infinito ( $VPL_{\infty}$ ) como critério econômico, assim como sugere Silva e Fontes (2005). O  $VPL_{\infty}$  é definido pela seguinte equação:

$$VPL_{\infty} = \frac{VPL(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:  $VPL_{\infty}$  = Valor Presente Líquido infinito;  $VPL$  = Valor Presente Líquido (R\$):  $\sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+i)^{-j}$ ;  $i$  = taxa de juros (%);  $t$  = número de períodos de capitalização.

Foi adotada uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 3,0% a.a., real, sem inflação, para construção dos cenários, assim como adotado por Dobner Jr. e Quadros (2019) para pequenos e médios produtores de madeira. Para fins de comparação, foi estimada a produção, em reais ha<sup>-1</sup>, aos 25 e 30 anos de *C. lusitanica* para que o VPL infinito dos cenários 2 e 3 fosse, pelo menos, igual ao do cenário 1. Os fluxos de caixa e cálculos de VPL infinito foram feitos em planilha do Microsoft Office Excel®.



## RESULTADOS

### Afilamento do tronco de *P. taeda* e *C. lusitanica*

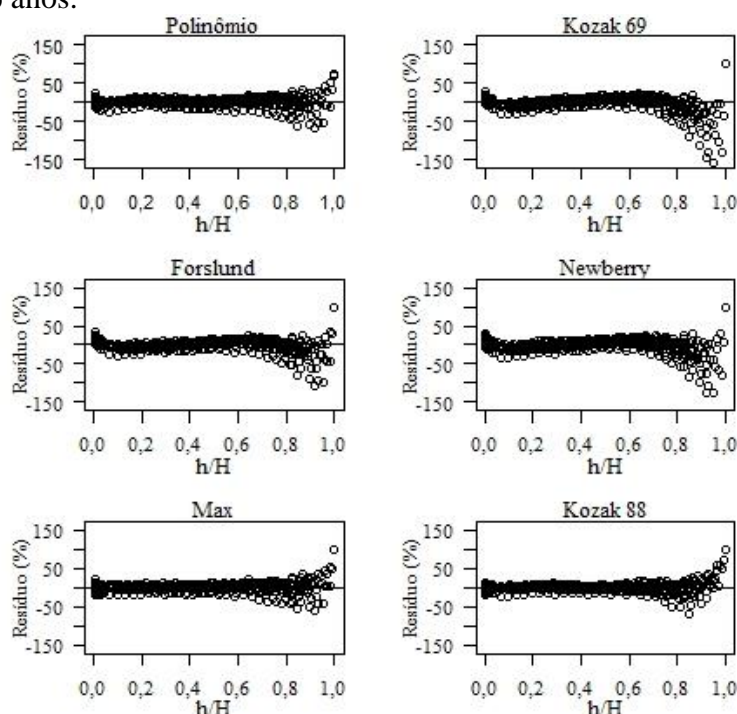
De maneira geral, todos os modelos ajustados para o afilamento tanto de *P. taeda* quanto de *C. lusitanica* geraram ótimas estatísticas (Tabela 17). Aos 36 anos, todos os modelos geraram valores de coeficiente de determinação maiores que 0,91, baixos valores de viés, viés absoluto e erro quadrático. A distribuição dos resíduos do ajuste dos modelos pode ser observada na Figura 27.

Tabela 17 – Valores obtidos nos parâmetros de qualidade pelos modelos ajustados para os dados de 36 anos de *P. taeda*.

| Modelos           | R <sup>2</sup> | v    | MSE   | MD   | DPD   | AIC      |
|-------------------|----------------|------|-------|------|-------|----------|
| Polinômio 5º grau | 0,95           | 0,23 | 14,67 | 2,79 | 14,65 | 2.820,20 |
| Kozak.69          | 0,91           | 0,08 | 25,55 | 3,86 | 25,59 | 3.093,94 |
| Forslund          | 0,91           | 0,80 | 27,16 | 3,73 | 26,57 | 3.124,94 |
| Newberry 86       | 0,91           | 0,21 | 27,34 | 3,98 | 27,35 | 3.128,38 |
| Max               | 0,95           | 0,25 | 13,77 | 2,74 | 13,74 | 2.788,05 |
| Kozak 88          | 0,96           | 0,06 | 9,78  | 2,25 | 9,79  | 2.617,93 |

Onde: R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; v = viés; MSE = erro quadrático; MD = viés absoluto; DPD = desvio padrão das diferenças; AIC = critério de informação Akaike. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 27 – Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para o afilamento de *Pinus taeda* aos 36 anos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Considerando o desempenho nos critérios de qualidade adotados e a distribuição dos resíduos, os modelos de Kozak (1988), Polinômio de 5° grau e Max e Burkhart (1976) podem ser utilizados para descrever o afilamento de *P. taeda* aos 36 anos, e foi escolhido o polinômio de 5° grau para quantificar os sortimentos de *P. taeda* nessa idade.

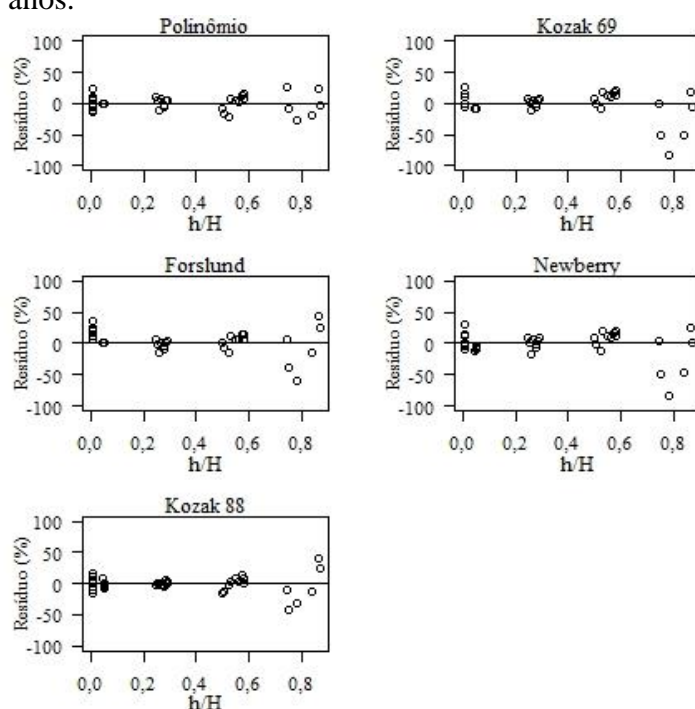
Após a estimativa do diâmetro com casca para as diferentes posições ao longo do fuste de *P. taeda* aos 23 anos, foram ajustados os modelos citados para essa idade, exceto o modelo de Max e Burkhart (1976), que não se ajustou aos dados. O desempenho destes nos parâmetros de qualidade pode ser observado na Tabela 18 e a distribuição dos resíduos pode ser visualizada na Figura 28.

Tabela 18 – Desempenho nos critérios de qualidade dos modelos ajustados para o afilamento de *Pinus taeda* aos 23 anos.

| Modelos              | R <sup>2</sup> | v    | MSE   | MD   | DPD   | AIC    |
|----------------------|----------------|------|-------|------|-------|--------|
| Polinômio de 5° grau | 0,91           | 0,29 | 12,08 | 2,62 | 12,29 | 237,86 |
| Kozak.69             | 0,85           | 0,21 | 20,78 | 3,76 | 21,24 | 252,63 |
| Forslund             | 0,83           | 1,91 | 27,24 | 3,46 | 24,14 | 263,98 |
| Newberry 86          | 0,84           | 0,32 | 22,83 | 3,87 | 23,27 | 256,57 |
| Kozak 88             | 0,93           | 0,02 | 8,82  | 2,25 | 9,03  | 228,63 |

Onde: R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; v = viés; MSE = erro quadrático; MD = viés absoluto; DPD = desvio padrão das diferenças; AIC = critério de informação Akaike. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 28 – Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para o afilamento de *Pinus taeda* aos 23 anos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Percebe-se que, de maneira geral, o ajuste das equações de afilamento foi parecido para as duas idades avaliadas, com boas estatísticas em quase todos os parâmetros. Os modelos Polinômio de 5º grau e Kozak 88 poderiam ser utilizados para descrever o afilamento do fuste de *P. taeda* aos 23 anos, sendo o modelo de Kozak 88 escolhido para representar o afilamento de *P. taeda* aos 23 anos. Os coeficientes dos modelos ajustados para *P. taeda* com 36 e 23 anos estão descritos na Tabela 19.

Tabela 19 – Coeficientes dos modelos ajustados para descrever o afilamento de *Pinus taeda* aos 23 e 36 anos.

| 23 anos      |            |            |           |             |            |            |
|--------------|------------|------------|-----------|-------------|------------|------------|
| Coeficientes | Polinômio  | Kozak 69   | Forslund  | Newberry 86 | Max        | Kozak 88*  |
| $\beta_0$    | 1,210867   | -1,7825996 | 2,2723209 | 0,1411928   |            | 0,8350483  |
| $\beta_1$    | -5,426394  | 0,5019257  | 0,8850525 | 0,6296785   |            | 1,1936453  |
| $\beta_2$    | 28,488486  |            |           |             |            | 0,9863033  |
| $\beta_3$    | -57,004187 |            |           |             |            | 1,8356561  |
| $\beta_4$    | 41,147465  |            |           |             |            | -0,2580334 |
| $\beta_5$    | -7,565469  |            |           |             |            | 1,5279646  |
| $\beta_6$    |            |            |           |             |            | -1,0125342 |
| $\beta_7$    |            |            |           |             |            | 0,1290346  |
| 36 anos      |            |            |           |             |            |            |
| Coeficientes | Polinômio* | Kozak 69   | Forslund  | Newberry 86 | Max        | Kozak 88   |
| $\beta_0$    | 1,168451   | -1,5527146 | 1,294715  | 0,1315635   |            | 2,1285969  |
| $\beta_1$    | -4,000097  | 0,4186377  | 1,447838  | 0,6148363   | -5,8507449 | 0,7419186  |
| $\beta_2$    | 17,50518   |            |           |             | 2,8833646  | 1,0035999  |
| $\beta_3$    | -34,818627 |            |           |             | 77,663432  | 0,8713917  |
| $\beta_4$    | 29,419745  |            |           |             | -3,8974987 | -0,0851519 |
| $\beta_5$    | -9,253554  |            |           |             |            | -0,9053629 |
| $\beta_6$    |            |            |           |             |            | 0,1666245  |
| $\beta_7$    |            |            |           |             |            | 0,1687044  |
| a1           |            |            |           |             | 0,0927681  |            |
| a2           |            |            |           |             | 0,7465994  |            |

