**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Captura e alocação de carbono em *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var.
hondurensis sob manejos hídricos e nutricionais distintos**

Isabel Deliberali

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2015**

Isabel Deliberali
Engenheira Florestal

**Captura e alocação de carbono em *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*
sob manejos hídricos e nutricionais distintos**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LUIZ STAPE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Deliberali, Isabel

Captura e alocação de carbono em *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* sob manejos hídricos e nutricionais distintos / Isabel Deliberali. - - Piracicaba, 2015.
108 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Pinus 2. Balanço de carbono 3. Partição de carbono 4. Produtividade primária bruta
5. Respiração do solo I. Título

CDD 634.9751
D353c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*Aos meus pais, Maria da Penha B. J. Deliberali e Reginaldo Deliberali,
por serem meus exemplos de amor e perseverança, por acreditarem
em mim e me ensinarem as mais valiosas lições dessa vida.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Luiz Stape, pela orientação, pela confiança, pelas oportunidades desde a graduação e pelos grandes aprendizados nessa jornada.

Ao pesquisador Michael Ryan USDA Forest Service, por toda a contribuição neste trabalho, desde a parte metodológica até os resultados.

Ao meu querido irmão Mateus Deliberali, que nunca deixou faltar risadas, parceria e boas conversas.

Ao Marcel F. Oliveira, por toda a paciência, incentivo, bons momentos e amor. Sem sua companhia teria sido muito mais difícil.

Ao engenheiro Rildo Moreira e Moreira e ao Lourival Fermiano, pela disposição em ajudar e facilitar o trabalho em campo.

À Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, pela infraestrutura fornecida, e aos queridos funcionários que lá trabalham, em especial ao Antônio Leite de Moraes – “Toninho”, Elaine Casonato, Dona “Lena”, Dona “Marina” e Estevão Araújo, pela ajuda e por me fazerem sentir em casa quando estava lá.

Ao Éder Araújo da Silva e a equipe Floragro, pela ajuda em campo.

Às grandes amigas e parceiras de trabalho, Rafaela Carneiro e Juliana Munhoz, pela paciência, dedicação, orientação, ensinamentos e pela grande amizade.

Aos amigos da vida, da graduação e pós-graduação, Mayra Tavares, Alessandra Rigotto, Frederico Miranda, Eduardo Mattos, Estela Foltran, Frederico Domene, Marina Montó, Rebeca Lima, Antônio Leite, Taynara Antoniolli e João Colossale, pelos bons momentos e por todo o apoio.

Aos professores Pedro Brancalion e Edson Vidal, por terem aberto as portas do laboratório de Silvicultura Tropical para que eu pudesse trabalhar, e em especial aos colegas Denise, Luciana, Ricardo e Marina pela ótima companhia.

Ao Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF) pela oportunidade e suporte na realização deste trabalho.

Ao Projeto Produtividade Potencial do Pinus no Brasil (PPPIB) e as empresas associadas, pela confiança e pela oportunidade de aprendizado.

Aos alunos do Grupo Florestal Monte Olimpo (GFMO), especialmente aos estagiários do PPPIB Lucas Bosso, Rafaela Pavani, André Mendonça, Jenifer

Miyagawa por toda sua dedicação e ajuda na execução deste e de tantos outros trabalhos.

Aos pesquisadores Otávio Campoe e Clayton Alvares, pelas orientações, paciência e ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq pela bolsa concedida durante a realização desta etapa acadêmica.

Ao Marcelo Côrrea Alves e a SIESALQ pela ajuda com as análises estatísticas.

À minha segunda família, República Saia-Justa, por toda a amizade, apoio e infinitas risadas. Conviver com vocês foi um presente.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESENVOLVIMENTO	23
2.1 Aspectos gerais sobre o <i>Pinus spp.</i>	23
2.2 Ciclo global do carbono.....	25
2.3 Componentes do balanço de carbono em ecossistemas florestais.....	26
2.4 Balanço de carbono em florestas de Pinus	29
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 Localização e caracterização da área experimental	33
3.2 Delineamento experimental.....	35
3.3 Variáveis climáticas.....	36
3.4 Medições dendrométricas	37
3.5 Amostragem destrutiva da parte aérea e radicular	38
3.5.1 Método direto de determinação do índice de área foliar	40
3.5.2 Método indireto de determinação do índice de área de vegetação	41
3.5.3 Calibração do método indireto	43
3.6 Determinação do Balanço de Carbono	43
3.6.1 Biomassa e Produtividade Primária Líquida da Parte Aérea (ANPP)	44
3.6.2 Respiração da Parte Aérea (R_a)	44
3.6.3 Fluxo de carbono para o solo (TBCF).....	45
3.6.4 Produtividade líquida do ecossistema (NEP).....	48
3.7 Análise Estatística	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 Variáveis climáticas.....	51
4.2 Desenvolvimento da floresta	55
4.2.1 Modelos alométricos de volume e biomassa	55
4.2.2 Crescimento e produtividade	57
4.2.3 Área foliar específica e índice de área foliar	61
4.3 Estoques de carbono	64
4.4 Balanço de carbono	68
4.4.1 Produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP)	68
4.4.2 Fluxo de carbono para o solo (TBCF).....	74

4.4.3	Produtividade primária bruta (GPP) e partição de carbono.....	84
4.4.4	Produtividade líquida do ecossistema (NEP)	87
5	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS	93
	APÊNDICES	105

RESUMO

Captura e alocação de carbono em *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* sob manejos hídricos e nutricionais distintos

O gênero *Pinus* ocupa no Brasil uma área plantada de 1,59 milhão de hectares e tem uma ampla faixa de produtividade florestal (18 a $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), em função das espécies utilizadas, das limitações edáficas, dos tipos de clima, melhoramento genético e, e alguns casos, pela ocorrência de pragas e doenças. Apesar do conhecimento de que o aumento da disponibilidade de recursos naturais (luz, água e nutrientes) eleva a produção de madeira, faz-se necessário compreender como estes recursos influenciam os processos de captura (produção primária bruta ou GPP) e alocação de carbono (C) para os diferentes compartimentos da floresta (raiz, lenho, galhos e folhas). Além disso, o grau de controle genético é de grande importância nesses processos e também deve ser analisado. Assim, este projeto objetivou quantificar as taxas de captura e alocação de carbono em uma espécie de *Pinus* tropical (*P. caribaea* var. *hondurensis*) e em uma subtropical (*P. taeda*), dos 6,5 aos 8,5 anos de idade, em parcelas controle (sem fertilização e sem irrigação) e parcelas fertilizadas e irrigadas. O experimento está localizado no município de Itatinga – SP e se utilizou o método do balanço de carbono para estimar a produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP), o fluxo de carbono para o solo (TBCF), produtividade primária bruta (GPP) e produtividade líquida do ecossistema (NEP). Ao final do estudo, a biomassa do tronco foi 75% superior no *P. caribaea* var. *hondurensis* (126 Mg ha^{-1}) do que no *P. taeda* (72 Mg ha^{-1}), sendo que em ambas as espécies houveram ganhos significativos com a fertilização e irrigação. O primeiro ano avaliado foi mais seco do que o segundo (1195 contra 1487 mm), resultando em diferenças nos fluxos calculados. A produção de tronco do *P. caribaea* var. *hondurensis* variou de 722 a $1569 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, enquanto do *P. taeda* foi de 221 a $452 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. A espécie subtropical obteve os maiores valores de TBCF, variando de 1150 a $2197 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, e para as duas espécies se encontrou relação do TBCF com a ANPP e GPP. Assim, encontrou-se que a maior produtividade da espécie tropical é resultado de seu maior GPP (4964 contra $3744 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no *P. taeda*), maior partição de carbono para incremento de tronco (22% contra 9% no *P. taeda*) e menor partição para TBCF (23% contra 45% no *P. taeda*). Já a fertilização e irrigação não mudaram a partição da GPP para a ANPP e TBCF comparado ao tratamento controle, e o ganho em produção de madeira foi explicado apenas pelo aumento na GPP (11%). A NEP para ambas as espécies foi positiva, mostrando que essas espécies estão atuando como drenos de carbono. Assim, o conhecimento de como a captura e alocação de C é afetada pela espécie, água e nutrição terá aplicação sobre o manejo florestal, além de propiciar valores de fluxos essenciais para a calibração de modelos ecofisiológicos de produção, ainda inexistentes para essas espécies no Brasil.

Palavras-chave: *Pinus*; Balanço de carbono; Partição de carbono; Produtividade primária bruta; Respiração do solo

ABSTRACT

Carbon sequestration and allocation in *Pinus taeda* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* under distinct hidric and nutritional regimes

The genus *Pinus* in Brazil has a planted area of 1.59 million hectares and it has a wide range of forest productivity ($18\text{--}45\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$) depending on the species, edaphic limitations, climate, breeding and, in some cases, the occurrence of pests and diseases. Despite knowing that the increased resources availability (light, water and nutrients) improves the production of wood, it is necessary to understand how these features influence the uptake processes (gross primary production or GPP) and carbon allocation (C) on the different forest compartments (root, bole, branch and leaf). Furthermore, the degree of genetic control is rather important in these processes and should also be analyzed. Thus, this project aimed to quantify carbon sequestration and allocation rates in a tropical pine (*P. caribaea* var. *hondurensis*) and a subtropical one (*P. taeda*), from ages 6.5 to 8.5 years old, in control plots (no fertilization and no irrigation) and fertilized and irrigated plots. The experimental site is located in Itatinga– SP and the carbon balance approach was used to estimate the above ground net primary production (ANPP), total belowground carbon flux (TBCF), gross primary production (GPP) and net ecosystem production (NEP). At the end of the study, the bole biomass was 75% higher in the *P. caribaea* var. *hondurensis* (126 Mg ha^{-1}) than in *P. taeda* (72 Mg ha^{-1}), and in both species there were substantial improvements with fertilization and irrigation. The first year evaluated was drier than the second (from 1195 to 1487 mm), resulting in differences in the calculated fluxes. The *P. caribaea* var. *hondurensis* bole production ranged from 722 to $1569\text{ gC m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$, while the *P. taeda* showed values from 221 to $452\text{ gC m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$. The subtropical specie obtained the largest values of TBCF (from 1150 to $2197\text{ gC m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$), and on both species there was relationship between TBCF and ANPP and GPP. Thus, the higher productivity of tropical specie is a result of higher GPP (4964 versus $3744\text{ gC m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$ in the *P. taeda*), increased carbon partitioning to bole increment (22% versus 9% in the *P. taeda*) and smaller partitioning for TBCF (23% versus 45% in the *P. taeda*). Fertilization and irrigation have not changed the partitioning from GPP to ANPP and TBCF compared to the control plots, and increase in the production of wood it has been explained only by increased GPP (11%). The NEP for both species was positive, showing that these species are acting as carbon sinks. Therefore, the knowledge of how the carbon sequestration and allocation is affected by the species, water and nutrition will have application on forest management, besides providing values of essential fluxes for calibration of ecophysiological production models, still non-existent for these species in Brazil.