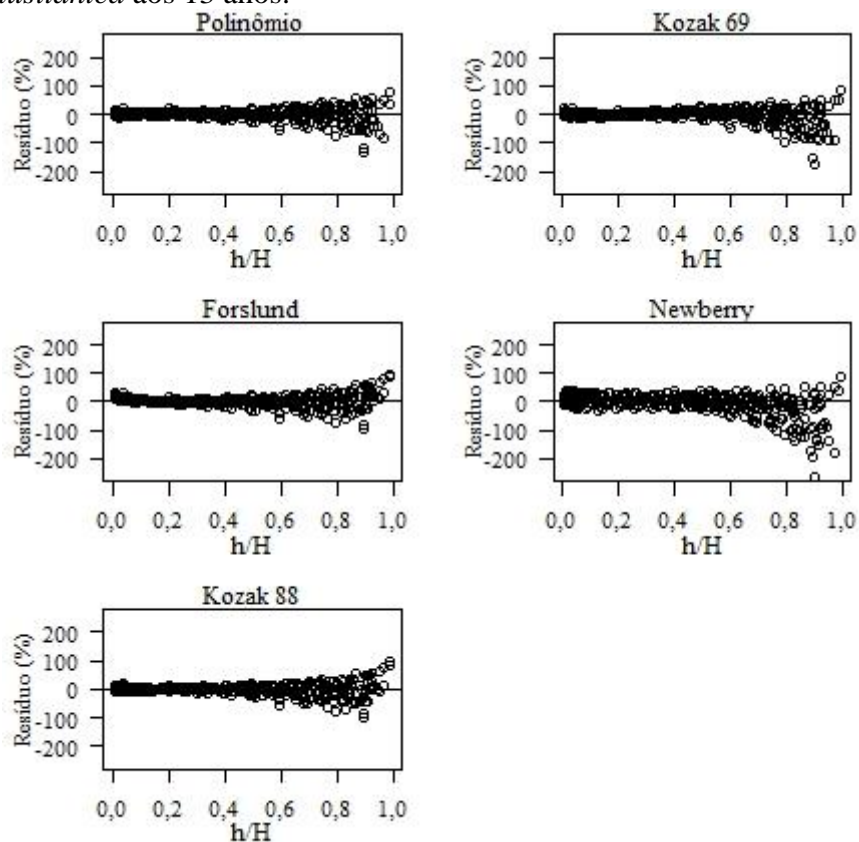
Onde:  $\beta_i$  são os coeficientes das equações;  $a_i$  são os pontos de junção das equações segmentadas. \*Modelos de afilamento escolhidos para os dois conjuntos de dados em questão. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Com relação ao ajuste das equações de afilamento para *C. lusitanica*, os modelos ajustados mostraram um desempenho ainda melhor que o ajuste dos modelos para *P. taeda* (Tabela 20). Em conjunto com a distribuição dos resíduos (Figura 29), os modelos que apresentaram os melhores ajustes foram o de Kozak 88, Polinômio de 5º grau e Kozak 69, e o modelo escolhido para quantificação dos sortimentos foi o Polinômio de 5º grau.

Tabela 20 – Parâmetros de qualidade do ajuste dos modelos de afilamento para *Cupressus lusitanica*.

|                | Polinômio* | Kozak.69  | Forslund  | Newberry 86 | Kozak 88    |
|----------------|------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| R <sup>2</sup> | 0,97       | 0,97      | 0,96      | 0,89        | 0,98        |
| v              | 0,10       | 0,08      | 0,61      | 0,33        | 0,02        |
| MSE            | 0,84       | 1,06      | 2,02      | 4,28        | 0,72        |
| MD             | 0,70       | 0,81      | 1,04      | 1,72        | 0,64        |
| DPD            | 0,83       | 1,06      | 1,65      | 4,18        | 0,72        |
| AIC            | 1.324,44   | 1.431,08  | 1.745,08  | 2.113,83    | 1.254,00    |
| $\beta_0$      | 1,212498   | -2,523244 | 1,7625833 | 0,1781304   | 1,34652050  |
| $\beta_1$      | -3,075708  | 1,197889  | 0,7936512 | 0,7265341   | 0,87667605  |
| $\beta_2$      | 11,910943  |           |           |             | 1,00290066  |
| $\beta_3$      | -25,725049 |           |           |             | 0,70478822  |
| $\beta_4$      | 23,023608  |           |           |             | -0,14716670 |
| $\beta_5$      | -7,301529  |           |           |             | 0,70314251  |
| $\beta_6$      |            |           |           |             | -0,21500966 |
| $\beta_7$      |            |           |           |             | 0,07839994  |

Onde: R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; v = viés; MSE = erro quadrático; MD = viés absoluto; DPD = desvio padrão das diferenças; AIC = critério de informação Akaike;  $\beta_i$  são os coeficientes das equações;  $a_i$  são os pontos de junção das equações segmentadas. \*Modelo de afilamento escolhido. Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 29 – Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para o afilamento de *Cupressus lusitanica* aos 13 anos.

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Nos gráficos de distribuição dos resíduos, todos os modelos testados tenderam a apresentar maior porcentagem de resíduo no topo das árvores para todos os conjuntos de dados testados.

Vale ressaltar que tanto o modelo de Kozak 1988 quanto o polinômio de 5° grau apresentaram desempenho satisfatório e superior aos demais na representação do afilamento do tronco de *P. taeda* aos 36 anos e *C. lusitanica* aos 13 anos. Entretanto, ao aplicar o modelo de Kozak 1988 no software FlorExcel®, foi observado que houve erro na estimativa da produção de sortimentos e que o polinômio de 5° grau apresentou valores de produção por sortimento mais condizentes com a realidade.

A produção obtida por sortimento para ambas as espécies pode ser visualizada na Tabela 21. Nota-se, aos 36 anos, a produção de sortimentos de maiores dimensões, como os de laminação acima de 42 e 52 cm e serraria acima de 45 cm, que são mais valorados economicamente.

Tabela 21 – Quantificação dos sortimentos produzidos por *Pinus taeda* nos desbastes, aos 23 e 36 anos e *Cupressus lusitanica* aos 13 anos.

| C 36 anos e <i>Cupressus lusitana</i> aos 15 anos. |              |                    |                           |                           |                           |                           |
|--|--------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|  |              | Cl 13 anos<br>(CR) | C 1, 2 e 3                | C 1                       | C 2 e 3                   |                           |
|  |              |                    | Desbastes<br><i>Pinus</i> | <i>Pt</i> 23 anos<br>(CR) | <i>Pt</i> 23 anos<br>(CP) | <i>Pt</i> 36 anos<br>(CR) |
| Sortimento (m³ ha⁻¹)                               | L_52         | 0,0                | 0,0                       | 0,0                       | 0,0                       | 36,5                      |
|  | L_42         | 0,0                | 0,0                       | 0,0                       | 0,3                       | 33,6                      |
|  | L_35         | 0,0                | 0,0                       | 0,0                       | 0,0                       | 0,8                       |
|  | L_25         | 0,0                | 0,0                       | 0,0                       | 0,0                       | 0,0                       |
|  | L_18         | 10,4               | 50,8                      | 4,5                       | 0,5                       | 0,0                       |
|  | S_45         | 0,0                | 0,0                       | 0,7                       | 0,0                       | 71,0                      |
|  | S_35         | 0,0                | 0,0                       | 79,8                      | 37,2                      | 55,6                      |
|  | S_25         | 0,8                | 64,6                      | 345,4                     | 271,9                     | 22,0                      |
|  | S_20         | 0,0                | 137,2                     | 95,6                      | 78,8                      | 7,0                       |
|  | S_15         | 17,9               | 63,6                      | 24,0                      | 21,7                      | 2,6                       |
|  | MPP          | 63,0               | 69,9                      | 27,4                      | 22,2                      | 2,3                       |
|  | <b>Total</b> | <b>91,9</b>        | <b>386,1</b>              | <b>577,4</b>              | <b>432,6</b>              | <b>231,4</b>              |

Nota: C1, C2 e C3 = Cenários 1, 2 e 3, respectivamente; Cl = *Cupressus lusitanica*; Pt = *Pinus taeda*; CR = corte raso; CP = colheita parcial; L = laminação; S = serraria; MPP = madeira para processo. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

### Avaliação econômica do plantio sob cobertura

Os cenários considerados nesse estudo demonstram o potencial de ganho financeiro com a produção de madeira livre de nós (*clearwood*) de *P. taeda* de grandes dimensões. Aos 36 anos com 60 ár v ha<sup>-1</sup>, conforme dados do afilamento, a maior parte da receita foi proveniente do

sortimento serraria > 45 cm (29,3%) e laminação > 52 cm (26,7%). Além disso, os sortimentos de laminação, provenientes de toras podadas até 6,0 m de altura (20% da altura total média das árvores nessa idade), somaram em torno de 50% da receita obtida nessa idade.

Na comparação entre cenários utilizando o VPL infinito, o cenário 1, *Pinus23*, obteve um VPL infinito de R\$ 26.121,00 ha<sup>-1</sup>. Para que os cenários 2 e 3 sejam pelo menos iguais aos cenário 1 nesse critério econômico, *C. lusitanica* precisaria gerar uma receita de R\$ 32.760,00 por hectare no corte raso aos 25 anos (cenário 2) e R\$ 30.805,00 por hectare aos 30 anos (cenário 3). Considerando que, atualmente, aos 13 anos, um corte raso dessa espécie geraria um valor de R\$ 1.081,70 por hectare, é difícil prever que a produção de *C. lusitanica* aumente até os 25 ou 30 anos a ponto de gerar as receitas esperadas para igualar os cenários.

Essa tendência fica comprovada ao se analisar os incrementos médios em diâmetro, altura e volume da espécie, que foram, respectivamente, 0,97 cm ano<sup>-1</sup>, 0,92 m ano<sup>-1</sup> e 13,22 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>. Mantendo essas médias de crescimento, *C. lusitanica* teria um diâmetro de 24,2 cm, altura de 23 m e um ganho em produção de 158 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> aos 25 anos. Nessa idade, as primeiras toras das árvores poderiam ser destinadas somente aos sortimentos de laminação > 18 cm ou serraria > 15 e > 20 cm, que são os sortimentos menos valiosos. Já aos 30 anos, o diâmetro médio seria de 29,1 cm, altura de 27,6 m e ganho de produção de 224,74 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, o que já possibilita a destinação das primeiras toras dessas árvores para sortimentos mais valiosos, como os de laminação e serraria > 25 cm, por exemplo. De qualquer maneira, a presente situação do plantio de *C. lusitanica* não se mostra vantajosa economicamente.

Como não foram considerados os sortimentos de laminação >25 cm e >35 cm, o valor de VPL infinito do cenário *Pinus23* é provavelmente maior, pois os sortimentos de laminação são mais valorados. Portanto, na prática, a receita da venda de madeira de *C. lusitanica* aos 25 ou 30 anos para igualar os valores de VPL deveria ser superior aos valores apresentados.

Além disso, no atual cenário (2 ou 3), ainda não foram feitos desbastes no *C. lusitanica*. Aos 14 anos, sugere-se que pelo menos um desbaste para a produção de madeira de grandes dimensões deva ser feito, como em *P. taeda*. Na construção desses dois cenários para os próximos anos, todavia, também não foram considerados desbastes futuros na espécie, como aos 16 e 21 anos, por exemplo, os quais poderiam melhorar a produção da espécie e, consequentemente, o desempenho econômico no final da rotação.

## DISCUSSÃO

### Afilamento do tronco de *P. taeda* e *C. lusitânica*

Diversos modelos têm sido aplicados à espécies florestais com o intuito de descrever o afilamento do tronco das mesmas, que é uma informação muito importante para obter dados precisos de volume por sortimentos.

De maneira geral, todos os modelos testados para *P. taeda* aos 23 e 36 anos e *C. lusitânica* aos 13 anos apresentaram estatísticas satisfatórias nos critérios de qualidade avaliados, o que indica um bom desempenho das funções ajustadas em descrever o afilamento do tronco dessas espécies. Foi observada, também, uma tendência de os modelos apresentarem maior resíduo na porção superior das árvores, tanto para *P. taeda* quanto para *C. lusitânica*. Esse comportamento também foi verificado por Kohler et al. (2013), para dados de *P. taeda*, onde o polinômio de 5º grau apresentou tendência em subestimar os diâmetros na porção superior do tronco.

Dentre os modelos testados, dois deles apresentaram os melhores desempenhos para todos os conjuntos de dados avaliados: Kozak (1988) e Polinômio de 5º grau. Tais modelos são comumente utilizados para descrever o afilamento do tronco de espécies florestais, incluindo *P. taeda*. O polinômio de 5º grau apresenta, também, uma vantagem em relação a outros polinômios, como os de potências inteiras e fracionárias, que se refere a maior facilidade em trabalhar com sua integral, assim como aponta Rosot (1989).

O polinômio de 5º grau foi o que teve os melhores resultados na representação do tronco de *P. taeda* nos trabalhos de Souza et al. (2008), Souza (2009), Yoshitani Jr. et al. (2012) e Souza et al. (2016). Nicoletti (2017) observou que o polinômio de 5º grau foi o que teve melhor desempenho para estimar o diâmetro ao longo do tronco, do volume da 1ª tora e dos volumes parciais para *P. taeda*. Esse modelo também teve desempenho superior na estimativa da altura comercial em *Eucalyptus* sp. no Sul da Bahia (MENDONÇA, 2006). Já o modelo de Kozak (1988) foi o modelo que apresentou o melhor desempenho para descrever o afilamento do tronco de *Pinus pinaster* Ait. no trabalho de Rojo et al. (2005) e de *A. angustifolia* por Costa et al. (2015) e Costa et al. (2016), por exemplo.

Vale ressaltar que, para *P. taeda*, muitos trabalhos com afilamento do tronco já foram conduzidos, e para cada conjunto de dados, um determinado modelo foi escolhido de acordo com o seu desempenho. Para essa espécie, novas técnicas de estimativa do afilamento têm sido aplicadas, como modelos de efeitos mistos e fixos (LEITES; ROBINSON, 2003; CAO; WANG, 2011) e modelos não lineares mistos (NICOLETTI, 2017).

No caso de *C. lusitanica*, ainda são poucos os estudos referentes ao afilamento do tronco, e a maior parte dos trabalhos encontrados foram desenvolvidos na África, em países como Etiópia (TESHOME, 2005; BERHE; ARNOLDSSON, 2008; BERHE, 2009) e Quênia (GOR-KESIAH, 1978), sendo que não foi encontrado nenhum estudo com essa temática no Brasil.

Gor-Kesiah (1978) desenvolveu e testou modelos de afilamento para descrever o perfil do tronco de *C. lusitanica*, no Quênia, e observou que, dentre os modelos tradicionais testados, o modelo logarítmico foi o que apresentou melhores resultados. Para Berhe e Arnoldsson (2008), na Etiópia, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o de Kozak (1988) e Berhe (2009) ajustou modelos de forma exponencial de volume comercial para essa espécie com dados de *C. lusitanica* provenientes do mesmo país.

### **Avaliação econômica do plantio sob cobertura**

A produção de madeira *clear* de *P. taeda*, com árvores de maiores dimensões e mais valiosas obtidas com a aplicação de podas e desbastes, desempenhou um importante papel nos cenários econômicos do plantio sob cobertura. Nesse trabalho, somente a receita gerada pelas toras podadas até 6 m de altura, destinadas à laminação, somaram em torno de 50% da receita total obtida com o corte raso aos 36 anos. Tais resultados se assemelham aos de Dobner Jr. e Quadros (2019), onde foi observado que mesmo que os sortimentos podados até os 6 m de altura representassem apenas 17% da altura total das árvores de *P. taeda* aos 30 anos, tais sortimentos contabilizaram cerca de 30% do volume total produzido e 50% da receita total.

O peso das árvores de maiores dimensões na composição dos cenários econômicos fica evidente, também, ao se analisar a produção de *C. lusitanica* aos 13 anos, onde a maior parte da produção (em torno de 68%) foi destinada ao sortimento de madeira para processo de obtenção de celulose, que não representa nenhum lucro para o empreendimento florestal, considerando os valores de sortimento adotados nesse trabalho.

No estudo de Gomes (1999), o autor verificou que a produção de madeira de *P. taeda* visando apenas o mercado de celulose se mostrou inviável no projeto florestal analisado, sendo que o acréscimo na receita com a consideração de maior valor agregado para madeira de maiores dimensões aumentou a rentabilidade do projeto, sobretudo em regimes com desbastes.

De fato, assim como os custos, crescimento das árvores, preço dos sortimentos, qualidade de sítio, entre outros fatores, o regime de manejo e as práticas silviculturais adotadas em um projeto florestal afetam diretamente a rentabilidade destes, o que foi observado por diversos autores. Acerbi Jr et al. (2002) desenvolveram um sistema para predição do



crescimento e da produção de *P. taeda* para simular e avaliar economicamente diferentes regimes de manejo para a produção de madeira livre de nós. Nesse estudo, os autores verificaram que os regimes de manejo mais lucrativos foram aqueles com um desbaste pré-comercial seguido por dois desbastes comerciais e poda. Observaram, também, que o arrendamento de terras é lucrativo para o plantio da espécie, especialmente se for um sítio de alta produtividade, mas que no estudo em questão, o plantio em terras próprias se mostrou mais rentável. Com taxas de desconto maiores que 10%, os regimes de manejo tornam-se inviáveis economicamente, mas é possível obter maior lucratividade com a realização de podas e, consequentemente, produção de *clearwood* pelo valor agregado da mesma.

Scolforo et al. (2001), também avaliando economicamente regimes de desbaste para obtenção de madeira *clear* de *P. taeda*, notaram que a opção por um manejo pré-comercial, seguido de 2 desbastes e desrama, gera as maiores receitas líquidas para os sítios de maior qualidade. Para o sítio com menor qualidade, pode-se optar por um desbaste pré-comercial com apenas um desbaste e desrama, que foi o regime de manejo mais viável economicamente. Além disso, a obtenção de lucro com diferentes taxas de desconto esteve associada ao índice de qualidade de sítio, sendo que em sítios de melhor qualidade, é possível obter lucro em qualquer preço de venda de madeira podada com taxas de desconto de 10%, 8% e 6%.

No que tange ao componente *C. lusitanica* do plantio sob cobertura, foi verificado que, nas atuais condições, é pouco provável que a espécie, aos 25 ou 30 anos, mostre-se no mínimo equiparável ao plantio puro de *P. taeda* com corte raso aos 23 anos. Além disso, *C. lusitanica* ainda não passou por nenhum desbaste, já com 14 anos de idade. Mesmo que o primeiro desbaste não seja rentável, são necessários regimes de manejo que incluam vários desbastes ao longo da rotação para obter madeira de maiores dimensões, ou mesmo uma floresta destinada à multiprodutos. Dobner Jr. e Quadros (2019) perceberam que os tratamentos não desbastados de *P. taeda* não geraram lucro nos sortimentos acima de 40 cm para madeira não podada (serraria) e acima de 50 cm para toras podadas (laminação) devido às menores árvores produzidas.

É importante frisar que *C. lusitanica* é uma espécie madeireira com potencial para plantios comerciais no Brasil. Entretanto, grande parte dos plantios dessa espécie é, ainda, a nível experimental, com poucos a nível comercial, e, consequentemente, ainda não existe mercado consolidado para essa espécie no Brasil.

Em países onde *C. lusitanica* já tem um histórico de cultivo, de conhecimento da silvicultura e do melhoramento genético, a madeira é valorizada economicamente. Na Nova Zelândia, onde *C. lusitanica* é uma espécie amplamente cultivada para fins comerciais, um

talhão de 35 anos pode gerar uma receita total de até US\$ 52.000,00 por hectare. Nesse caso, as primeiras toras podadas chegam a valer US\$ 240,00 m<sup>-3</sup> e as segundas toras podadas valem US\$ 160,00 m<sup>-3</sup> (CAWSTON; NICHOLAS, 2006). Também na Nova Zelândia, Cavana e Glass (1985) observaram que a cultura de *C. lusitanica* foi a segunda mais rentável, perdendo apenas para *P. radiata*, que é a espécie exótica de *Pinus* mais plantada no país e que pode ser diretamente substituída pela madeira de *C. lusitanica*.

Entretanto, essa realidade é muito diferente da observada no mercado brasileiro, onde mesmo os preços para *P. taeda*, que já é cultivado no país há, pelo menos, 40 anos, são bem inferiores ao do mercado neozelandês para *C. lusitanica* citado acima. Para exemplificar, utilizando como base os valores praticados de sortimentos no presente trabalho, a primeira tora de *P. taeda* vale R\$ 390,00 m<sup>-3</sup> (aproximadamente US\$ 90, considerando a média de câmbio atual para dólar e real).