Keywords: *Pinus*; Carbon budget; Carbon partitioning; Gross primary production; Soil respiration

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Classificação climática, segundo Köppen – Geiger, para todas as áreas do PPPIB, destacando-se em vermelho o município de Itatinga/SP (Relatório..., 2015). Modificado de Alvares et al. (2013).....33
- Figura 2 - Precipitação pluviométrica e temperatura média normais do município de Itatinga-SP obtidos de série histórica do período de 1950 a 199034
- Figura 3 - À esquerda, paisagem em campo dos compartimentos da parte aérea das árvores selecionadas. À direita, amostragem destrutiva de raízes grossas (>10mm)39
- Figura 4 - Imagem dos fascículos do *P. caribaea* var. *hondurensis* escaneados (a) e imagem gerada após sua análise digital pelo programa *ImageJ* (b)41
- Figura 5 – À esquerda, calibração dos aparelhos LAI2000 em área aberta para medição indireta do índice de área foliar. À direita, croqui esquemático da parcela útil, onde os círculos representam as árvores e as cruzes os 21 pontos de medição com o aparelho sob o dossel.....42
- Figura 6 - Desenho esquemático das posições de instalação dos coletores de folheto (a) e do fluxo de CO₂ do solo e serapilheira acumulada sobre o solo (b). Cada posição numerada foi alocada em diferentes árvores dentro de cada parcela46
- Figura 7- Coletor de folheto devidamente instalado e medidor de fluxo de CO₂ do solo com sua câmara sobre o anel de PVC (esquerda). Quadro amostral (0,25 m²) para coleta anual de serapilheira acumulada (direita).....47
- Figura 8 – Valores mensais de precipitação (a), diários de temperatura média (°C) (b), umidade relativa do ar (%) (c), déficit de pressão de vapor (kPa) (d) e radiação fotossinteticamente ativa (MJ m⁻²) (e), medidos pela Estação Meteorológica automatizada localizada na área de estudo, no período de Junho de 2013 a Maio de 201553
- Figura 9 - Balanço hídrico sequencial no período estudado para capacidade de armazenamento de água de 230 mm (a). Balanço hídrico sequencial para as parcelas irrigadas, sendo que a flecha indica o final do funcionamento do sistema (b).....54
- Figura 10 - Estimativa mensal do armazenamento de água no solo (2m de profundidade) para as parcelas irrigadas e para as que receberam apenas água da chuva, sendo que o sistema de irrigação ficou em operação até Maio de 2014.....55
- Figura 11 - Volume e biomassa seca dos componentes da árvore em relação ao seu DAP e altura total para o *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e para o *P. taeda* (PTA), aos 7,1 anos de idade56
- Figura 12 - Incremento corrente anual (ICA) da biomassa do tronco, de 4,2 a 8,1 anos de idade nos tratamentos *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN) e *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN). As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$)59
- Figura 13 - Incremento médio anual (IMA) da biomassa do tronco, dos 3,2 a 8,1 anos de idade nos tratamentos *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN), e *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN). As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$).

- Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$)..... 60
- Figura 14 - Equação para estimativa da área foliar total da árvore (AF) em função do diâmetro a altura do peito (DAP). PTA = *P. taeda*; PCH = *P. caribaea* var. *hondurensis* 62
- Figura 15 – Equação para calibração dos dados de índice de área foliar (IAF) estimado pelo método direto (IAF real) pelo indireto (IAF LAI2000), para o *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e para o *P. taeda* (PTA). R^2 é o coeficiente de determinação da equação linear; RMSE é a raiz do erro quadrático médio ($m^2 m^{-2}$) e n é o número de observações..... 63
- Figura 16 - Índice de área foliar (IAF) medido ao longo do período de estudo para as espécies *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e *P. taeda* (PTA), fertilizado e irrigado (FI) ou sem nenhum manejo (SN). As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$)..... 64
- Figura 17 – Proporção de biomassa (%), aos 8,4 anos de idade, nas acículas, galhos, casca, lenho e raízes grossas (>10 mm) no *P. caribaea* var. *hondurensis* sem nenhum manejo (PCH SN), fertilizado e irrigado (PCH FI) e no *P. taeda* sem nenhum manejo (PTA SN) e fertilizada e irrigada (PTA FI)..... 67
- Figura 18 - Componentes da produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP) para o *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN) e para o *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN), nos dois anos avaliados. As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$). Produtividade primária líquida da Cf = acícula, do Cbr = galho, da Cba = casca e do Cw = lenho 69
- Figura 19 - Produtividade primária líquida do tronco em relação à produtividade primária bruta ou fotossíntese anual (GPP) (a) e partição de carbono para o tronco em relação à GPP (b) 72
- Figura 20 - Componentes usados no cálculo do fluxo de carbono para o solo (TBCF) nos tratamentos com *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN), e no *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN). Fs = Fluxo de CO_2 do solo; Fa = deposição de folheto; Δ diferença anual no carbono estocado nos compartimentos do solo. Ano 1 = Junho de 2013 a Maio de 2014; Ano 2 = Junho de 2014 a Maio de 2015 74
- Figura 21 - Valores médios do fluxo de CO_2 do solo para cada posição de coleta (1 – na linha de plantio; 2 – transição entre a linha e entrelinha; 3 – entrelinha) nos 4 tratamentos em estudo (PCH – *P. caribaea* var. *hondurensis*; PTA – *P. taeda*; FI – fertilizado e irrigado; SN – controle). As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$) 75
- Figura 22 - Fluxo de CO_2 do solo medido quinzenalmente, durante o período de 2 anos (Junho de 2013 a Maio de 2015), em resposta ao *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN), e ao *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN) 76
- Figura 23 – Relação entre o fluxo de CO_2 do solo e a produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP) (a) e entre a produtividade primária bruta (GPP) (b) para todas as parcelas nos dois anos avaliados..... 79
- Figura 24 – Queda de folheto (acículas e material lenhoso) mensal, no Ano 1 (Junho 2013 a Maio 2014) e no Ano 2 (Junho 2014 a Maio 2015), para os tratamentos *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI),

	controle (PCH SN), <i>P. taeda</i> fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN)	81
Figura 25	- Relação entre o fluxo de carbono enviado para o solo (TBCF) e a produtividade primária bruta (GPP) (a) e relação entre a partição do TBCF (TBCF:GPP) pela ANPP (b), para todas as parcelas nos dois anos avaliados	83
Figura 26	- Produtividade primária bruta (GPP) e seus constituintes, sendo eles produtividade primária líquida (ANPP) da madeira e das acículas, respiração da parte aérea da floresta (Ra) e fluxo de carbono para o solo (TBCF), nos dois anos de avaliação. PCH FI = <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> fertilizado e irrigado; PCH SN = <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> controle; PTA FI = <i>P. taeda</i> fertilizado e irrigado; PTA SN = <i>P. taeda</i> controle.....	85
Figura 27	- Componentes da produtividade líquida do ecossistema para os tratamentos com <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (PCH), <i>P. taeda</i> (PTA), fertilizado e irrigado (FI) e sem manejo (SN). Cr, Cl, ANPP madeira, ANPP acícula e Ct são a mudança no carbono estocado na biomassa de raiz, na serapilheira, na biomassa de madeira (lenho, casca e galho), biomassa de acícula e de tocos da rotação anterior, respectivamente.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais atributos químicos e físicos das parcelas em estudo até 450 cm de profundidade.....	35
Tabela 2 - Equações alométricas finais de biomassa seca ($\text{kg } \text{árv}^{-1}$) e volume ($\text{m}^3 \text{árv}^{-1}$) desenvolvidas para o <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (PCH) e para o <i>P. taeda</i> (PTA), com <i>n</i> representando o número de observações; R^2 é o coeficiente de determinação; e RMSE é a raiz do erro quadrático médio ($\text{m}^3 \text{árv}^{-1}$ para o volume, e $\text{kg } \text{árv}^{-1}$ para os demais componentes).....	57
Tabela 3 - Valores médios de sobrevivência das parcelas (Sobrev), diâmetro a altura do peito (DAP), altura total (H), altura dominante (Hdom), área basal (AB), volume (V), biomassa do tronco (Biom. Tronco) e incremento médio anual (IMA) para cada tratamento, aos 6,1 e 8,1 anos de idade.....	57
Tabela 4 - Valores médios da área foliar específica projetada (AFE), da área foliar total (AF) e do índice de área foliar (IAF), aos 7 anos de idade, para os tratamentos de <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> adubado e fertilizado (PCH FI), sem manejo (PCH SN), <i>P. taeda</i> fertilizado e irrigado (PTA FI) e sem manejo (PTA SN)	61
Tabela 5 – Estoque de carbono (Mg C ha^{-1}) para os diferentes compartimentos da floresta para os tratamentos controle (SN) e irrigado e fertilizado (FI) do <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (PCH) e <i>P. taeda</i> (PTA), ao final de cada ano avaliado	65
Tabela 6 – Resultado do teste de Tukey ($p = 0,05$) para as variáveis de produção de lenho, produtividade primária líquida (ANPP) e respiração da parte aérea (Ra). PCH = <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> ; PTA = <i>P. taeda</i> ; FI = fertilizado e irrigado; SN = controle; 1 = Junho 2013 a Maio 2014; 2 = Junho 2014 a Maio 2015.....	68
Tabela 7 - Fluxos de carbono para os tratamentos irrigado e fertilizado (FI) e controle (SN) no <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (PCH) e <i>P. taeda</i> (PTA), nos dois anos avaliados.....	73
Tabela 8 - Médias dos valores de folheto e fluxo de CO_2 do solo (Fs), que segundo a ANOVA (Apêndice B) tiveram interação entre ano avaliado (1 e 2) e espécies estudadas (PCH – <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> e PTA – <i>P. taeda</i>). Valores com letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p = 0,05$). Valores entre parêntesis representam o erro padrão dos dados ($n = 4$)	77
Tabela 9 – Médias das variáveis avaliadas para cada efeito principal (espécie, manejo e ano) que foi significativo pela ANOVA, sem haver interação. Valores dentro de cada efeito principal diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p = 0,05$). Valores entre parêntesis representam o erro padrão dos dados ($n = 4$).....	80
Tabela 10 - Partição de carbono (C) para os tratamentos <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> fertilizado e irrigado (PCH FI), controle (PCH SN), <i>P. taeda</i> fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN), para os dois anos avaliados. Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$).....	86
Tabela 11 - Médias dos valores de produtividade líquida do ecossistema (NEP), que segundo a ANOVA (Apêndice B) teve interação entre espécies (PCH – <i>P. caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> e PTA – <i>P. taeda</i>), ano avaliado (1 e 2) e manejo	

(FI – fertilizado e irrigado; SN – controle). Valores com letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p = 0,05$). Valores entre parêntesis representam o erro padrão dos dados ($n = 4$) 89

1 INTRODUÇÃO

As florestas são importantes meios de subsistência para milhões de pessoas e colaboram com o desenvolvimento da economia nacional de muitos países (KOHL et al., 2015), além de desempenharem um importante papel no balanço de carbono global atuando como reservatórios vitais de carbono, mitigando a concentração de CO₂ na atmosfera (DIXON et al., 1994).

Mundialmente, a área ocupada por florestas plantadas representa aproximadamente 278 milhões de hectares (PAYN et al., 2015), sendo que o Brasil conta com 7,74 milhões de hectares (0,9% de todo o seu território), e deste montante 1,59 milhão de hectares é ocupado por plantios de *Pinus* (IBÁ, 2015).

Hoje, a produtividade média do gênero no Brasil é de 31 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (IBÁ, 2015), porém há grande variação, de 18 a 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (PINTO JÚNIOR et al., 2013), devido à dimensão da área englobada nos plantios que abrangem muitas classes de solos (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2005), tipos de clima (FERREIRA et al., 2001), utilização de espécies (subtropicais e tropicais) aptas a diferentes regiões do país e ao nível de melhoramento genético das plantas (PINTO JÚNIOR et al., 2013).

Buscando entender melhor os fatores que controlam a produtividade do *Pinus*, muitos trabalhos mostraram que o aumento da disponibilidade de recursos hídricos e nutricionais afeta positivamente sua produção de madeira (CAPITANI; SPELTZ; CAMPOS, 1982; ALBAUGH et al., 1998; SAMUELSON et al., 2008; MUNHOZ, 2011; MORO et al., 2014), sendo em alguns casos resultado da redução na alocação de biomassa para as raízes e aumento na alocação para o tronco. Porém, a biomassa é apenas uma parte de todo o carbono assimilado pelas árvores através da fotossíntese (do inglês, *Gross Primary Production* - GPP) (LITTON; RAICH; RYAN, 2007).

Portanto, a produção de madeira em ecossistemas florestais varia consideravelmente com a disponibilidade de recursos (luz, água e nutrientes) e com a espécie utilizada, sendo resultado de inúmeros mecanismos, tais como mudanças na taxa fotossintética e na sua partição para produção de madeira, raízes, folhas ou respiração autotrófica (RYAN et al., 2010).