A manutenção do estrato superior de *P. taeda* por mais tempo, como 36 anos, se mostrou lucrativa nos cenários avaliados. Isso também foi observado por Dobner Jr. e Quadros (2019), que perceberam que rotações de *P. taeda* mais longas, de no mínimo 24 anos, são mais rentáveis e mostram-se como uma alternativa a atual ideia de que maiores ganhos econômicos são obtidos com rotações mais curtas, como adotado pela maioria das empresas do setor florestal brasileiro. Além disso, madeiras provenientes de árvores mais velhas apresentam uma maior proporção de lenho tardio, o que confere uma melhoria da qualidade da madeira.

Considerando a realidade de pequenos e médios produtores na região de estudo, que são aqueles proprietários de áreas de 1 a 4 módulos fiscais (pequeno) e 4 a 15 módulos fiscais (médio) (BRASIL, 1993), ou seja, 80 ha (pequeno) e 80 a 300 ha (médio) (INCRA, 2013), o sistema sob cobertura é uma alternativa que pode ser adotada como forma de otimização do espaço produtivo, pois há a valorização da madeira da espécie de cobertura enquanto ocorre a formação de uma floresta no estrato inferior.

No que se refere à taxa de juros adotada para construção dos cenários econômicos, optou-se por adotar uma taxa real, sem inflação, de 3% a.a., que pode ser considerada uma taxa realista para as condições brasileiras, especialmente para pequenos e médios produtores. Em termos nominais, essa taxa representaria mais que 10% a.a., pois a taxa de inflação girou em torno de 8,6% entre 1994 e 2017 (DOBNER Jr.; QUADROS, 2019).

## CONCLUSÃO

Os resultados discutidos no presente capítulo demonstram que as equações de afilamento ajustadas aos dados de *P. taeda* aos 23 e 36 anos e *C. lusitanica* aos 13 anos apresentaram um desempenho satisfatório. Foi adotado o polinômio de 5º grau para descrever o afilamento do tronco de *P. taeda* aos 36 anos e *C. lusitanica*, e Kozak 1988 para descrever o afilamento de *P. taeda* aos 23 anos.

As espécies utilizadas no plantio sob cobertura tiveram desempenhos econômicos diferentes, onde a manutenção das árvores de *P. taeda* por mais 13 anos resultou em toras de maior diâmetro e mais valiosas, especialmente pela maior produção de sortimentos destinados à laminação. Por outro lado, a produção de *C. lusitanica* esperada aos 25 ou 30 anos não é equivalente à produção de *P. taeda* com 23 anos, com base na situação atual do componente e, portanto, não é vantajosa economicamente.



## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo com toda a análise desenvolvida nessa dissertação a respeito do plantio de *Cupressus lusitanica* sob cobertura de *Pinus taeda*, cujo objetivo de ambas as espécies é a produção de madeira, ainda restam alguns aspectos a ser considerados ao se instalar um plantio sob cobertura.

O primeiro se refere à escolha da espécie para plantio sob cobertura: mesmo com a verificação de efeito negativo da cobertura de *P. taeda* no crescimento de *C. lusitanica* apenas para o diâmetro, este apresentou menores médias de variáveis dendrométricas em comparação a plantios puros da espécie, tanto na mesma região geográfica quanto em outros países. Uma possível explicação para isso seria a característica de tolerância à luz da espécie, a qual é considerada heliófila. Portanto, sugere-se adotar espécies que tenham tolerância à sombra para compor o estrato inferior.

Outra questão se refere à falta de estudos que subsidiem as estimativas de crescimento de *C. lusitanica*, o que dificultou a projeção do retorno econômico deste componente no sistema. De qualquer maneira, os resultados do estrato inferior possibilitaram inferir que há potencial econômico no sistema sob cobertura em questão, já que foi possível manter o estrato inferior ao mesmo tempo em que as árvores do estrato superior valorizaram. É o momento de remover totalmente o estrato superior, realizar um desbaste no *C. lusitanica* e focar no potencial de sítio dessa espécie.

Sugere-se ainda realizar mais um desbaste no estrato superior após o plantio do estrato inferior, pois, mesmo que ocorram danos com a colheita, é provável que o crescimento da espécie do estrato inferior seja mais uniforme, produzindo uma madeira de qualidade e perfis de espessura e densidade dos anéis de crescimento mais homogêneo. Estudos demonstram que há um ganho em diâmetro das árvores sob cobertura com a redução do efeito de sombra exercido pelo dossel, o que representa, por sua vez, um retorno financeiro maior no final da rotação ou mesmo ao longo desta com a receita proveniente da madeira desbastada.

Por fim, reitera-se que o plantio sob cobertura pode ser considerado uma alternativa para o pequeno e médio produtor que pretende otimizar a utilização do espaço, pois possibilita a coexistência de duas rotações. Isso é uma vantagem ao se considerar o custo de terra, que é computado apenas uma vez, oposto do que aconteceria em dois plantios puros das espécies.

## REFERÊNCIAS

ACERBI Jr, F. W.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; MAESTRI, R. Modelo para prognose do crescimento e da produção e análise econômica de regimes de manejo para *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 26, n. 6, p. 699-713, 2002.

ADJERS, G.; HADENGGANAN, S.; KUUSIPALO, J.; NURYANTO, K.; VESA, L. Enrichment planting of dipterocarps in logged-over secondary forests: effect of width, direction and maintenance method of planting line on selected *Shorea* species. **Forest Ecology and Management**, v. 73, n. 1-3, p. 259-270, 1995.

AGESTAM, E.; EKÖ, P. M.; NILSSON, U.; WELANDER, N. T. The effects of shelterwood density and site preparation on natural regeneration of *Fagus sylvatica* in Southern Sweden. **Forest Ecology and Management**, v. 176, n. 1-3, p. 61-73, 2003.

AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; FRITZSONS, E.; PINTO JR, J. E. **Programa de melhoramento de pinus da Embrapa Florestas**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2011. 83 p.

AIMERS CONSULTING. **‘Why should industry invest in Cypresses in FFR?’** Owhata, Rotorua: Aimers Consulting, 2008. 39 p.

ALBUQUERQUE, A. R.; CASTRO, V. R.; LOBÃO, M. S.; SARTO, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; GUEDES, F. T. P. Comparative analysis of anatomy and micro-density of the growth rings of hardwoods and conifers, with emphasis on dendrochronology. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 1-13, 2016.

ALEM, S.; PAVLIS, J.; URBAN, J.; KUCERA, J. Pure and mixed plantations of *Eucalyptus camaldulensis* and *Cupressus lusitanica*: their growth interactions and effect on diversity and density of undergrowth woody plants in relation to light. **Open Journal of Forestry**, v. 5, n. 4, p. 375-386, 2015.

ALMEIDA, C. C. F. **Avaliação da qualidade da colagem de madeira de *Cupressus lusitânica* Mill. para a produção de painéis colados lateralmente (Edge Glued Panel – EGP)**. 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Lages, SC, 2015.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v 22, n.6, p. 711–728, 2013.

AMARAL, A. C. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela microdensitometria de raios X. **Revista Ciência e Tecnologia**, v.6, n.11, p.17-23, 1998.

AMOAHA, F. M.; NUERTEY, B. N.; BAIDOO-ADDO, K.; OPPONG, F. K.; OSEI-BONSU, K.; ASAMOAH, T. E. O. Underplanting oil palm with cocoa in Ghana. **Agroforestry Systems**, v. 30, p. 289-299, 1995.

ANDRADE, C. M.; FINGER, C. A. G.; THOMAS, C.; SCHNEIDER, P. R. Variação do incremento anual ao longo do fuste de *Pinus taeda* L. em diferentes idades e densidades populacionais. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 3, p. 239-246, 2007.

ANDRADE, E. S.; GARCIA, S. S. C.; ALBERNAZ, A. L. K. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOUTINHO, V. H. P. Growth ring analysis of *Euxylophora paraensis* through x-ray microdensity. **Ciência Rural**, v. 47, n. 4, p. 1-6, 2017.

ARANGO, J. I. D. V. **Crecimiento y rendimiento de *Cupressus lusitanica* Mill. Em Antioquia, Colombia, utilizando parcelas permanentes**. 1975. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Universidad de Costa Rica, UCR, Turrialba, 1975.

ARCE, J. E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte**. 2000. 129 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR, 2000.

ASAYE, Z.; ZEWDIE, S. Fine root dynamics and soil carbon accretion under thinned and unthinned *Cupressus lusitanica* stands in Southern Ethiopia. **Plant Soil**, v. 366, p. 261-271, 2013.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. New York: Pergamon Press, 1970. 506p.

AZEVEDO, G. B.; SOUSA, G. T. O.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JUNIOR, V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 309-318, 2011.

BALANDIER, P. et al. Six-year time course of light-use efficiency, carbon gain and growth of beech saplings (*Fagus sylvatica*) planted under a Scots pine (*Pinus sylvestris*) shelterwood. **Tree Physiology**, v. 27, n. 8, p. 1073-1082, 2007.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003.

BAO, F. C.; JIANG, Z. H.; JIANG, X. M.; LU, X.X.; LUO, X. Q.; ZHANG, S. Y. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. **Wood Science and Technology**, v. 35, p. 363-375, 2001.

BARBEITO, I.; LeMAY, V.; CALAMA, R.; CAÑELLAS, I. Regeneration of Mediterranean *Pinus sylvestris* under two alternative shelterwood systems within a multiscale framework. **Canadian Journal of Forestry Research**, v. 41, n. 2, p. 341-351, 2011.

BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. **Wood quality and its biological basis**. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2003.

BARRICHELO, L. E. G. et al. Estudos de procedências de *Pinus taeda* visando seu aproveitamento industrial. **IPEF**, n. 15, p. 1-14, 1977.

BEBBER, D. P.; THOMAS, S. C.; COLE, W. G.; BALSILLIE, D. Diameter increase in mature eastern white pine *Pinus strobus* L. following partial harvest of old-growth stands in Ontario, Canada. **Trees**, v. 18, n. 1, p. 29-34, 2004.

BENDTSON, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, v. 28, n. 10, p. 61-72, 1978.

BERGQVIST, G. Wood volume yield and stand structure in Norway spruce understorey depending on birch shelterwood density. **Forest Ecology and Management**, v. 122, n. 3, p. 221-229, 1999.

BERHE, L.; ARNOLDSSON, G. Tree taper models for *Cupressus lusitanica* plantations in Ethiopia. **Southern Forests**, v. 70, n. 3, p. 193-203, 2008.