Um padrão comumente encontrado, tanto com *Pinus* quanto com *Eucalyptus*, é o aumento da GPP e redução de sua partição para as raízes,

aumentando a produção de biomassa da parte aérea, como resultado do aumento da disponibilidade de água e nutrientes (LITTON; RAICH; RYAN, 2007).

Para compreender esses mecanismos que determinam a captura e alocação de carbono e, conseqüentemente a produtividade de madeira, faz-se necessário um estudo completo do balanço de carbono, especialmente em resposta às condições ambientais. Os fluxos e alocação de carbono em ecossistemas florestais têm sido estudados nas últimas décadas, utilizando as metodologias propostas por Raich e Nadelhoffer (1989), Ryan (1991) e Giardina e Ryan (2002), onde a GPP é a soma da produtividade primária líquida da parte aérea (do inglês, *Aboveground Net Primary Production* - ANPP), da respiração autotrófica da parte aérea (Ra) e do fluxo de carbono enviado para a raiz (do inglês, *Total Belowground Carbon Flux* - TBCF). Essa metodologia tem gerado resultados precisos para avaliar efeitos de tratamentos ao nível de parcelas experimentais (RYAN et al., 2010).

Com base nesse método muitos estudos têm sido realizados, resultando no desenvolvimento do conhecimento a respeito dos efeitos do ambiente na alocação de carbono e na produtividade de madeira de florestas de *Eucalyptus* e espécies temperadas de *Pinus* (RYAN et al., 1996, 2010; GIARDINA et al., 2003; MAIER et al., 2004; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008). Dos três componentes da GPP, somente a ANPP tem sido mais frequentemente caracterizada, faltando informações sobre o TBCF (GOWER et al., 1994; CLARK et al., 2001b).

Assim, conhecer como o crescimento da floresta e o armazenamento de carbono do ecossistema respondem às mudanças nas fontes de recursos tem grande importância produtiva e ecológica, pois ajudará a desenvolver recomendações de práticas de manejo (fertilização e zoneamento de áreas de plantio para cada espécie) que venham a aumentar a produtividade das florestas plantadas de *Pinus* no Brasil, além de propiciar valores de fluxos essenciais para calibração de modelos ecofisiológicos de produção (LANDSBERG, 2003).

Em relação às espécies utilizadas em plantios no Brasil, o *Pinus taeda* (subtropical) é a espécie mais plantada no país, se concentrando na Região Sul (HIGA et al., 2008), enquanto o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (espécie tropical) é plantado da região Sudeste até o Nordeste (SILVA JÚNIOR, 1993), apresentando maior produtividade do que a espécie anterior.

Este estudo faz parte da rede experimental Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil (PPPIB), coordenado pelo Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais

(IPEF), e está instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP, em Itatinga – SP, onde o clima é apto para o desenvolvimento do *P. taeda* e do *P. caribaea* var. *hondurensis*. Para avaliar a grande diferença de produtividade entre essas espécies, que a fotossíntese a nível foliar não explicou (CARNEIRO, 2013), e o efeito da disponibilidade de recursos hídricos e nutricionais, o presente trabalho usou um ensaio fatorial com dois níveis de manejo e duas espécies, em um povoamento dos 6,5 aos 8,5 anos de idade, medindo a ANPP e TBCF, para alcançar os seguintes objetivos:

- i) Estimar a captura de carbono (produtividade primária bruta ou GPP) do *P. taeda* e do *P. caribaea* var. *hondurensis* sob manejo mínimo (sem fertilização e sem irrigação) e intensivo (com fertilização e com irrigação);
- ii) Determinar os padrões de alocação da GPP para crescimento do lenho, de galhos, de acículas, uso das raízes e respiração, destas duas espécies quando sob manejo mínimo (sem fertilização e sem irrigação) e intensivo (com fertilização e com irrigação).

Estes dois objetivos, estão atrelados às hipóteses do trabalho, sendo elas:

- i) O *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tem maior GPP, maior TBCF e maior ANPP do que o *Pinus taeda*;
- ii) Diferenças na produção de madeira entre as duas espécies podem ser explicadas pelas suas diferentes estratégias de partição de carbono, sendo que a espécie tropical tem menor partição para a raiz (TBCF:GPP) e maior para o tronco (Tronco NPP:GPP) do que a subtropical;
- iii) Os tratamentos com manejo mais intensivo, dentro de cada espécie, tem maior GPP, maior TBCF e menor partição para a raiz (TBCF:GPP) e maior para a parte aérea (ANPP:GPP) do que o tratamento controle.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Aspectos gerais sobre o *Pinus spp.*

Espécies de *Pinus* foram introduzidas no Brasil pela necessidade de produção de madeira para abastecimento industrial (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005). Com isso, na década de 40 um grande número de espécies de diferentes procedências foi utilizado para experimentação pelas empresas privadas e a partir de 1960, começaram-se os plantios em larga escala nas Regiões Sul e Sudeste com *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* (FREITAS et al., 2005). Devido ao seu rápido crescimento e características adequadas da madeira, o *Pinus* acabou se tornando, também, uma alternativa a falta da madeira da *Araucaria angustifolia*, que sofreu exploração intensiva nessas regiões (SHIMIZU, 2006).

Com a introdução de outras espécies, principalmente oriundas das regiões tropicais, como o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, a produção de madeira de *Pinus* foi viabilizada economicamente em todo o território nacional (PINTO JÚNIOR et al., 2013), resultando em uma área plantada total de 1,59 milhão de hectares, concentrados principalmente na Região Sul (76%) (IBÁ, 2015).

O *P. caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barr. et Golf. é originário da América Central, ocorrendo naturalmente em Belize, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicarágua e México (PERRY, 1991), entre as latitudes 18°N e 12°N. Segundo Kronka, Bertolani e Ponce (2005), o clima destas áreas de ocorrência varia de tropical, com temperatura média anual de 24 °C a 27,2 °C e precipitação média anual de até 3500 mm com curto período de seca, até subtropical, com temperatura média anual entre 20 °C e 24 °C e precipitação média anual de 950 mm com longos períodos de seca. A sensibilidade ao frio é condição limitante para essa espécie, sendo que em seu habitat natural raramente a temperatura mínima alcança 5 °C (SHIMIZU; SEBBEN, 2008).

Dentre as espécies de *Pinus* tropicais, o *P. caribaea* var. *hondurensis* é a mais plantada no mundo (AGUIAR; SOUSA; SHIMIZU, 2013), por sua excelente adaptabilidade e qualidade da madeira. No Brasil, os plantios comerciais desta espécie são recomendados em toda sua região tropical, do norte do Estado de São Paulo até a Amazônia (GOLFARI, 1987), sendo mais plantado na Região Sudeste e Centro-Oeste do país. Sua madeira é de densidade moderada a baixa, mas de

grande utilidade geral, sendo produzida principalmente para serrarias, produção de celulose e extração de resina.

Já a espécie subtropical, *P. taeda*, é proveniente do Sul e Sudeste dos Estados Unidos, abrangendo desde o norte de Delaware (39°N) até a região central da Flórida (28°N) e o leste do Texas (SCHULTZ, 1997). Nestas áreas o clima é temperado úmido, com invernos suaves e verões longos e quentes, sendo a precipitação pluviométrica média anual de 1020 mm a 1520 mm e a temperatura média anual de 13 °C a 24 °C (FOWELLS, 1965). É tolerante a geadas e pode suportar períodos de alagamento do solo (HIGA et al., 2008).

O *P. taeda* é plantado em várias partes do mundo devido a sua versatilidade. Porém, para o estabelecimento de um povoamento produtivo é essencial estar em regiões de clima úmido, com invernos moderados, solos bem drenados e ausência de deficiência hídrica (SHIMIZU; SEBBEN, 2008). Atualmente, é uma das espécies mais plantadas na Região Sul do Brasil, pois além de seu elevado incremento volumétrico mesmo nas regiões mais frias do planalto sulino, apresenta um menor teor de resina em sua madeira, em comparação ao *P. elliottii* (SHIMIZU; HIGA, 1981).

O Brasil é o oitavo país com maior área de florestas plantadas no mundo, embora seja o segundo maior produtor de madeira, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (PAYN et al., 2015), evidenciando a elevada capacidade produtiva de suas florestas. Em 2014, a produtividade média dos plantios de *Pinus* nos Estados Unidos foi de 14 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e no Brasil alcançou 31 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (IBÁ, 2015) devido ao clima favorável, à melhoria das práticas silviculturais e melhoramento genético.

Apesar de a média de produtividade do *Pinus* estar próxima a do *Eucalyptus* no país (39 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), o incremento médio anual (IMA) tem grande amplitude de variação, de 18 a 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005; MUNHOZ, 2011; PINTO JÚNIOR et al., 2013).

Como este gênero é conhecido por sua rapidez de crescimento devido às condições edafoclimáticas do território brasileiro, principalmente durante as primeiras rotações, leva à expectativa de que plantios de *Pinus* não precisam de fertilizações (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2005), resultando em plantios com produtividades aquém do potencial das espécies (SAMUELSON et al., 2010).

Por isso, muitos trabalhos têm apontado para a importância da fertilidade do solo no aumento da produção de madeira e da reposição nutricional para manutenção da sustentabilidade desses plantios (BIZON, 2005; MUNHOZ, 2011; MORO et al., 2014).

2.2 Ciclo global do carbono

O ciclo do carbono é caracterizado como um ciclo biogeoquímico pequeno, quando comparado com outros ciclos como o do nitrogênio, e envolve carbono armazenado em diferentes compartimentos da Terra (estoques ou reservatórios) e movimento de parte desse carbono (fluxos). É muito ativo e dinâmico na atmosfera, além de vulnerável às perturbações produzidas pelo homem, podendo modificar o clima através do efeito estufa (ODUM; BARRETT, 2007).

Os estoques de carbono podem ser divididos em quatro compartimentos principais, classificados como oceânico, geológico, atmosférico e terrestre (D'ANDRÉA, 2004). Os maiores reservatórios são os oceanos, com 40.000 Pg de carbono, e o geológico (combustíveis fósseis), com cerca de 4.000 Pg (DENMAN et al., 2007). No compartimento terrestre, o carbono é armazenado no solo (1.500 Pg) e na biomassa vegetal (610 Pg).

De todo este carbono estocado no solo, aproximadamente 41% (618 Pg) está em solo sob ecossistemas florestais (BROWN, 1996). Já o depósito atmosférico de carbono (750 Pg) é similar em magnitude ao estoque no solo das florestas, sendo muito importante devido ao aumento dos gases do efeito estufa nas últimas décadas.

Dentro do ciclo, além do carbono armazenado, há carbono em constante movimentação nos ecossistemas terrestres, mediado por processos químicos e biológicos (ESWARAN; VAN DEN BERG; REICH, 1993). Os principais fluxos ocorrem entre os componentes atmosférico, oceânico e terrestre (DENMAN et al., 2007; ODUM; BARRET, 2007).

O maior fluxo anual é a fotossíntese (produtividade primária bruta ou GPP), 120 Pg ano^{-1} de carbono, que captura o CO_2 da atmosfera e o transforma em biomassa vegetal. Logo após, tem-se a respiração vegetal somada a do solo que libera $119,6 \text{ Pg ano}^{-1}$ de carbono para a atmosfera. Outro fluxo importante é o

dióxido de carbono constantemente trocado entre os oceanos e a atmosfera, sendo liberados 90 Pg ano^{-1} de carbono e fixado 92 Pg ano^{-1} .

Por último, há o fluxo gerado pelas ações antropogênicas como desmatamento e queima de combustíveis fósseis, que aumentam a cada década, gerando atualmente mais de 8 Pg ano^{-1} de carbono (DENMAN et al., 2007). Em outra perspectiva, emissões de CO_2 geradas por ações humanas alcançaram aproximadamente 535 Pg de carbono entre 1870 – 2013, do qual aproximadamente 30% foi gerado por mudanças no uso da terra (LE QUÉRÉ et al., 2014).

Porém, somente uma porção dessas emissões antropogênicas permanece na atmosfera, devido à atuação dos oceanos e ecossistemas terrestres como importantes reservatórios de CO_2 (KOHL et al., 2015). Estima-se que só os ecossistemas florestais estoquem cerca de $2,1 \text{ Pg C ano}^{-1}$ (FEDERICI et al., 2015) e os oceanos $2,3 \text{ Pg C ano}^{-1}$ (DENMAN et al., 2007).

2.3 Componentes do balanço de carbono em ecossistemas florestais

A alocação de carbono desempenha um papel importante no ciclo de carbono das florestas, através da mudança dos produtos da fotossíntese entre respiração e produção de biomassa, tecidos efêmeros e duradouros, e componentes abaixo e acima do solo (EPRON; NOUVELLON; RYAN, 2012).

Devido à inconsistência de terminologias utilizadas em estudos de alocação de carbono, neste trabalho, para padronização, serão adotados os termos propostos por Litton, Raich e Ryan (2007). Neste caso, a alocação de carbono é considerada um termo geral e abrangente, constituída por três componentes principais, a biomassa, o fluxo e a partição, não devendo ser usada como sinônimo para nenhum deles.

A biomassa representa o montante de massa de algum ou todos os componentes orgânicos dentro de um ecossistema, estando ele vivo ou morto, e é representada em g m^{-2} ou Mg ha^{-1} . O fluxo é a taxa na qual o carbono se move para dentro ou fora de um particular componente do sistema florestal por unidade de área e tempo, em $\text{g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Por último, a partição é o fluxo de carbono para um componente em particular como fração da fotossíntese total (GPP), expressa em porcentagem (%) ou como proporção (variando de 0 – 1, adimensional).

Para estimar o balanço de carbono em ecossistemas florestais existem diferentes métodos, como os modelos ecofisiológicos (LANDSBERG; WARING, 1997), o método das torres de fluxo que utiliza a teoria *eddy covariance* (BALDOCCHI; HINCKS; MEYERS, 1988) e o que calcula todos os principais fluxos da floresta (RYAN, 1991), usado no presente trabalho, sendo que cada um possui suas vantagens e limitações (RYAN et al., 2010).

Para abordar esta metodologia foi considerado o fluxo de carbono dos cinco maiores componentes, em escala anual, sendo eles: produção de folhas e madeira (casca, lenho e galho), respiração das folhas e da madeira e o fluxo total de carbono enviado para o solo (RYAN, 1991; RYAN et al., 2004). A soma desses componentes resulta na produtividade primária bruta anual (GPP ou “*gross primary production*”), ou seja, a quantidade de CO₂ assimilado através da fotossíntese pela vegetação no ecossistema.

A produção de folhas e madeira é também chamada de produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP ou “*aboveground net primary production*”) e é o componente que tem sido mais amplamente caracterizado em diferentes tipos de florestas (GOWER et al., 1994; GOWER; MCMURTRIE; MURTY, 1996; CLARK et al., 2001b) por sua facilidade de mensuração. Clark et al. (2001a) desenvolveu um trabalho onde detalha como se estimar a produtividade primária líquida de ecossistemas florestais, considerando toda a matéria orgânica retida nas plantas vivas e toda a matéria orgânica que foi produzida e perdida durante um intervalo de tempo definido. No geral, os trabalhos com plantios homogêneos de *Eucalyptus* e *Pinus* não têm contabilizado essa matéria orgânica perdida (por lixiviação, herbivoria, etc), pois não foi observada grande representatividade (LITTON; RAICH; RYAN, 2007; RYAN et al., 2010; CAMPOE et al., 2012; NOUVELLON et al., 2012).

As medições da respiração autotrófica (ou Ra) dos componentes folha, galho e tronco podem ser inferidas diretamente ou estimadas razoavelmente com base em relações previamente estabelecidas (SPRUGEL et al., 1995).

Atualmente, para facilitar as estimativas e modelagem, muitos trabalhos de balanço de carbono em florestas plantadas utilizam o conceito de eficiência do uso do carbono (CUE ou “*carbono use efficiency*”) para estimar a Ra (CAMPOE et al., 2012; EPRON et al., 2012; NOUVELLON et al., 2012), onde CUE é a razão entre a produtividade primária líquida (NPP) e a GPP (LANDSBERG; SANDS, 2011).

Tem-se argumentado que CUE é constante (GIFFORD, 1994, 2003; LANDSBERG, 1997) e Waring, Landsberg e Williams (1998), avaliando diferentes tipos de floresta em diferentes sítios, encontraram um valor universal de CUE igual a 0,47, ou seja, a respiração autotrófica dos ecossistemas florestais representam 53% de toda a GPP, porém muito se tem discutido sobre esse assunto. Ryan e Gower (1997) observaram em ecossistemas de floresta boreal que a CUE é conservativa entre sítios, porém diferente entre espécies. Litton, Raich e Ryan (2007) avaliando diversos tipos de florestas pelo mundo, viram que os valores de CUE variam entre locais, porém em um mesmo sítio não variam com mudanças da idade do povoamento e recursos naturais disponíveis. Já na revisão de literatura feita por Delucia et al. (2007), valores de CUE diminuem com o aumento da idade do povoamento, porém para Landsberg e Sands (2011) grande parte da variação encontrada neste estudo pode ter ocorrido pelos diferentes métodos utilizados nos trabalhos para estimar a respiração.

De todo o carbono fixado pela fotossíntese, as plantas enviam uma estimativa de 35 – 80% para baixo do solo para produção de raízes grossas e finas, para respiração e exudação das raízes e para suporte das micorrizas (RAICH; NADELHOFFER, 1989; DAVIDSON et al., 2002; GIARDINA et al., 2003; RYAN et al., 2004).

Com base no conceito de conservação de massa proposto por Raich e Nadelhoffer (1989), onde todo carbono que entra no solo deve sair ou aumentar seu estoque de carbono, Giardina e Ryan (2002) propuseram um método para o cálculo do total de carbono enviado para baixo do solo, também chamado de TBCF ou “*total belowground carbon fluxes*”.

Portanto, o TBCF pode ser estimado pela diferença dos fluxos medidos para fora do sistema solo-serapilheira (fluxo de CO₂ do solo e erosão/lixiviação), pelos fluxos de entrada no sistema solo-serapilheira (folhedo) e pela mudança no carbono estocado pelas raízes grossas e finas, pelo solo, pela serapilheira e pela decomposição de tocos da rotação anterior.

O fluxo de CO₂ do solo, também chamado de respiração do solo, é uma combinação da respiração autotrófica das raízes e micorrizas associadas e da respiração heterotrófica de microorganismos usando exudatos de raízes e material orgânico recente ou antigo como substrato energético (HÖGBERG et al., 2001). A respiração do solo é a principal via de saída do carbono da floresta para a atmosfera

(RYAN; LAW, 2005), representando de 50 a 80% de toda a respiração do ecossistema (GIARDINA; RYAN, 2002).

Este método proposto por Giardina (2002) gera estimativas acuradas da quantidade total de carbono alocada abaixo do solo. Se utilizado em conjunto com tradicionais medições dos fluxos de carbono acima do solo (ANPP e R_a), o TBCF fornece uma excelente oportunidade para avaliar os padrões de alocação de carbono em ecossistemas terrestres de maneira mais completa (LITTON, 2004).

A partir da estimativa dos principais fluxos comentados anteriormente, se pode determinar a função da floresta no ciclo global de carbono (dreno ou fonte de carbono), através da quantificação da produtividade líquida de carbono do ecossistema, ou NEP, entre a floresta e a atmosfera (SCHULZE; WIRTH; HEIMANN, 2000; CHAPIN et al., 2006). Esse fluxo foi originalmente definido por Woodwell e Whittaker (1968) e é estimado pela diferença entre a GPP e a respiração total do ecossistema (soma da respiração autotrófica e heterotrófica).

O tempo que uma floresta leva para deixar de ser fonte de carbono (NEP negativa) para se tornar um dreno (NEP positiva), depende das condições climáticas do local, das diferenças fisiológicas da floresta associada com sua idade e grupo funcional, de heterótrofos do solo, manejo da área e do efeito de perturbações, como queimadas (LAW; THORNTON; IRVINE, 2001). Trabalhos com coníferas pelo mundo mostram variação de poucos anos (MAIER; KRESS, 2000) até décadas (COHEN et al., 1996; SCHULZE; WIRTH; HEIMANN, 2000) para que os valores de NEP se tornem positivos.

2.4 Balanço de carbono em florestas de Pinus

O gênero *Pinus* é o maior e mais importante das coníferas (MARCHIORI, 2005), com grande valor comercial pelo mundo, principalmente na América do Norte (SCHULTZ, 1997). No Brasil, é o segundo gênero florestal mais plantado atualmente (IBÁ, 2015).

Apesar das coníferas ocorrerem em muitos tipos de solo, especialmente os plantios de *Pinus* são mais abundantes em solos pobres (MILLER et al., 1979), inclusive no Brasil, onde apresenta elevadas taxas de crescimento. Assim, tanto em seus lugares de origem quanto em locais onde o *Pinus* é exótico, sua produtividade, muitas vezes, está aquém de seu potencial (SAMUELSON et al., 2010).

Estudos têm sido conduzidos buscando entender os fatores nutricionais e hídricos que limitam o crescimento do gênero (JOKELA; DOUGHERTY; MARTIN, 2004; SAMUELSON et al., 2008), sendo que a produtividade responde à fertilização nos Estados Unidos, com ganhos de mais de 100% (ALBAUGH et al., 1998), e no Brasil, porém com ganhos menores (CAPITANI; SPELTZ; CAMPOS, 1982; BALLONI, 1984; MORO et al., 2014).

Mesmo com menores ganhos, as produtividades no Brasil são superiores as dos plantios nos Estados Unidos (IBÁ, 2015), embora neste último local seja comum a prática de adubação (JOKELA; MARTIN; VOGEL, 2010), diferente do que ocorre em território brasileiro (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2005).

Essa diferença pode ser observada em trabalhos que levantaram os estoques de carbono na biomassa vegetal de florestas de *P. taeda* no Sul do Brasil encontrando, para a idade de 10 a 15 anos sem fertilização, valores de 4,85 a 11,48 kg C m⁻² (SCHUMACHER et al., 2002; BALBINOT et al., 2008). Já no sudeste dos Estados Unidos, região de origem da espécie, aos 12 anos de idade, Maier et al. (2004) relatou valor de 1,57 kg C m⁻² no tratamento controle e de 3,33 kg C m⁻² no fertilizado e irrigado.

De uma maneira geral, sabe-se que a produtividade das florestas varia consideravelmente com a disponibilidade de recursos, sendo resultado de inúmeros mecanismos, tais como aumento ou diminuição na captura de carbono (GPP) e mudanças na sua partição (RYAN et al., 2010). Segundo Gower (2003), existe uma forte evidencia de que quando sob alguma limitação de recurso, as plantas passam a trabalhar de forma diferente para suprirem suas necessidades. Sendo assim, as árvores alocam menos biomassa para a produção de folhas e mais para a produção de raízes finas e micorrizas, com o intuito de aumentar a aquisição de nutrientes ou água em solos inférteis e vice-versa (GOWER; VOGT; GRIER, 1992; GOWER; ISEBRANDS; SHERIFF, 1995).

Em uma extensa revisão de literatura feita por Litton, Raich e Ryan (2007), cita-se GPP em florestas de *Pinus* variando de aproximadamente 700 g C m⁻² ano⁻¹ em ecossistemas boreais, até mais de 5.000 g C m⁻² ano⁻¹ em áreas montanhosas na Nova Zelândia. Para o TBCF e ANPP também encontraram grandes variações, sendo elas de 2.580 a 300 g C m⁻² ano⁻¹ e de 1.600 a 150 g C m⁻² ano⁻¹, respectivamente. Além disso, o que eles notaram é um padrão nesses diversos tipos

de floresta pelo mundo, onde maior disponibilidade de recursos gera menor partição da GPP para o TBCF e maior para a ANPP e, conseqüentemente, para madeira.