BERHE, L. Volume and implicit taper functions for *Cupressus lusitanica* and *Pinus patula* tree plantations in Ethiopia. **Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management**, v. 2, n. 1, p. 12-28, 2009.

BERRILL, J. P. Preliminary growth and yield models for even-aged *Cupressus lusitanica* and *Cupressus macrocarpa* plantations in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 34, n. 3, p. 272-292, 2004.



BERTALANFFY, L von. Quantitative laws for metabolism and growth. **Quarterly Review of Biology**, v. 32, p. 217-231, 1957.

BEVEGE, D.; RICHARDS, B. N. Nitrogen in the growth of *Araucaria cunninghamii* Ait. Underplanted in *Pinus* stands. **Ecology**, v. 51, n. 1, p. 134-142, 1970.

BORGES, J. F. **Seccionamento do fuste de *Pinus taeda* L. para obtenção do volume de madeira serrada, através da função polinomial**. 1981. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR. 1981.

BRASIL. Lei nº 8.629, de 25 de fevereiro de 1993. Dispõe sobre a regulamentação dos dispositivos constitucionais relativos à reforma agrária, previstos no Capítulo III, Título VII, da Constituição Federal. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 fev. 1993.

BROSE, P. H. A comparison of the effects of different shelterwood harvest methods on the survival and growth of acorn-origin oak seedlings. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 41, p. 2359-2374, 2011.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. New York: Springer, 2012.

BURTON, P. J.; SUTHERLAND, D. C.; DAINITH, N. M.; WATERHOUSE, M. J.; NEWSOME, T. A. **Factors influencing the density of natural regeneration in uniform shelterwoods dominated by Douglas-fir in the Sub-Boreal Spruce zone**. Victoria, BC, Canada: Ministry of Forests Research Program, 2000.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013. 605 p.

CAO, Q. V.; WANG, J. Calibrating fixed- and mixed-effect taper equations. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 4, p. 671-673, 2011.

CARNEIRO, M. F.; ALBUQUERQUE, W. W.; SOUZA, C. O.; CÂMARA, A. P.; SILVA, J. G. M.; GALVÃO, E. K. S. Crescimento radial e fator de forma artificial de árvores de teca em Alta Floresta do Oeste, Rondônia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 61, p. 1-7, 2018.

CASTILLO, A.P.; CASTRO, R.; OHTA, S. **Índices de calidad de madera en *Pinus taeda* de Rivera para la optimización en el uso final**. Informe de Investigación, n. 2, 2000. 26 p.

CASTRO, V. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; SURDI, P. G. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de *Pinus* (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr et Golf.) por densitometria de raio x. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 353-360, 2014.

CAVANA, R. Y.; GLASS, B. P. Economic analysis of selected special-purpose species regimes. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 15, n. 2, p. 180-194, 1985.

CAVELIER, J.; TOBLER, A. The effect of abandoned plantations of *Pinus patula* and *Cupressus lusitanica* on soils and regeneration of a tropical montane rain forest in Colombia. **Biodiversity and Conservation**, v. 7, p. 335-347, 1998.

CAWSTON, J.; NICHOLAS, I. Economic analyses. In: NICHOLAS, I. (Ed.). **Best Practices with Farm Forestry Timber Species – Nº 1: Cypresses**. Wellington, New Zealand: New Zealand Farm Forestry Association, 2006. 88 p.

CHAVERRI, A.; ZÚÑIGA, E.; FUENTES, A. Crecimiento inicial de una plantación mixta de *Quercus*, *Cornus*, *Alnus* y *Cupressus* em Costa Rica. **Revista Biología Tropical**, v. 45, n. 2, p. 777-782, 1997.

CHAVES, E.; FONSECA, W. **Ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill.)**. Colección de Guías Silviculturales, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 1991. 66 p.

CHINCHILLA, O.; CHAVES, E.; MORA, F. Comparación de crecimientos bajo diferentes intensidades de manejo en plantaciones de Ciprés (*Cupressus lusitanica* Miller) en dos sitios de Costa Rica. **Revista Baracoa**, v. 30, p. 1-19, 2011.

CLARK III, A.; DANIELS, R. F.; JORDAN, L. Juvenile/mature wood transition in Loblolly Pine as defined by annual ring specific gravity, proportion of latewood, and microfibril angle. **Wood and Fiber Science**, v. 38, n. 2, p. 292-299, 2006.

CLARK III, A.; SOUTER, R. A.; SCHLAEGEL, B. E. **Stem profile equations for southern tree species**. Asheville: USDA Forest Service Research Paper, 1991.

CORNELIUS, J.; APEDAILE, L.; MESÉN, F. Provenance and family variation in height and diameter growth of *Cupressus lusitanica* Mill at 28 months in Costa Rica. **Silvae Genetica**, v. 45, n. 2, p. 82-85, 1996.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; HESS, A. F. Função de afilamento e sortimentos de madeira para *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 523-533, 2016.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A.; SCHNEIDER, P. R.; MÜLLER, I.; Approximation of numerical integration applied to *Araucaria angustifolia* stem taper models. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 31-40, 2015.

COWN, D. J. Corewood (juvenile wood) in *Pinus radiata* – should we be concerned? **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 22, n. 1, p. 87-95, 1992.

CUNHA, A. B.; BRAND, M. A.; ALMEIDA, C. C. F.; SOTHE, C.; MARTARELLO, L. P.; GORSKI, L. Rendimento em madeira serrada de *Cupressus lusitanica* Mill por meio do sistema de desdobro tangencial. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 205-214, 2016.

DECOUX, V.; VARCIN, E.; LEBAN, J. M. Relationships between the intra-ring wood density assessed by X-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density determination. **Ann. For. Sci.**, v. 61, n.3, p. 251-262, 2004.

DEY, D. C.; GARDINER, E. S.; SCHWEITZER, C. J.; KABRICK, J. M.; JACOBS, D. F. Underplanting to sustain future stocking of oak (*Quercus*) in temperate deciduous forests. **New Forests**, v. 43, n.5, p. 955-978, 2012.

DICKENS, E. D.; MOORHEAD, D. J. **A guide to southern pine products and general specifications: a UGA-WSFR extension note**. 2005. Disponível em: <<https://docplayer.net/25572491-A-guide-to-southern-pine-products-and-general-specifications-a-uga-wsfr-extension-note-november-2005-introduction-purpose-forest-wood-products.html>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

DOBNER Jr, M.; HIGA, A. R.; SEITZ, R. A. Efeito da cobertura de *Pinus taeda* L. na proteção contra geadas e no crescimento de plantas jovens de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Floresta**, v. 39, n. 4, p. 807-823, 2009.

DOBNER Jr, M.; HUSS, J.; TOMAZELLO FILHO, M. Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinnings and harvest age in southern Brazil. **Wood Science and Technology**, v. 52, p. 465-485, 2018.

DOBNER Jr., M. **Impacto do manejo de povoamentos na produtividade e qualidade da madeira de *Pinus taeda***. 2014. 276 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR. 2014.

DOBNER Jr., M.; QUADROS, D. S. Economic performance of Loblolly Pine stands in Southern Brazil as a result of different crown thinning intensities. **Revista Árvore**, v. 43, n. 2, p. 1-11, 2019.

EBERHARDT, T. L.; SAMUELSON, L. J. Collection of wood quality data by X-ray densitometry: a case study with three southern pines. **Wood Science Technology**, v. 49, p. 379-753, 2015.

ECKENWALDER, J. E. **Conifers of the world: the complete reference**. Portland: Timber Press, 2009. 720 p.

ENCINAS, J. I.; SILVA, G. F.; PINTO, J. R. R. Idade e crescimento das árvores. **Comunicações Técnicas Florestais**, v. 7, n. 1, p. 1-47, 2005.

FARJON, A.; FILER, D. **An atlas of the world's conifers: an analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status**. Boston: Brill, 2013. 512 p.

FARM FORESTRY NEW ZEALAND. **Growing cypresses for timber**. Wellington: NZFFA Information leaflet N° 21, 2005.

FERREIRA, R. A. **Análise genética e seleção em testes dialélicos de *Pinus taeda* L.** 2005. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR, 2005.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Influência da resinagem no crescimento de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* e sua avaliação econômica**. 1991. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR. 1991.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 83, n. 1-2, p. 36-46, 1996.

FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, S. V.; FELDE, J. L.; DIAS, A. N. Dinâmica do afilamento do tronco e da produção de madeira em plantios de *Araucaria angustifolia*. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 595-603, 2014.

FINGER, C. A. G. F. **Biometria Florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

FISCHER, F.; SCOLFORO, J. R.S.; ACERBI Jr., F. W.; MELLO, J. M.; MAESTRI, R. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, p. 167-188, 2001.

FOELKEL, C. E. B.; FERREIRA, M.; NEHRING, J. H.; ROLIM, M. B. Variabilidade no sentido radial de madeira de *Pinus elliottii*. **IPEF**, n. 10, p. 1-11, 1975.

FONSECA, S. M.; KAGEYAMA, P. Y. Bases genéticas e metodologia para seleção de árvores superiores de *Pinus taeda*. **IPEF**, n. 17, p. 35-59, 1978.

FORSLUND, R. R. A geometrical tree volume model based on the location of the centre of gravity of the bole. **Canadian Journal of Forest Research**, v.12, n.2, p.215-221, 1982.

GADOW, K. V.; PUKKALA, T.; TOMÉ, M. (Eds.). **Managing forest ecosystems**. Dordrecht: Springer, 2007. 389 p.

GARDINER, E. S.; YEISER, J. L. Underplanting cherrybark oak (*Quercus pagoda* Raf.) seedlings on a bottomland site in the southern United States. **New Forests**, v. 32, p. 105-119, 2006.

GERLACH, J. P.; GILMORE, D. W.; PUETTMANN, K. J.; ZASADA, J. C. **Mixed-species forest ecosystems in the Great Lakes region: a bibliography**. Saint Paul: University of Minnesota Press, 2002. 279 p.

GOMES, F. S. **A seleção de regimes de manejo mais rentáveis em *Pinus taeda* L. na produção de madeira para papel e celulose**. 1999. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR. 1999.

GOR-KESIAH, J. O. **Volume and taper estimation systems for *Pinus patula* and *Cupressus lusitanica* growing in Kenya forest plantations**. 1978. 179 f. Dissertação (Mestre em Ciências Florestais) - University of British Columbia, UBC, Vancouver, Canada. 1978.

GRESHAM, C. A. Loblolly Pine (*Pinus taeda*) irregular shelterwood stand development and red-cockaded woodpecker management – a case study. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 20, n. 2, p. 90-93, 1996.