Outro padrão encontrado na alocação de carbono em florestas, inclusive em coníferas, é o declínio da ANPP após o fechamento da copa, ou pico do índice de área foliar (GOWER et al., 1994). Gower, McMurtrie e Murty (1996) colocam que a diminuição na disponibilidade de nutrientes em povoamentos mais velhos e aumento da limitação da condutância estomática, diminuindo as taxas fotossintéticas, são os grandes responsáveis pela queda de produtividade em florestas maduras em ambientes frios. Já Ryan, Binkley e Fownes (1997) sugerem que não há padrão consistente de que a disponibilidade nutricional diminui com a idade do povoamento.

Smith e Resh (1999) associaram o declínio na ANPP de *P. contorta* com as mudanças na estrutura do povoamento que ocorreram durante seu desenvolvimento, incluindo queda da área foliar e mudança na alocação de carbono. Um estudo completo foi feito por Ryan et al. (2004) com *Eucalyptus*, chegando a conclusão de que o declínio da ANPP é causada pelo declínio na captura de carbono e pela mudança na partição da GPP para baixo do solo e para respiração das folhas.

Além da disponibilidade de recursos de um sítio, do clima e do estágio de desenvolvimento do povoamento, o grau de controle genético é de grande importância nos processos de captura e alocação de carbono (GOWER et al., 1994).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento em estudo faz parte da rede experimental do Projeto Produtividade Potencial do Pinus no Brasil – PPPIB (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, www.ipef.br/pppib), composto por empresas que possuem ao todo cerca de 300.000 hectares de *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* plantados nos Estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Minas Gerais (Figura 1).

A área de estudo está situada na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI), pertencente à Universidade de São Paulo (USP), localizada no município de Itatinga, região centro-sul do estado de São Paulo (23°05'S e 48°40'W), com altitude média de 860 m. O clima da região, segundo Köppen (Figura 1), é caracterizado como Cfa (ALVARES et al., 2013): subtropical úmido sem estação seca definida e com verão quente. A precipitação média anual é de 1.319 mm, ocorrendo a maior incidência de chuvas no período de outubro a março e não apresenta déficit hídrico no período seco. A temperatura média anual é de 19,4 °C, sendo a média mínima de 15,6 °C no mês de julho e a média máxima de 22,3 °C no mês de janeiro (Figura 2).

Figura 1 - Classificação climática, segundo Köppen – Geiger, para todas as áreas do PPPIB, destacando-se em vermelho o município de Itatinga/SP (Relatório..., 2015). Modificado de Alvares et al. (2013)

Figura 2 - Precipitação pluviométrica e temperatura média normais do município de Itatinga-SP obtidos de série histórica do período de 1950 a 1990

O solo da área é do tipo Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado de textura média arenosa e relevo plano pertencente à formação geológica Marília do Grupo Bauru (GONÇALVES; ALVARES; GONÇALVES, 2012). Este solo é caracterizado de baixa fertilidade natural, apresentando caráter muito ácido ($\text{pH CaCl}_2 < 4$), teores elevados de alumínio e baixa saturação por bases (Tabela 1).

Anteriormente a implantação do experimento, a área foi ocupada por um plantio de *Eucalyptus saligna* durante 18 anos. O plantio da área experimental foi realizado com mudas seminais de *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, em fevereiro de 2007. A procedência do material utilizado foi para o *P. taeda* do Pomar de Sementes de Três Barras-SC (Rigesa), e para o *P. caribaea* var. *hondurensis* do Pomar de Sementes de Agudos-SP (Duratex). O terreno foi preparado através de subsolagem e o espaçamento de plantio foi de 3 metros entre linhas e 2 metros entre plantas na linha, com ausência de adubação de base. Quando necessário, capina manual e aplicações de herbicida foram realizadas na área, a fim de eliminar, por completo, a mato-competição.

Tabela 1 - Principais atributos químicos e físicos das parcelas em estudo até 450 cm de profundidade

Prof	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	ARE	SIL	ARG
cm	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³										%	
0-15	3,7	26	4	0,5	4	<1	21	93	5,7	98,7	6	78	2	20
15-30	3,9	16	3	0,4	4	<1	17	64	4,6	68,8	7	78	2	20
30-45	4,0	12	2	0,4	4	<1	12	50	4,5	54,4	9	77	2	21

A amostragem de solo foi realizada em 2008 nas espécies *P. caribaea* var. *hondurensis* e *P. taeda*, nos tratamentos controle (SN) e fertilizado e irrigado (FI) (CARNEIRO, 2013)

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi um fatorial 2x2 com dois níveis de espécie (*P. caribaea* var. *hondurensis* e *P. taeda*) e dois níveis de manejo (sem nenhum manejo e irrigado e fertilizado) em blocos casualizados com quatro repetições, totalizando 1,8 hectares. Cada parcela foi composta por 192 plantas (1150,5 m²), mantida a bordadura dupla entre as parcelas e uma área útil de 96 plantas (577,2 m²).

Os quatro tratamentos utilizados neste trabalho são: *P. taeda* sem fertilização e não irrigado (PTA SN - controle), *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI), *P. caribaea* var. *hondurensis* sem fertilização e não irrigado (PCH SN – controle), *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI).

O regime hídrico e nutricional foi implantado para evitar-se qualquer limitação ao crescimento do *Pinus*. As parcelas fertilizadas receberam uma adubação aos 18 meses (36 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 52 kg ha⁻¹ de fósforo, 40 kg ha⁻¹ de potássio, 580 kg ha⁻¹ de cálcio, 180 kg ha⁻¹ de magnésio, 53 kg ha⁻¹ de enxofre, 1,44 kg ha⁻¹ de boro, 7,2 kg ha⁻¹ de zinco e 0,64 kg ha⁻¹ de cobre), na forma de ureia, super fostato simples, cloreto de potássio, calcário e Micro FTE Br12, e aos 90 meses (136 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 31 kg ha⁻¹ de fósforo e 157 kg ha⁻¹ de potássio), na forma de NPK 17:6:24, enquanto que no tratamento controle não houve nenhuma adição de fertilizantes. O tratamento irrigado possuía um sistema de irrigação por gotejamento, de 2010 até 2014, e teve como objetivo garantir que as parcelas irrigadas recebessem semanalmente 40 mm de água, sendo esta pela precipitação pluviométrica e pela irrigação, enquanto que as parcelas testemunhas receberam apenas água da chuva.

3.3 Variáveis climáticas

Os dados climáticos diários de temperatura média, máxima e mínima (°C), de umidade relativa do ar (%), de precipitação pluviométrica (mm) e radiação global (MJ m^{-2}) são coletados desde o início do plantio pela Estação Meteorológica automatizada, a 22 metros do nível do solo, instalada na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR, MJ m^{-2}), espectro da radiação solar entre os comprimentos de onda 400-710 nm, foi calculada com base na radiação global. Devido aos efeitos atmosféricos, como presença de nuvens, a relação da PAR pela radiação global pode variar de 0,4 a 0,6, sendo que neste trabalho consideramos a relação genérica de 0,5 (LANDSBERG; SANDS, 2011).

O déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV, kPa) foi calculado com base na temperatura e umidade relativa do ar (ALLEN et al., 1998), como mostram as eq. 1, 2 e 3.

$$DPV = e_s - e_a \quad (1)$$

Onde: DPV = pressão de vapor atmosférico (kPa); e_s = pressão de saturação de vapor a temperatura do ambiente (kPa); e_a = pressão parcial de vapor (kPa).

Sendo a pressão de saturação de vapor diária (e_s), em kPa:

$$e_s = \frac{\left(0,6108 e^{\frac{17,27 T_{max}}{T_{max}+237,3}}\right) + \left(0,6108 e^{\frac{17,27 T_{min}}{T_{min}+237,3}}\right)}{2} \quad (2)$$

Onde: T_{max} = temperatura máxima do ar diária (°C); T_{min} = temperatura mínima do ar diária.

E a pressão parcial de vapor (e_a), em kPa:

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (3)$$

Onde: UR = umidade relativa do ar (%); e_s = pressão de saturação de vapor a temperatura do ambiente (kPa).

O balanço hídrico foi determinado para se avaliar a influência da disponibilidade de água no período estudado, com base em Rolim; Sentelhas e Barbieri (2002). Os valores de evaporação de referência diária foram calculados por meio da equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO (ALLEN et al., 1998), apresentada na eq. 4:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900U_2}{T + 273} \right) (DPV)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (4)$$

Onde: ET_o = evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); R_n = saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G = densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); Δ = declinação da curva de saturação do vapor da água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); U_2 = velocidade do vento (média diária) a 2 m acima da superfície do solo (m s^{-1}); T = temperatura média diária do ar ($^\circ\text{C}$); DPV = déficit de pressão de vapor (kPa); γ = constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

A capacidade de água disponível (CAD), estimada em 230 mm, foi calculada conforme modelo ajustado por Alvares (2011) em solos de mesma classificação no Sul do Estado de São Paulo. Para os cálculos (eq. 5) se utilizou o teor de argila determinado na camada de 0-45 cm de profundidade e se considerou a profundidade efetiva de 2m, de acordo com as escavações feitas na amostragem destrutiva de raízes grossas (dados não apresentados).

$$CAD = -0,0216(x^{0,8133}) + 6,4967e^{\left(\frac{-170,5459}{x}\right)}, R^2 = 0,99, \quad n = 19 \quad (5)$$

Onde: CAD (mm cm^{-1}); x = teor de argila (g kg^{-1}); e = base do logaritmo natural; R^2 = coeficiente de determinação; n = número de observações.

3.4 Medições dendrométricas

O inventário foi realizado a cada seis meses a partir de 2012, sempre nos meses de abril e setembro, onde se mensuraram 96 árvores por parcela. Foram medidos diâmetro à altura do peito (DAP, 1,3 m acima do nível do solo) de todas as árvores e a altura total das três primeiras linhas e das oito árvores dominantes, com maior DAP, de cada parcela.

Para estimar a altura das demais árvores, desenvolveu-se uma relação hipsométrica através das eq. 6 e 7, por parcela e por idade. A escolha do melhor modelo foi baseada no coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de variação (CV) (CAMPOS; LEITE, 2006).

$$\text{Ln}(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{DAP} \right) \quad (6)$$

$$\text{Ln}(H) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(DAP) \quad (7)$$

Onde: Ln = logaritmo natural; H = altura total (m); DAP = diâmetro à altura de 1,30m (cm); β_0 e β_1 = parâmetros.

3.5 Amostragem destrutiva da parte aérea e radicular

Foram abatidos 24 indivíduos das espécies *P. caribaea* var. *hondurensis* e *P. taeda*, sendo 6 árvores de cada um dos 4 tratamentos em estudo. A seleção dos indivíduos representativos ocorreu a partir do inventário de setembro de 2013, estabelecendo-se a distribuição do povoamento com divisão de seis classes de diâmetro, em intervalos de 3,2 cm. Com os indivíduos selecionados, realizou-se o método destrutivo de quantificação de biomassa (Figura 3).

No campo, foi medido para cada árvore selecionada seu DAP e projeção da copa, e após o corte foi medida a altura total, a altura do início da copa verde e separado os componentes das árvores em tronco, galhos e acículas. Para o componente acícula, a copa foi dividida em terço superior, médio e inferior (profundidade da copa dividida em 3 partes iguais) e cada um foi pesado separadamente.

Para biomassa abaixo do solo, foram usados 12 raízes grossas do total abatido para a parte aérea (6 para cada espécie). As raízes grossas das árvores abatidas para a biomassa aérea foram retiradas por inteiro levando-se em consideração todas as raízes maiores que 10 mm de diâmetro.

Figura 3 - À esquerda, pesagem em campo dos compartimentos da parte aérea das árvores selecionadas. À direita, amostragem destrutiva de raízes grossas (>10mm)

Cada componente da árvore, acima ou abaixo do solo, foi pesado individualmente no local, e as amostras representativas recolhidas e secas a 65 °C até peso constante para determinação da massa seca. Para determinar a proporção de casca e lenho, a casca foi separada do lenho em todas as amostras (discos) levadas ao laboratório e pesada separadamente. A massa seca total do tronco foi então multiplicada por esta proporção para estimar a biomassa total da casca e do lenho.