GULLER, B.; ISIK, K.; CETINAY, S. Variations in the radial growth and wood density components in relation to cambial age in 30-year-old *Pinus brutia* Ten. at two test sites. **Trees**, v. 26, n. 3, p. 975-986, 2012.

HANELL, B.; NORDFJELL, T.; ELIASSON, L. Productivity and costs in shelterwood harvesting. **Scandinavian Journal of Forest Research**, n. 15, n. 5, p. 561-569, 2000.

HOCKING, D.; NICHOLAS, I. Timber properties and market. In: NICHOLAS, I. **Best Practice with Farm Forestry Timber Species – N° 1: Cypress**. Wellington: New Zealand Farm Forestry Association, 2006. 88 p.

HOLGEN, P.; HANELL, B. Performance of planted and naturally regenerated seedlings of *Picea abies* – dominated shelterwood stands and clearcuts in Sweden. **Forest Ecology and Management**, v. 127, n. 1-3, p. 129-138, 2000.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abränger keiten (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschungs projekten)**. Baden – Württemberg Mitteilungen der FVA, 1976. 146 p. (Abt. Biometric und Informatik, n. 21).

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR, J. A. **Forest mensuration**. Hoboken: John Wiley & Sons, 4 ed, 2003. 443 p.

IBA – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2019**. 80 p. 2019. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 15 maio de 2019.

INCRA. **Tabela com Módulo Fiscal dos Municípios**. 149 p. 2013. Disponível em: <[http://www.incra.gov.br/sites/default/files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/indices-cadastrais/indices\\_basicos\\_2013\\_por\\_municipio.pdf](http://www.incra.gov.br/sites/default/files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/indices-cadastrais/indices_basicos_2013_por_municipio.pdf)>. Acesso em: 10 março de 2020.

IWAKIRI, S.; SHIMOYAMA, V. R. S.; PEDROSA, A. L.; ANJOS, R. A. M. Efeito do crescimento radial de *Pinus taeda* L. nas propriedades do painel compensado. **Floresta e Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 90-96, 2002.

KARANI, P. K. Interim results of thinning research on *Cupressus lusitanica* in Uganda. **The Commonwealth Forestry Review**, v. 55, n. 1, p. 41-55, 1976.

KEEFE, K.; SCHULZE, M. D.; PINHEIRO, C.; ZWEEDE, J. C.; ZARIN, D. Enrichment planting as a silvicultural option in the eastern Amazon: case study of Fazenda Cauaxi. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 9, p. 1950-1959, 2009.

KELTY, M. J.; CAMERON, I. R. Plot designs for the analysis of species interactions in mixed stands. **Commonwealth Forestry Review**, v. 74, n. 4, p. 322-332, 1995.

KELTY, M. J. The role of species mixtures in plantation forestry. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2-3, p. 125-204, 2006.

KERR, G. **Managing continuous cover forests**. Bristol, UK: Operational Guidance Booklet N° 7: Forestry Commission, 2008. 64 p.

KERR, G.; HAUFE, J. **Successful underplanting**. Bristol, UK: Silvicultural Guide, Forestry Commission, 2016. 42 p.

KIMBERLEY, M.; NICHOLAS, I. Pruning and thinning. In: NICHOLAS, I. (Ed.). **Best Practices with Farm Forestry Timber Species – N° 1: Cypresses**. Wellington: New Zealand Farm Forestry Association, 2006. 88 p.

KNAPP, B. O.; WANG, G. G.; WALKER, J. L.; HU, H. Using silvicultural practices to regulate competition, resource availability, and growing conditions for *Pinus palustris* seedlings underplanted in *Pinus taeda* forests. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 46, n.7, p. 902-913, 2016.

KOHLER, S. V. **Evolução do afilamento do tronco e do sortimento em plantios de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina**. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR, 2013.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. Modelos de afilamento para *Pinus taeda* por classes de idade. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 4, p. 470-479, 2013.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, v. 45, n. 3, p. 545-554, 2015.

KOUBAA, A.; ZHANG, S. Y. T.; MAKNI, S. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. **Annals of Forest Science**, v. 59, p. 511-518, 2002.

KOZAK, A. A variable-exponent taper equation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 18, n. 11, p. 1363-1368, 1988.

KOZAK, A. My last words on taper equations. **Forestry Chronicle**, v. 80, n. 4, p. 507–515, 2004.

KOZAK, A.; MUNRO, D. P.; SMITH, J. H. G. Taper functions and their application in forest inventory. **Forest Chronicle**, v. 45, n. 4, p. 278 – 283, 1969.

KOZLOWSKI, T. T. **Growth and development of trees**. New York: Academic Press, 1971. 514 p.

KRETSCHMANN, D. E.; BENDTSEN, B. A. Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fast-grown plantation Loblolly pine lumber. **Wood and Fiber Science**, v. 24, n. 2, p. 189-203, 1992.

LAAR, A. van; AKÇA, A. **Forest Mensuration**. Amsterdam: Springer, 2007. 389 p.

LARSON, P. R. **Wood formation and the concept of wood quality**. New Heaven: Yale University, 1969. 75 p.

LARSON, P. R.; KRETSCHMANN, D. E.; CLARK III, A.; ISEBRANDS, J. G. **Formation and roperties of juvenile wood in Southern Pines: a synopsis**. Madison: U. S. Department of Agriculture. 2001. 42 p.

LEE, W. K.; SEO, J. H.; SON, Y. M.; LEE, K. H.; VON GADOW, K. Modeling stem profiles for *Pinus densiflora* in Korea. **Forest Ecology and Management**, v. 172, n. 1, p. 69–77, 2003.

LEITES, L. P.; ROBINSON, A. P. Improving taper equations of Loblolly Pine with crown dimensions in a mixed-effects modeling framework. **Forest Science**, v. 50, n. 2, p. 204-212, 2003.

LEMENIH, M.; OLSSON, M.; KARLTUM, E. Comparison of soil attributes under *Cupressus lusitanica* and *Eucalyptus saligna* established on abandoned farmlands with continuously cropped farmlands and natural forest in Ethiopia. **Forest Ecology and Management**, v. 195, n. 1-2, p. 57-67, 2004.



LISANERWORK, N.; MICHELSEN, A. Allelopathy in agroforestry systems: the effects of leaf extracts of *Cupressus lusitanica* and three *Eucalyptus* spp. on four Ethiopian crops. **Agroforestry Systems**, v. 21, n. 1, p. 63-74, 1993.

LOFTIS, D. L. A shelterwood method for regenerating red oak in the Southern Appalachians. **Forest Science**, v. 36, n. 4, p. 917-929, 1990.

LOPES, H. V. S. **Análise econômica dos fatores que afetam a rotação de povoamentos de eucaliptos**. 1990. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, MG, 1990.

LUOGA, E. J.; CHAMSHAMA, A. O.; IDDI, S. Survival, growth, yield and wood quality of a species and provenance trial of *Cupressus lusitanica*, *Cupressus lindleyi* and *Cupressus benthamii* at Hambalawe, Lushoto, Tanzania. **Silvae Genetica**, v. 43, n. 4, p. 190-195, 1994.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Editora UNICENTRO: Guarapuava, PR, 2009.

MACHADO, S. A.; SILVA, L. C. R.; FIGURA, M.A.; TÊO, S. J.; NASCIMENTO, R. G. M. Comparison of methods for estimating heights from complete stem analysis data for *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 45-55, 2010.

MALIMBWI, R. E.; PERSSON, A.; IDDI, S.; CHAMSHAMA, S. A. O.; MWIHOMEKE, S. T. Effects of spacing on yield and some wood properties of *Cupressus lusitanica* at Rongai, Northern Tanzania. **Forestry**, v. 65, n. 1, p. 73-82, 1992.

MAMO, N.; ADILO, M. **Managing *Cupressus lusitanica* plantation**. Addis Ababa, Etiópia: Ethiopian Agricultural Research Organization, 2004. 29 p.

MAMO, N.; STERBA, H. Site index functions for *Cupressus lusitanica* at Munesa Shashemene, Ethiopia. **Forest Ecology and Management**, v. 237, n. 1-3, p. 429-435, 2006.

MASON, B.; KERR, G.; SIMPSON, J. **What is continuous cover forestry?** Forestry Comission, Information Note, 1999.

MAX, T. A.; BURKHART, H. E. Segmented polynomial regression applied to taper equations. **Forest Science**, v. 22, n. 3, p. 283-289, 1976.

MEGRAW, R. A. **Wood quality factors in loblolly pine: the influence of tree age, position in tree, and cultural practice on wood specific gravity, fiber length and fibril angle.** Atlanta: Tappi Press, 1985. 88 p.

MELO, R. R. Radial and longitudinal variation of *Pinus taeda* L. wood basic density in different ages. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 2, p. 192-197, 2015.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; MENEZZI, C. H. S. D.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 67-73, 2010.

MENDONÇA, A.R. **Avaliação de uma metodologia para otimização do volume de toras comerciais de Eucalyptus sp, em função da qualidade do fuste.** 2006. 90f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Alegre, ES, 2006.

MENDONÇA, A.R.; PACHECO, G.R.; VIEIRA, G.C.; ARAÚJO, M.S.; INTERAMNENSE, M.T. Identidade de modelos para estimativa do volume de *Pinus*. **Nativa**, v. 03, n. 4, p. 281-286, 2015.

MILNE, P. Establishment and management options. In: NICHOLAS, I. (Ed.). **Best Practices with Farm Forestry Timber Species – Nº 1: Cypresses.** Wellington: New Zealand Farm Forestry Association, 2006. 88 p.

MIYAURA, T.; HOZUMI, K. A growth model of a single sugi (*Cryptomeria japonica*) tree based on the dry matter budget of its aboveground parts. **Tree Physiology**, v. 13, n. 3, p. 263-274, 1993.

MONTAGNINI, F.; EIBL, B.; GRANCE, L.; MAIOCCO, D.; NOZZI, D. Enrichment planting in overexploited subtropical forests of the Paranaense region of Misiones, Argentina. **Forest Ecology and Management**, v. 99, n. 1-2, p. 237-246, 1997.

MORA, C. R.; ALLEN, H. L.; DANIELS, R. F.; CLARK, A. Modeling corewood-outerwood transition in loblolly pine using wood specific gravity. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 6, p. 999-1011, 2007.

MÔRA, R. **Funções de afilamento de forma variável e modelagem de efeitos mistos em fustes de *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*.** 2015. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR, 2015.

MÜLLER, M. D.; SALLES, T. T.; PACIULLO, D. S.C.; BRIGUETTI, A. M.; CASTRO, C. R. T. Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. **Floresta**, v. 44, n. 3, p. 473-484, 2014.

NASCIMENTO, F. A. F.; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MIRANDA, G. M.; ARCE, J. E. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região Norte de Santa Catarina. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 235-242, 2015.

NEWBERRY, J.; BURKHART, H. E. Variable-form stem profile models for Loblolly Pine. **Canadian Journal of Forest Research**, v.16, n.1, p.109–114, 1986.

NICHOLAS, I. **Best Practice with Farm Forestry Timber Species – Nº 1: Cypress**. Wellington: New Zealand Farm Forestry Association, 2006. 88 p.

NICOLETTI, M. F. **Modelagem não linear mista e método bivariado para sortimento da produção de *Pinus taeda* L.** 2017. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR, 2017.

NICOLETTI, M. F.; FLEITH, S.; PERÃO, M.; ENGEL, M. L.; NOVACK, N. **Modelagem do perfil do tronco em *Pinus taeda* L. em diferentes idades e submetidos à desbastes**. 2017. 53 f. Relatório técnico, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Lages-SC, 2017.

NYLAND, R. D. The shelterwood method: adapting to diverse management objectives. **Journal of Forestry**, v. 108, n. 8, p. 419-420, 2010.

O'HARA, K. L. **Multiaged silviculture**. Oxford: Oxford University Press, 2014. 213 p.

OKINO, E. Y. A.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. S.; MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; SOUZA, M. R.; TEIXEIRA, D. E.; SOUSA, M. E. Technological characterization of *Cupressus* spp. wood. **Floresta e Ambiente**, v. 17, n. 1, p. 1-11, 2010.

ÖRLANDER, G.; KARLSSON, C. Influence of shelterwood density on survival and height increment of *Picea abies* advance growth. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 15, p. 20-29, 2000.

PAGOTTO, M. A.; DeSOTO, L.; CARVALHO, A.; NABAIS, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; RIBEIRO, A.; LISI, C. S. Evaluation of X-ray densitometry to identify tree-ring boundaries of two deciduous species from semi-arid forests in Brazil. **Dendrochronologia**, v. 42, p. 94-103, 2017.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1970. 736 p.

PAQUETTE, A.; BOUCHARD, A.; COGLIASTRO, A. Successful under-planting of red oak and black cherry in early-successional deciduous shelterwoods of North America. **Annals of Forest Science**, v. 63, p. 823-831, 2006.

PARRESOL, B. R.; HOTVEDT, J. E.; CAO, Q. V. A volume and taper prediction system for bald cypress. **Canadian Journal of Forest**, v. 17, p. 250-259, 1987.

PELTOLA, H.; KILPELÄINEN, A.; SAUVALA, K.; RÄISÄNEN, T.; IKONEN, V. P. Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots Pine. **Silva Fennica**, v. 41, n. 3, p. 489 – 505, 2007.

PELTOLA, H.; MIINA, J.; ROUVINEN, I.; KELLOMAKI, S. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots Pine. **Silva Fennica**, v. 36, n. 4, p. 813-825, 2002.

PEÑA-CLAROS, M.; BOOT, R. G. A.; DORADO-LORA, J.; ZONTA, A. Enrichment planting of *Bertholletia excelsa* in secondary forest in the Bolivian Amazon: effect of cutting line width on survival, growth and crown traits. **Forest Ecology and Management**, v. 161, n. 1-3, p. 159-168, 2002.

PERTILLE, C. T.; SANQUETTA, C. R.; NICOLETTI, M. F.; TOPANOTTI, L. R. Volume prediction through form factor and regression models by age class for *Pinus taeda* L. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 3, p. 431-436, 2018.

PETIT-ALDANA, J.; URIBE-VALLE, G.; BRICEÑO, R. M. Comportamiento del ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill.) en la producción de árboles de navidad bajo condiciones de clima alto andino, Venezuela. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v. 16, n. 1, p. 13-19, 2010.

PITT, D. G.; MORNEAULT, A.; PARKER, W. C.; LANTEIGNE, L.; HOEPTING, M. K.; STINSON, A. Influence of herbaceous and woody competition on white pine regeneration in a uniform shelterwood. **The Forestry Chronicle**, v. 87, n. 5, p. 653-668, 2011.

POLGE, H. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants:

applications dans les domaines technologique et physiologique. **Annales des sciences forestières**, v. 23, n. 1, p. 1-206, 1966.

POLLET, C.; HENIN, J.-M.; HÉBERT, J.; JOUREZ, B. Effect of growth rate on the physical and mechanical properties of Douglas-fir in western Europe. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 47, n. 8, p. 1056-1065, 2017.

PRETZSCH, H. **Forest dynamics, growth and yield**. Munchen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

PRODAN, M. **Holzmesslehre**. Verlag Frankfurt am Main: Sauerlanders, 1965.

PUKKALA, T.; GADOW, K. V. **Continuous cover forestry**. London: Springer, 2 ed., 2012. 297 p.

PUNCHES, J. **Tree growth, forest management and their implications for wood quality**. Pacific Northwest Extension: Oregon State University, 2004. 8 p.

QUEIROZ, D.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; KOEHLER, H. S. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 339-349, 2008.

RACHID, C. C.; MASON, E. G.; WOOLLONS, R.; RESQUIN, F. Volume and taper equations for *P. taeda* (L.) and *E. grandis* (Hill ex. Maiden). **Agrociencia**, v. 18, n. 2, p. 47-60, 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RAMOS, M. G.; SERPA, P. N.; SANTOS, C. B.; FARIAS, J. A. C. **Manual de Silvicultura 1 – cultivo e manejo de florestas plantadas**. Florianópolis: EPAGRI, 2006. 55 p.

RAUSCHKOLB, D. V. **Crescimento de *Cupressus lusitanica* Mill. no Sul de Santa Catarina**. 2017. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Curitibaanos, SC. 2017.

RAYMOND, P.; BÉDARD, S.; ROY, V.; LAROUCHE, C.; TREMBLAY, S. The irregular shelterwood system: review, classification, and potential application to forests affected by partial disturbances. **Journal of Forestry**, v. 398, n. 8, p. 405-413, 2009.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise Econômica e Social de Projetos Florestais**. Viçosa: UFV, 2001. 389 p.

RICHARDS, B. N. Introduction of the rain-forest species *Araucaria cunninghamii* Ait. to a dry sclerophyll forest environment. **Plant and Soil**, v. 27, n. 2, p. 201-216, 1967.

RIOS, P. D.; VIEIRA, H. C.; PEREIRA, G. F.; TURMINA, E.; NICOLETTI, M. F. Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus patula*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-5, 2018.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PELISSARI, A. L. Identidade de modelos hipsométricos e volumétricos de povoamentos de *Pinus* com diferentes idades submetidas ao desbaste mecanizado. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 54-59, 2017.

RODRIGUEZ, D. R. O.; TOMAZELLO-FILHO, M. Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. **New Forests**, v. 50, n. 5, p. 1-23, 2019.

ROJO, A.; PERALES, X.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F.; GONZÁLEZ-ALVAREZ J. G.; Von GADOW, K. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). **European Journal of Forest Research**, v.124, n.3, p.177-186, 2005.

ROQUE, R. M.; ACOSTA, F. M.; GARITA, C. S.; JIMÉNEZ, A. B.; ZÚÑIGA, L. L.; SEGURA, E. E. Tecnologia de madeira de plantaciones forestales: fichas técnicas. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 7, n. 18-19, p. 1-208, 2010.

ROSOT, M. A. D. **Estudo comparativo de métodos para a avaliação volumétrica por unidade de área em um povoamento de *Pinus taeda***. 1989. 183 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR, 1989.

SCHNEIDER, P. R.; COELHO, M. C. B.; ZANON, M. L.; FINGER, C. A. G.; KLEIN, J. E. M. Equações de volume para *Eucalyptus dunnii* Maiden determinadas para a depressão central do estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 27, n. 3, p.425-428, 1997.

SCHNEIDER, P. R. **Manejo Florestal: Planejamento da Produção Florestal**. Santa Maria: UFSM, 2004. 493 p.

SCHÖEPFER, W. **Autimatisierung des Massen, Sorten and Wertberechnung stenender Waaldbestande Schriftenreihe Bad.** [S.I.]: Wurttt-Forstl., 1966.

SCHULTZ, R. P. **Loblolly pine: the ecology and culture of loblolly pine (*Pinus taeda* L.)**. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1997. 493 p.

SCHULZE, M. Technical and financial analysis of enrichment planting in logging gaps as a potential component of forest management in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 3-4, p. 866-879, 2008.

SCHÜTZ, J. Close-to-nature silviculture: is this concept compatible with species diversity? **Forestry**, v. 72, n. 4, p.359-366, 1999.

SCOLFORO, J. R. S.; ACERBI Jr., F. W.; OLIVEIRA, A. D.; MAESTRI, R. Simulação e avaliação economica de regimes de desbastes e desrama para obter madeira livre de *Pinus taeda* livre de nós. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, p. 121-139, 2001.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 438 p.

SHIMIZU, J. Y.; PINTO JR, J. E.; RIBATSKI, G. Cipreste para madeira: alto incremento volumétrico com material genético apropriado. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 30/31, p. 3-17, 1995.

SHIMIZU, J. Y.; RIBAS Jr., U.; CANCELA, K. C.; MAIOCHI, R. A. **Cedrinho como alternativa para produção de madeira em pequenas propriedades rurais**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2006. 3 p.

SHIMIZU, J. Y.; SEBBENN, A. M. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. In: SHIMIZU, J. Y. (Ed). **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2008. 223 p.

SILVA, F. R. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* L. f. em um plantio no município de Alta Floresta – MT**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT, Cuiabá, MT, 2012.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VET) e Valor Esperado da Terra (VET). **Revista Árvore**, v. 29, n. 6, p. 931-936, 2005.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. **Economia Florestal**. Viçosa: UFV, 2005. 178 p.

SILVA, M. L.; RIBEIRO, C. A. A. S. Estabelecimento de rotação econômica para uma floresta regulada. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 65-73, 2006.

SIMPSON, J.; OSBORNE, D. Performance of seven hardwood species underplanted to *Pinus elliottii* in south-east Queensland. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2-3, p. 303-308, 2006.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. Viçosa: UFV, 2011. 272 p.

SOUSA, R. C.; GIOVANNI, E. P.; LIMA, I. L.; FLORSHEIM, S. M. B.; GARCIA, J. N. Efeito da idade e da posição radial na densidade básica e dimensões dos traqueídeos da madeira de *Pinus taeda* L. **Revista Instituto Florestal**, v. 19, n. 2, p. 119-127, 2007.