Para determinação do volume com casca das árvores foi realizada cubagem rigorosa pelo método de Smalian (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009), onde no campo foram retiradas seções transversais do tronco na base, DAP e depois a cada metro até o topo da árvore. Em cada disco foi medido seu diâmetro em 2 direções e a espessura da casca em 2 pontos distintos.

A análise da relação entre as variáveis dependentes (biomassa seca de cada compartimento e volume) e independentes (DAP e altura) para obtenção de equações de biomassa e volume foi realizada por meio de análises de regressão, através da função *lm* no software R (R CORE TEAM, 2014). Os dados usados para gerar as regressões foram testados para normalidade (análise do gráfico quantil-quantil) e homogeneidade de variâncias (Teste de Bartlett).

A escolha dos melhores modelos alométricos de biomassa e volume foi baseada na análise gráfica da distribuição e normalidade dos resíduos e no método do critério de informação de Aikake ($AIC = -2ML + 2p$) e Bayesiano ($BIC = -2ML + p$

$\log(n)$), onde p é o número de parâmetros incluídos no modelo, n o número de observações e ML a estimativa de máxima verossimilhança (SAINT-ANDRÉ et al., 2005; SICARD et al., 2006).

3.5.1 Método direto de determinação do índice de área foliar

Para as acículas, além da determinação da biomassa foliar (Item 3.5), também foi calculada a área foliar específica das árvores (AFE, m² de folha por kg de massa seca), selecionando-se 12 fascículos desenvolvidos de cada terço da copa. Esses fascículos foram armazenados em refrigerador até serem digitalizados com o scanner HP Scanjet G2710. Logo após, as acículas foram secas a 65 °C por 72 horas e pesadas em balança eletrônica analítica, com preciso de 0,01 gramas, para determinação do peso seco das amostras. As imagens digitais obtidas, com extensão TIFF e resolução de 300dpi, foram processadas pelo software *ImageJ*, gerando os resultados de área (mm²) de cada fascículo amostrado (Figura 4). Dessa forma, AFE foi estimada utilizando-se a eq. 8 e a área foliar total (AF, m² arv⁻¹) de cada árvore pela eq. 9.

$$AFE = \frac{AF}{BS * 1000} \quad (8)$$

$$AF = AFE * BSt \quad (9)$$

Onde: AFE= Área foliar específica (m² kg⁻¹); AF = Área do fascículo com base na matéria verde (mm²); BS = Biomassa do fascículo com base na matéria seca (g); AF= Área foliar total da árvore (m² árvore⁻¹); BSt = Biomassa total de fascículos da árvore com base na matéria seca (kg árvore⁻¹).

Figura 4 - Imagem dos fascículos do *P. caribaea* var. *hondurensis* escaneados (a) e imagem gerada após sua análise digital pelo programa *ImageJ* (b)

Para estimar os valores de AF para as demais árvores não amostradas da parcela foi utilizado um modelo alométrico em função do DAP (GOWER; NORMAN, 1991), realizado por meio de análises de regressão (função *lm* no software R), respeitando as pressuposições de normalidade e homogeneidade de variâncias. O melhor modelo foi escolhido com base no método do critério de informação de Akaike ($AIC = -2ML + 2p$) e Bayesiano ($BIC = -2ML + p \log(n)$), onde p é o número de parâmetros incluídos no modelo, n o número de observações e ML a estimativa de máxima verossimilhança. O índice de área foliar (IAF, m^2 folha m^{-2} solo) foi então calculado através da eq. 10.

$$IAF = \frac{\sum AF}{\hat{Area}} \quad (10)$$

Onde: IAF = índice de área foliar (m^2 folha m^{-2} solo); $\sum AF$ = somatório da área foliar total de cada árvore na parcela (m^2 arv $^{-1}$); Área da parcela (0,0576 m^2).

3.5.2 Método indireto de determinação do índice de área de vegetação

A medição indireta do índice de área foliar (IAF) foi realizada nas 16 parcelas a cada 3 meses (total de 6 medições), a partir de janeiro de 2014, com o auxílio do aparelho LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (Li-COR, Inc., Lincoln, EUA). Este instrumento portátil mede a radiação difusa (<490 nm) por meio de um sensor óptico

que possui uma lente “olho de peixe” com cinco anéis concêntricos, cada um responsável por uma faixa de ângulos zenitais (7° , 23° , 38° , 53° e 68°).

Foi utilizado o método de dois sensores, onde um era posicionado em uma área aberta, sem nenhuma vegetação, para capturar a radiação incidente acima do dossel a cada 15 segundos, enquanto o outro sensor era levado para dentro das parcelas medindo a radiação transmitida pela copa. As coletas eram realizadas entre 6 e 8 horas da manhã ou entre 16 e 17:30 da tarde. No início e ao final de cada medição os instrumentos eram intercalibrados na área aberta para posterior correção de diferenças entre aparelhos (Figura 5). Dentro da parcela, se coletavam 21 pontos em um transecto perpendicular a linha de plantio (Figura 5), com o sensor obedecendo a mesma orientação do sensor externo. Os dados foram processados no software FV2000, se retirando os valores do quinto anel do sensor devido ao tamanho das parcelas utilizadas.

Figura 5 – À esquerda, calibração dos aparelhos LAI2000 em área aberta para medição indireta do índice de área foliar. À direita, croqui esquemático da parcela útil, onde os círculos representam as árvores e as cruzes os 21 pontos de medição com o aparelho sob o dossel

3.5.3 Calibração do método indireto

Os valores de IAF estimados pelo método indireto (medições realizadas com o LAI-2000) foram calibrados com os valores de IAF calculados pelo método direto, obtido através da amostragem destrutiva, pois diversos estudos apontam para a tendência do equipamento LAI-2000 subestimar as medições em coníferas (DEBLONDE; PENNER; ROYER, 1994; STENBERG, 1996; CHEN et al., 1997). Essa calibração foi feita confrontando os dados através de regressão linear utilizando a função *lm* do software R (R CORE TEAM, 2014).

3.6 Determinação do Balanço de Carbono

Produtividade primária bruta (GPP), definida como fotossíntese bruta somada ao longo de um intervalo anual, foi determinada pela soma da produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP), da respiração autotrófica da parte aérea das árvores (Rp) e do fluxo de carbono para o solo (TBCF) (GIARDINA et al., 2003; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008; RYAN et al., 2010). ANPP e TBCF foram amostrados de forma a capturar a variabilidade temporal e espacial de seus fluxos e estoques de carbono para as 16 parcelas. Toda matéria seca estimada foi convertida com base em seus teores de carbono e os fluxos foram estimados e expressos em g de carbono (C) m⁻² ano⁻¹.

A concentração de carbono dos componentes vegetais e de solo foram determinadas no analisador LECO 1000 CN (Leco Corp., St. Joseph, MI), utilizando 0,1 g de cada amostra seca e moída. Para o *P. caribaea* var. *hondurensis* encontrou-se o teor de carbono nas folhas de 502 g kg⁻¹, nos galhos de 509 g kg⁻¹, na casca de 542 g kg⁻¹, tronco de 514 g kg⁻¹ e raízes grossas de 504 g kg⁻¹. No *P. taeda* a quantidade de carbono nas folhas foi de 497 g kg⁻¹, nos galhos de 499 g kg⁻¹, na casca de 523 g kg⁻¹, no tronco de 500 g kg⁻¹ e nas raízes grossas de 514 g kg⁻¹. Para os tocos de *Eucalyptus* da rotação anterior considerou-se a concentração de carbono 452 g kg⁻¹, com base em Campoe et al. (2012).

3.6.1 Biomassa e Produtividade Primária Líquida da Parte Aérea (ANPP)

A ANPP representa a produção de material lenhoso e folhas num período de tempo, ou seja, ela é expressa pela soma do incremento da biomassa acima do solo (tronco, casca, galhos e folhas) e pela biomassa liberada como folheto (eq. 11):

$$ANPP = F_A + \Delta C_W + \Delta C_F \quad (11)$$

Onde: ANPP = produtividade primária líquida; ΔC_W = diferença no teor de carbono da biomassa aérea da planta (tronco, casca e galhos); ΔC_F = diferença no teor de carbono da folhagem do dossel; F_A = quantidade de folheto enviado pelo dossel. Como não houve ataque de pragas no período de estudo, a herbivoria de folhas não foi considerada.

O folheto (F_A) foi coletado a cada 28 dias por meio da instalação de 6 coletores (0,1925 m²/cada) por parcela colocados no solo, buscando representatividade espacial (Figura 6). O material foi seco a 65°C até peso constante e separado em folhas, galhos e casca e combinado por parcela. Assumiu-se valor zero para a taxa de decomposição do folheto.

A biomassa (C_W e C_F) será estimada semestralmente, baseada nos inventários (mensurações do diâmetro a 1,3m e altura total da árvore), através das equações alométricas desenvolvidas aos 7 anos da floresta (detalhamento da metodologia no item 3.5). A diferença no teor de C da folhagem do dossel e da biomassa aérea será a diferença entre as medições.

3.6.2 Respiração da Parte Aérea (R_a)

A respiração autotrófica da parte aérea foi estimada como uma proporção fixa da ANPP (EPRON et al., 2012), utilizando o conceito de eficiência de uso do carbono (CUE) e adotando-se o valor de 0,42 para todos os tratamentos, pois segundo Litton; Raich e Ryan (2007) esta constante não varia com o manejo aplicado.

$$R_a = ANPP \frac{(1 - 0,42)}{0,42} \quad (12)$$

Esse valor foi assumido com base em diversos trabalhos que mediu direta (RYAN et al., 1996; SCHÄFER et al., 2003; BOWN et al., 2009) ou indiretamente (MAIER et al., 2004) a respiração autotrófica de *P. taeda* e *P. radiata* em diferentes idades. Estes valores estão próximos do valor universal sugerido por Waring; Landsberg e Williams (1998), de 0,47, e dos valores encontrados para outras espécies florestais, de aproximadamente 0,5 (GIARDINA et al., 2003; DELUCIA et al., 2007; LITTON; RAICH; RYAN, 2007).

3.6.3 Fluxo de carbono para o solo (TBCF)

O TBCF foi calculado através da metodologia proposta por Giardina e Ryan (2002), onde se estimou os fluxos de entrada e saída de carbono do sistema solo-serapilheira e as mudanças no estoque de C (eq. 13):

$$TBCF = F_S - F_A + \Delta[C_R + C_L + C_T] \quad (13)$$

Onde: F_S = fluxo de CO_2 do solo acumulado; F_A = folheto; Δ representa a diferença no teor de carbono nas raízes grossas (C_R), na camada de serapilheira acumulada sobre o solo (C_L) e nos tocos da rotação anterior (C_T). Perdas de carbono por erosão, lixiviação, estoque em camadas profundas do solo e mudanças na biomassa de raízes finas foram consideradas zero (RYAN et al., 1996, 2010; GIARDINA; RYAN, 2002; FORRESTER; BAUHUS; COWIE, 2006).

Para as medições de respiração do solo, serapilheira e folheto o solo da floresta foi estratificado, de modo a capturar a variabilidade espacial dos fluxos. Dessa forma, os pontos de amostragem estão distribuídos entre plantas na linha, na entre linha de plantio e na transição entre os dois pontos anteriores (Figura 6).

Figura 6 - Desenho esquemático das posições de instalação dos coletores de folheto (a) e do fluxo de CO₂ do solo e serapilheira acumulada sobre o solo (b). Cada posição numerada foi alocada em diferentes árvores dentro de cada parcela

O fluxo de CO₂ do solo foi medido quinzenalmente ao longo de dois anos, com o auxílio de uma câmara SRC-1 (PPSystem, Haverhill MA, USA) adaptada com diâmetro de 20 cm, acoplada a um analisador portátil de gás por infravermelho EGM-4, totalizando 48 medições (Figura 7). A câmara foi inserida em anéis permanentes de PVC, devidamente instalados a 5 cm de profundidade no solo. Foram efetuadas 9 leituras por parcela, com as posições de acordo com a Figura 6 e em 9 diferentes árvores.

Como alguns estudos mostraram que a câmara original (10 cm de diâmetro) do aparelho PPSsystem pode superestimar as medições quando comparado com o LI-6400-09 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) (BUTNOR; JOHNSEN; MAIER, 2005; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008; RYAN et al., 2010), foi realizada uma medição com os dois aparelhos, porém utilizando-se o LI-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, USA; Apêndice A), resultando em uma equação de regressão (LI-COR = 1,64 x PPSsystems, $R^2 = 0,56$, $p < 0,01$) para calibrar os dados de fluxo de CO₂ medidos pelo PPSsystem.

A temperatura do solo foi mensurada durante 10 meses, sendo instalados 3 termômetros digitais HOBO (Onset Corp, Bourne, Massachusetts) a 10 cm de profundidade em 3 parcelas distintas. Segundo estudos de Giardina e Ryan (2002); Giardina et al. (2003) e Stape, Binkley e Ryan (2008) como fluxo de CO₂ do solo não varia com a hora do dia e a temperatura do solo nas parcelas deste estudo não tiveram grande amplitude, as estimativas de respiração do solo foram feitas se multiplicando os valores medidos ($\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$) pelo número de segundos

correspondentes ao período quinzenal da medição. As estimativas anuais foram encontradas através da soma das estimativas quinzenais.

Figura 7- Coletor de folheto devidamente instalado e medidor de fluxo de CO_2 do solo com sua câmara sobre o anel de PVC (esquerda). Quadro amostral ($0,25 \text{ m}^2$) para coleta anual de serapilheira acumulada (direita)

Os estoques de carbono no solo não foram contabilizados no presente trabalho, pois segundo Raich e Nadelhoffer (1989) em florestas com a copa já fechada essa mudança no estoque, em curtos intervalos de tempo, é muito pequena em comparação aos outros fluxos de entrada e saída de carbono.

A serapilheira acumulada sobre o solo (horizonte O do solo) foi coletada anualmente (Agosto de 2013, Agosto de 2014 e Maio de 2015) com um quadrado amostral de $0,25 \text{ m}^2$ (Figura 7) em 9 pontos por parcela (3 posições e 3 repetições). O material de cada parcela formou uma amostra composta, que foi separada em compartimentos (acículas e material lenhoso) e seco em estufa a 65°C até peso constante. Antes da pesagem, o material foi peneirado (2 mm) para diminuir a contaminação por solo mineral. Depois de peneirado, foi determinado o teor de cinzas dessas amostras, por combustão por 3 horas a 600°C , para eliminar o efeito de partículas de solo remanescentes. Detectaram-se teores variando de 0,1% a 20%, que foram corrigidos nos valores de peso seco das amostras de serapilheira. A mudança no teor de carbono do horizonte O foi calculado pela diferença média por parcela entre as coletas.

A biomassa de raízes grossas (C_R) foi estimada semestralmente, baseada nos inventários, através dos modelos alométricos desenvolvidos aos 7 anos da floresta (detalhamento da metodologia no item 3.5). Sua diferença no teor de carbono foi calculada como diferença entre as medições. Para as raízes finas se

assumiu que não há mudança anual em seu estoque de carbono, pois sua representatividade na biomassa total abaixo do solo é pequena, em média abaixo de 10%, e sua produção se mantém constante em pequenos intervalos de tempo (RYAN et al., 1996; KING et al., 1999; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004).

Considerando que anteriormente a área era ocupada por *Eucalyptus saligna*, os tocos desse plantio (cerca de 510 tocos por hectare) foram inventariados, através da medição da circunferência da parte superior de cada um (20 - 360 cm). Para se estimar a biomassa inicial dos tocos e raízes, foi utilizada a equação alométrica desenvolvida por Campoe et al. (2012) para tocos de eucalipto com 12 anos de idade no mesmo local (eq. 14). A decomposição dos tocos foi calculada através da taxa exponencial ($k = 0,190 \text{ ano}^{-1}$) desenvolvida por Stape, Binkley e Ryan (2008) e, assim, a diferença no teor de carbono foi a variação entre os anos do período estudado.

$$BS_t = 14,018 C \quad (14)$$

Onde BS_t é a biomassa seca do toco e raízes grossas (kg) e C é a circunferência do toco (m).

3.6.4 Produtividade líquida do ecossistema (NEP)

A produtividade líquida do ecossistema (NEP, $\text{g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) é soma da diferença de carbono estocado na floresta na escala anual, conforme apresentado na eq. 15 (MAIER et al., 2004).

$$NEP = GPP - (R_a + F_s) \quad (15)$$

Onde: GPP = produtividade primária bruta; R_a = respiração autotrófica da parte aérea; F_s = fluxo de CO_2 do solo.

3.7 Análise Estatística

Análise descritiva e exploratória de dados foi usada para caracterizar as variáveis de crescimento, área foliar específica, área foliar total, índice de área foliar e os estoques de carbono. Para estes dados, análise de variância foi realizada com arranjo fatorial 2x2 (espécie e manejo). Todos os dados de fluxos foram submetidos à análise de variância com arranjo fatorial considerando a espécie e manejo os efeitos principais, e o ano como fator de medidas repetidas.

Análises de regressão foram utilizadas para avaliar e quantificar a biomassa de cada compartimento da floresta, volume da madeira e as relações entre os fluxos de carbono e partições da GPP. Para avaliação dessas relações considerou-se os valores de coeficiente de determinação (R^2) e valor de significância (p).

A análise de resíduo foi verificada pela normalidade e homocedasticidade. Em todos os testes estatísticos utilizou-se o nível de significância de 5% e todas as comparações de médias (quando os efeitos eram significativos) foram realizadas pelo Teste de Tukey.

Todas as análises procederam-se no software estatístico R (R CORE TEAM, 2014), exceto as análises de variância e comparação de média dos fluxos e partição, que foram realizadas no programa SAS (SAS Institute, Cary, NC, EUA). O material gráfico foi criado no software Sigmaplot 11.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis climáticas

O período de estudo foi dividido em Ano 1 (Junho de 2013 a Maio de 2014) e Ano 2 (Junho de 2014 a Maio de 2015). A temperatura média dos dois anos foi de 20 °C, valor similar à média histórica local de 19,4°C. Fevereiro de 2014 e Janeiro de 2015 foram os meses de maiores temperaturas médias (24 °C), enquanto Julho foi o mês mais frio (15,5 °C no Ano 1 e 16,6 °C no Ano 2). Mais da metade de todo o período avaliado apresentou temperaturas médias acima de 20 °C (Figura 8b), em sua maioria de setembro a abril. Temperaturas mínimas absolutas menores que 5 °C foram encontradas em sete dias apenas, sem a ocorrência de geadas, sendo todas no ano de 2013.

A precipitação do Ano 1 foi de 1195 mm e a do Ano 2 foi de 1487 mm, valor próximo a média anual do local (1490 mm) desde o ano de instalação do experimento (2007) até 2012 (CARNEIRO, 2013). Na Figura 8a, é possível verificar a diferença na distribuição das chuvas entre os anos avaliados, onde no primeiro ano o período de maior disponibilidade hídrica (outubro a março) representou 55% da precipitação acumulada no ano, sendo Junho de 2013 o mês que mais choveu (233 mm) e Agosto de 2013 sem chuva. Já no Ano 2, a primavera e verão concentraram 78% de toda a chuva, valor próximo a média histórica (75%), onde Dezembro de 2014 foi o mês de maior ocorrência (282 mm) e Junho de 2014 o mês mais seco (6,5 mm).

A umidade relativa média mensal (Figura 8c) não oscilou consideravelmente durante os dois anos (80%), apresentando seus menores valores em Março, Agosto e Outubro de 2014 (68%) e os maiores em Junho de 2013 e Março de 2015 (91%). Já o déficit de pressão de vapor (DPV) médio variou de 0,20 kPa, em Junho de 2013, a 1,08 kPa, em Outubro de 2014 (Figura 8d). A média diurna do DPV foi maior para os períodos de menor precipitação e maior temperatura com valor máximo registrado de 2,6 kPa (Outubro de 2014).

No Ano 1, a radiação fotossinteticamente ativa (PAR, Figura 8e) total foi de 3063 MJ m⁻², com menor valor médio diário de 5,5 MJ m⁻² (Junho de 2013) e maior de 11,1 MJ m⁻² (Janeiro de 2014). No Ano 2 os valores foram bastante similares,

com total de radiação de 3114 MJ m^{-2} com menor e maior valores médios diários de 6,6 e $11,3 \text{ MJ m}^{-2}$, respectivamente.

Figura 8 – Valores mensais de precipitação (a), diários de temperatura média (°C) (b), umidade relativa do ar (%) (c), déficit de pressão de vapor (kPa) (d) e radiação fotossinteticamente ativa (MJ m⁻²) (e), medidos pela Estação Meteorológica automatizada localizada na área de estudo, no período de Junho de 2013 a Maio de 2015

Foi realizado o cálculo do balanço hídrico normal, considerando a capacidade de armazenamento de água no solo de 230 mm, para as parcelas normais e para as irrigadas, sendo que os resultados estão apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Balanço hídrico sequencial no período estudado para capacidade de armazenamento de água de 230 mm (a). Balanço hídrico sequencial para as parcelas irrigadas, sendo que a flecha indica o final do funcionamento do sistema (b)

O balanço hídrico sequencial dos dois anos experimentais mostrou que nas parcelas controle as recargas do solo diminuíram ao longo do ano de 2013 (Figura 9a), não havendo excedente hídrico por 15 meses consecutivos (Julho de 2013 a Outubro de 2014). Segundo Rocha (2014), de 1995 a 2012 para o mesmo local o déficit hídrico variou de 3 a 8 meses por ano, entre o outono e inverno, portanto a quantidade de meses sem excedente hídrico encontrada nesse estudo não está fora da média dos últimos 18 anos, porém a diferença está na quantidade reduzida de precipitação no período Outubro de 2013 a Março de 2014 (período histórico com maior precipitação).

Na Figura 9b nota-se o efeito da irrigação no balanço hídrico local, em que, no total, foi adicionado 293 mm de água no Ano 1. Para as parcelas irrigadas a água disponível no solo era de 95% da capacidade máxima (230 mm) enquanto, nas

parcelas que receberam apenas água da chuva era de 83%, para o primeiro ano avaliado, e de 70% no segundo ano (Figura 10)

Figura 10 - Estimativa mensal do armazenamento de água no solo (2m de profundidade) para as parcelas irrigadas e para as que receberam apenas água da chuva, sendo que o sistema de irrigação ficou em operação até Maio de 2014

Dessa forma, as condições climáticas registradas para o período de estudo foram atípicas quando comparadas com o padrão de clima Cfa (Köppen), temperado úmido com verão quente, pois o volume de chuvas para a época de maior disponibilidade hídrica (outubro a março) foi bastante reduzido no Ano 1, causando um extenso período de seca na área.

4.2 Desenvolvimento da floresta

4.2.1 Modelos alométricos de volume e biomassa

Com os dados gerados pela amostragem destrutiva das árvores, determinou-se a relação das duas variáveis independentes do indivíduo (DAP e altura total) e seu volume com casca e biomassa seca de seus componentes (Figura 11). Assim, foram ajustados modelos alométricos de biomassa e volume específicos para cada espécie (Tabela 2).