SOUZA, C. A. M.; CHASSOT, T.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D. Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. **Ciência Rural**, v. 38, n. 9, p. 2506-2511, 2008.

SOUZA, C. A. M.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; MULLER, I. Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. baseados em pontos de mudança de forma. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 4, p. 1239-1246, 2016.

SOUZA, C. A. M. **Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação**. 2009. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

SOUZA, E. B. P.; STEPKA, T. F.; HESS, A. F.; BORSOI, G. A.; HOFFMANN, D.; VENTURINI, V. C. Modelagem do crescimento e da produção de espécies alternativas na silvicultura regional do planalto serrano de Santa Catarina. In: IV Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal, 2018, Santa Maria-RS. **Anais...** Santa Maria, UFSM, 2018, p. 401-406.



STRAND, M.; LOFVENIUS, M. O.; BERGSTEN, U.; LUNDMARK, T.; ROSVALL, O. Height growth of planted conifer seedlings in relation to solar radiation and position in Scots pine shelterwood. **Forest Ecology and Management**, v. 224, n. 3, p. 258-265, 2006.

TASSISSA, G.; BURKHART, H. E. Juvenile-mature wood demarcation in Loblolly Pine trees. **Wood and Fiber Science**, v. 30, n. 2, p. 119-127, 1998.

TASSISSA, G.; BURKHART, H. E. Modeling thinning effects on ring width distribution in loblolly pine (*Pinus taeda*). **Canadian Journal of Forest Research**, v. 27, n. 8, p. 1291-1301, 1997.

TESHOME, T. A ratio method for predicting stem merchantable volume and associated taper equations for *Cupressus lusitanica* in Ethiopia. **Forest Ecology and Management**, v. 204, n. 2-3, p. 171-179, 2005.

TESHOME, T.; PETTY, J. A. Site index equation for *Cupressus lusitanica* stands in Munessa forest, Ethiopia. **Forest Ecology and Management**, v. 126, n. 3, p. 339-347, 2000.

THAM, A. Crop plans and yield predictions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and birch (*Betula pendula* Roth & *Betula pubescens* Ehrh.) mixtures. **Studia Forestalia Suecica**, n. 195, 1994.

TOMAZELLO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BALLARIN, A. W.; BENJAMIN, C. A. Application of x-ray technique in non-destructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas, Ciencia y Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 139-150, 2008.

TSCHINKEL, H. Factores limitantes del crecimiento de plantaciones de *Cupressus lusitanica* em Antioquia, Colombia. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, v. 27, n. 2, p. 3-55, 1972.

TSEGA, M.; GUADIE, A.; TEFFERA, Z. L.; BELAYNEH, Y.; NIU, D. Development and validation of a stem volume equation for *Cupressus lusitanica* in Gerged Forest, Ethiopia. **Southern Forests**, v. 81, n. 1, p. 79-84, 2019.

VALKONEN, S.; RUUSKA, J.; SIIPILEHTO, J. Effect of retained trees on the development of young Scots pine in Southern Finland. **Forest Ecology and Management**, v. 166, n. 1-3, p. 227-243, 2002.

VENTURINI, V. C.; STEPKA, T. F.; HOFFMANN, D.; SOUZA, E. B. P.; HESS, A. F.; BORSOI, G. A. Classificação da capacidade produtiva de espécies alternativas à silvicultura

regional do Planalto Serrano de Santa Catarina. In: IV Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal, 2018, Santa Maria-RS, 2018. **Anais...** Santa Maria, UFSM, 2018, p. 133-137.

VENTUROLI, F. ; FAGG, C. W.; FELFILI, J. M. Desenvolvimento inicial de *Dypteryx alata* Vogel e *Myracrodruon urundeuva* Allemão em plantio de enriquecimento de uma floresta estacional semidecídua secundária. **Biosci. J.**, v. 27, n. 3, p. 482-493, 2011.

VIDAURRE, G.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.

VINCENT, M. KRAUSE, C.; KOUBAA, A. Variation in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) wood quality after thinning. **Annals of Forest Science**, v. 68, p. 1115-1125, 2011.

VITALE, V.; MIRANDA, G. M. Análise comparativa da viabilidade econômica de plantios de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* na região Centro-Sul do Paraná. **Floresta**, v. 40, n. 3, p. 469-476, 2010.

WATT, M. S.; PALMER, D. J.; DUNGEY, H.; KIMBERLEY, M. O. Predicting the spatial distribution of *Cupressus lusitanica* productivity in New Zealand. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 1, p. 217-223, 2009.

WATT, M.S.; CLINTON, P.W.; COKER, G.; DAVIS, M.R.; SIMCOCK, R.; PARFITT, R.L.; DANDO, J. Modelling the influence of environment and stand characteristics on basic density and modulus of elasticity for young *Pinus radiata* and *Cupressus lusitanica*. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 1, p.1023-1033, 2008.

WEHR, N. J.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, através da microdensitometria de raios x. **Scientia Forestalis**, n. 58, p. 161-170, 2000.

YOSHITANI Jr, M.; NAKAJIMA, N. Y.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A.; DRUSZCZ, J. P.; HOSOKAWA, R. T.; MELLO, A. A. Funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 169-176, 2012.

ZHAO, J.; MATSUNAGA, Y.; FUJITA, K.; SAKAI, K. Signal transduction and metabolic flux of  $\beta$ -thujaplicin and monoterpene biosynthesis in elicited *Cupressus lusitanica* cell cultures. **Metabolic engineering**, v. 8, n. 1, p. 14-29, 2006.

ZOBEL, B. J.; SPRAGUE, J. R. **Juvenile wood in forest trees**. New York: Springer, 1998.

## APÊNDICES

Tabela 22 – Posições (m) de retirada dos discos das árvores de *Pinus taeda* para análise do crescimento.

| Árv | d    | ht   | v      | Discos ( $h_i$ ) |     |     |      |      |      |
|-----|------|------|--------|------------------|-----|-----|------|------|------|
|     |      |      |        | 1                | 2   | 3   | 4    | 5    | 6    |
| 1   | 58,8 | 30,0 | 4,0055 | 0,1              | 1,3 | 7,5 | 15,0 | -    | 22,5 |
| 2   | 45,3 | 25,4 | 2,0173 | 0,1              | 1,3 | 6,4 | 12,7 | -    | 19,1 |
| 3   | 53,7 | 31,0 | 3,1938 | 0,1              | 1,3 | 7,8 | 15,5 | -    | 23,3 |
| 4   | 58,5 | 27,0 | 3,2902 | 0,1              | 1,3 | 6,8 | 13,5 | -    | 20,3 |
| 5   | 64,6 | 29,2 | 4,4126 | 0,1              | 1,3 | 7,3 | 14,6 | -    | 21,9 |
| 6   | 45,1 | 28,0 | 2,1827 | 0,1              | 1,3 | 7,0 | 14,0 | -    | 21,0 |
| 7   | 53,3 | 30,3 | 3,2273 | 0,1              | 1,3 | 7,6 | 15,2 | -    | 22,7 |
| 8   | 57,8 | 31,2 | 4,2205 | 0,1              | 1,3 | 7,8 | 15,6 | -    | 23,4 |
| 9   | 58,2 | 30,5 | 2,8987 | 0,1              | 1,3 | 7,6 | 15,3 | -    | 22,9 |
| 10  | 49,3 | 27,8 | 2,7867 | 0,1              | 1,3 | 7,0 | 13,9 | -    | 20,9 |
| 11  | 71,6 | 30,4 | 5,4446 | 0,1              | 2,4 | 6,8 | 11,6 | 16,9 | 21,6 |
| 12  | 65,9 | 29,9 | 4,2478 | 0,1              | 2,5 | 6,8 | 11,2 | 16,5 | 21,2 |
| 13  | 64,0 | 30,3 | 4,6252 | 0,1              | 2,4 | 6,8 | 12,1 | 17,3 | 22,1 |
| 14  | 85,3 | 29,0 | 6,0012 | 0,7              | 2,9 | 7,3 | 12,6 | 17,8 | 22,1 |
| 15  | 55,6 | 29,5 | 3,4528 | 0,1              | 2,5 | 7,3 | 12,6 | -    | 21,6 |

Nota: Árv = número da árvore; d = diâmetro a altura do peito (cm); ht = altura total (m);  $h_i$  = altura onde foram retirados os discos (m); v = volume individual com casca ( $m^3 \text{ arv}^{-1}$ ). Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Tabela 23 – Posições (m) de retirada dos discos das árvores de *Pinus taeda* para reconstrução dos diâmetros aos 23 anos de idade.

| Árv | d    | ht   | v      | Discos ( $h_i$ ) |     |     |      |      |
|-----|------|------|--------|------------------|-----|-----|------|------|
|     |      |      |        | 1                | 2   | 3   | 4    | 5    |
| 1   | 58,8 | 30,0 | 4,0055 | 0,1              | 1,3 | 7,5 | 15,0 | 22,5 |
| 2   | 45,3 | 25,4 | 2,0173 | 0,1              | 1,3 | 6,4 | 12,7 | 19,1 |
| 3   | 53,7 | 31,0 | 3,1938 | 0,1              | 1,3 | 7,8 | 15,5 | 23,3 |
| 4   | 58,5 | 27,0 | 3,2902 | 0,1              | 1,3 | 6,8 | 13,5 | 20,3 |
| 5   | 64,6 | 29,2 | 4,4126 | 0,1              | 1,3 | 7,3 | 14,6 | 21,9 |
| 6   | 45,1 | 28,0 | 2,1827 | 0,1              | 1,3 | 7,0 | 14,0 | 21,0 |
| 7   | 53,3 | 30,3 | 3,2273 | 0,1              | 1,3 | 7,6 | 15,2 | 22,7 |
| 8   | 57,8 | 31,2 | 4,2205 | 0,1              | 1,3 | 7,8 | 15,6 | 23,4 |
| 9   | 58,2 | 30,5 | 2,8987 | 0,1              | 1,3 | 7,6 | 15,3 | 22,9 |
| 10  | 49,3 | 27,8 | 2,7867 | 0,1              | 1,3 | 7,0 | 13,9 | 20,9 |

Nota: Árv = número da árvore; d = diâmetro a altura do peito (cm); ht = altura total (m);  $h_i$  = altura onde foram retirados os discos (m); v = volume individual com casca ( $m^3 \text{ arv}^{-1}$ ). Fonte: Elaborado pela autora, 2020.