Figura 11 - Volume e biomassa seca dos componentes da árvore em relação ao seu DAP e altura total para o *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e para o *P. taeda* (PTA), aos 7,1 anos de idade

Tabela 2 - Equações alométricas finais de biomassa seca ($\text{kg } \text{árv}^{-1}$) e volume ($\text{m}^3 \text{árv}^{-1}$) desenvolvidas para o *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e para o *P. taeda* (PTA), com n representando o número de observações; R^2 é o coeficiente de determinação; e RMSE é a raiz do erro quadrático médio ($\text{m}^3 \text{árv}^{-1}$ para o volume, e $\text{kg } \text{árv}^{-1}$ para os demais componentes)

Espécie	Componente	Modelo	n	R^2	RMSE
PCH	Volume	$V = 0,0000521 (DAP^2 H)^{0,9494}$	12	0,99	0,01
	Lenho	$B = 0,0045 (DAP^2 H)^{1,0707}$	12	0,98	8,15
	Casca	$B = 0,0411 (DAP^2 H)^{0,6442}$	12	0,86	2,21
	Galho	$B = 0,0027 DAP^{2,6764}$	12	0,84	3,25
	Acícula	$B = 0,0003 (DAP^2 H)^{1,1313}$	12	0,86	1,69
	Raiz	$B = 0,1783 DAP^{1,6053}$	6	0,88	4,31
PTA	Volume	$V = 0,000384 DAP^{2,2955} H^{-0,3369}$	12	0,99	0,01
	Lenho	$B = 0,0351 DAP^{2,0272} H^{0,4461}$	12	0,98	2,25
	Casca	$B = 0,0124 (DAP^2 H)^{0,7163}$	12	0,93	0,53
	Galho	$B = 0,0029 DAP^{2,9614}$	12	0,84	4,91
	Acícula	$B = 0,0002 DAP^{1,4637} H^{2,4131}$	12	0,87	0,90
	Raiz	$B = 0,0606 DAP^{2,005}$	6	0,99	1,28

4.2.2 Crescimento e produtividade

A Tabela 3 mostra os resultados dendrométricos de sobrevivência, DAP médio, altura média, altura dominante, área basal, volume e biomassa do tronco (lenho com casca), dos inventários realizados aos 6,1 e 8,1 anos de idade.

A densidade inicial do plantio foi de 1666 árvores ha^{-1} , com elevada taxa de sobrevivência em todas as parcelas (acima de 90%). Aos 8,1 anos de idade, o *P. caribaea* var. *hondurensis* apresentou altura média de 17,8 m, com diferença entre tratamento controle e manejo máximo de 3,5%, enquanto o *P. taeda* obteve 12,2 m, com diferença de 7,6% entre manejos.

Tabela 3 - Valores médios de sobrevivência das parcelas (Sobrev), diâmetro a altura do peito (DAP), altura total (H), altura dominante (Hdom), área basal (AB), volume (V), biomassa do tronco (Biom. Tronco) e incremento médio anual (IMA) para cada tratamento, aos 6,1 e 8,1 anos de idade

Variável	(continua)			
	PCH FI	PCH SN	PTA FI	PTA SN
	6,1 anos			
Sobrev (%)	99 (0,3)	99 (0,0)	100 (0,0)	97 (1,1)
DAP (cm)	19,0 (0,0) a	17,8 (0,2) b	17,1 (0,4) c	15,8 (0,4) d
H (m)	13,8 (0,1) a	13,6 (0,2) a	10,6 (0,0) b	9,5 (0,1) c
Hdom (m)	14,5 (0,2) a	14,5 (0,3) a	11,5 (0,2) b	10,0 (0,3) c
AB ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	48 (0,2) a	42 (0,7) b	39 (1,4) c	34 (1,5) d

Tabela 3 - Valores médios de sobrevivência das parcelas (Sobrev), diâmetro a altura do peito (DAP), altura total (H), altura dominante (Hdom), área basal (AB), volume (V), biomassa do tronco (Biom. Tronco) e incremento médio anual (IMA) para cada tratamento, aos 6,1 e 8,1 anos de idade

Variável	(conclusão)			
	PCH FI	PCH SN	PTA FI	PTA SN
V(m ³ ha ⁻¹)	291 (0,8) a	256 (1,8) b	204 (8,6) c	176 (8,3) d
IMA (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	14,6 (0,2) a	12,8 (0,1) b	9,9 (0,3) c	7,7 (0,4) d
Biom. Tronco (Mg ha ⁻¹)	88,0 (0,1) a	76,8 (0,3) b	60,2 (0,9) c	46,8 (1,2) d
8,1 anos				
Sobrev (%)	99 (0,4)	99 (0,2)	99 (0,2)	96 (1,7)
DAP (cm)	20,5 (0,1) a	19,3 (0,2) b	18,2 (0,3) c	16,8 (0,4) d
H (m)	18,1 (0,1) a	17,5 (0,2) b	12,7 (0,2) c	11,8 (0,2) d
Hdom (m)	19,1 (0,3) a	18,6 (0,4) b	13,7 (0,2) c	12,5 (0,2) d
AB(m ² ha ⁻¹)	56 (0,2) a	50 (0,7) b	44 (1,2) c	38 (1,4) d
V(m ³ ha ⁻¹)	435 (4,2) a	379 (8,5) b	220 (6,1) c	190 (7,2) d
IMA (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	16,7 (0,2) a	14,4 (0,3) b	9,8 (0,3) c	8,0 (0,4) d
Biom. Tronco (Mg ha ⁻¹)	135,7 (1,4) a	116,9 (2,8) b	79,8 (2,7) c	64,7 (3,2) d

Nota: Valores entre parênteses representam o erro padrão dos dados ($n = 4$). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$). PCH FI = *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado; PCH SN = *P. caribaea* var. *hondurensis* sem fertilização e irrigação; PTA FI = *P. taeda* fertilizado e irrigado; PTA SN = *P. taeda* sem fertilização e irrigação.

Bila, Sanquetta e Machado (2012), calculando o índice de sítio para *P. caribaea* var. *hondurensis* em Minas Gerais, observaram altura dominante média variando de 9,4 até 15,9 m para a maioria das parcelas aos 8 anos de idade. Corrêa, Bellote e Francisco (2011), encontraram altura média para plantios comerciais de *P. caribaea* var. *hondurensis*, com 10 anos, em solos com diferentes atributos no estado de São Paulo, variando de 13 m a 18,6 m. Munhoz (2011), estudando os padrões de crescimento do *P. taeda* no sul do Brasil registou em plantios comerciais com 8 anos de idade, alturas médias variando de 10,9 m a 13,7 m. Estes valores citados estão próximos aos encontrados no presente estudo.

É notório o elevado ritmo de crescimento da espécie tropical comparado a subtropical. A área basal e volume do *P. caribaea* var. *hondurensis*, aos 6,1 anos de idade, foi 23% e 45%, respectivamente, maior do que o *P. taeda*. Após dois anos de avaliação, essas diferenças aumentaram para 29% na área basal e 98% no volume.

A diferença no crescimento anual, em Mg ha⁻¹ ano⁻¹, entre as espécies pode ser observada na Figura 12, onde o incremento corrente anual (ICA) máximo da espécie tropical ocorreu aos 7 anos de idade. A partir do sexto ano nota-se uma redução no crescimento do *P. taeda*, provavelmente justificado pelo período seco ocorrido entre 2013 e 2014, considerando que a disponibilidade de água afeta

negativamente o desenvolvimento desta espécie, visto que ela é proveniente de locais sem déficit hídrico (SCHULTZ, 1997; SHIMIZU; SEBBEN, 2008; SAMUELSON, 2013). A atipicidade climática também afetou o *P. caribaea* var. *hondurensis*, reduzindo o crescimento dos dois tratamentos pela metade em 2015.

Figura 12 - Incremento corrente anual (ICA) da biomassa do tronco, de 4,2 a 8,1 anos de idade nos tratamentos *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN) e *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN). As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$)

Os valores de incremento médio anual (IMA, $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) mostram que aos 8 anos de idade, a produtividade do *P. caribaea* var. *hondurensis* foi quase o dobro da espécie subtropical (Figura 13), média de $15,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ contra $8,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente.

A produtividade do *P. taeda* neste estudo foi similar ao valor encontrado por Samuelson et al. (2008) em um sítio bastante produtivo no sudeste dos Estados Unidos da América, apresentando IMA médio de $9,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na mesma idade; mas superior ao relatado por Albaugh et al. (2004), em parcelas com 12 a 16 anos de idade fertilizadas e/ou irrigadas, de $2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ até $4,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No Brasil, estudando a espécie, com 8 a 10 anos de idade, em diferentes sítios nos estados de Santa Catarina e Paraná, Munhoz (2011) mostrou uma variação de $9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ a $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Trabalhos conduzidos com *P. caribaea* também apontam grande variedade de produtividade. Na Nigéria, aos 8 anos de idade relatou-se produtividade de 5,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (EGUNJOB; BADA, 1979) e aos 14 anos de idade de 6,4 a 11,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (KADEBA, 1994). No Brasil, Poggiani (1985) estudando a espécie no município de Agudos mensurou, aos 14 anos, 9,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Dessa forma, observam-se taxas elevadas de crescimento de ambas as espécies no Brasil comparado a outros países produtores.

Figura 13 - Incremento médio anual (IMA) da biomassa do tronco, dos 3,2 a 8,1 anos de idade nos tratamentos *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN), e *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN). As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$)

Além da diferença entre espécies, observa-se que o manejo hídrico e nutricional teve influência significativa nos valores de DAP, altura, área basal, volume e biomassa do tronco (Tabela 3). O efeito do tratamento na produção de madeira, aos 8,1 anos de idade, mostra que a biomassa do tronco no *P. caribaea* var. *hondurensis* foi 16% maior para o tratamento irrigado e fertilizado (136 Mg ha⁻¹) do que no controle (117 Mg ha⁻¹). Para o *P. taeda* a biomassa do tronco sob manejo intensivo (80 Mg ha⁻¹) foi 23% superior ao manejo mínimo (65 Mg ha⁻¹).

O aumento na produtividade do *Pinus*, devido a maior disponibilidade de recursos, tem sido observado em diversos estudos em diferentes estágios de desenvolvimento da floresta (ALBAUGH et al., 1998, 2004; JOKELA; DOUGHERTY;

MARTIN, 2004; SAMUELSON et al., 2008; CARNEIRO, 2013). Dentre eles, Samuelson; Johnsen; Stokes (2004) relataram para *P. taeda*, aos 6 anos de idade, um aumento na biomassa do tronco de 24 Mg ha⁻¹ (tratamento com controle de mato-competição) para 48 Mg ha⁻¹ (tratamento com controle de mato-competição e pragas, irrigado e fertilizado). Para o *P. caribaea* var. *hondurensis* aos 7 anos de idade, em Casa Branca - SP, Balloni (1984) observou que o volume dobrou nos tratamentos fertilizados.

4.2.3 Área foliar específica e índice de área foliar

A área foliar específica projetada (AFE) apresentou valor médio de 4,5 m² kg⁻¹ para o *P. caribaea* var. *hondurensis* e 6,6 m² kg⁻¹ para o *P. taeda* (Tabela 4), aos 7,1 anos de idade.

Na mesma área experimental aos 5 anos de idade, Carneiro (2013) relatou AFE de 4,5 até 5,5 m² kg⁻¹ para o *P. caribaea* var. *hondurensis* e 4,5 a 5,1 m² kg⁻¹ para *P. taeda*. Outros estudos com espécies de Pinus, influenciadas por distintos manejos em diversas idades e sítios, relataram valores de AFE variando de 3,5 m² kg⁻¹ a 11 m² kg⁻¹ (ARNETH et al., 1998; MARTIN; JOKELA, 2004; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004; ARIAS; CALVO-ALVARADO; DOHRENBUSCH, 2007).

Tabela 4 - Valores médios da área foliar específica projetada (AFE), da área foliar total (AF) e do índice de área foliar (IAF), aos 7 anos de idade, para os tratamentos de *P. caribaea* var. *hondurensis* adubado e fertilizado (PCH FI), sem manejo (PCH SN), *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e sem manejo (PTA SN)

Tratamento	AFE (m ² kg ⁻¹)	AF (m ² árv ⁻¹)	IAF (m ² m ⁻²)
PCH FI	4,5 (0,2) b	32 (6,0) c	5,3 (0,1) c
PCH SN	4,5 (0,3) b	28 (5,6) d	4,6 (0,1) d
PTA FI	6,8 (0,6) a	41 (9,5) a	6,7 (0,2) a
PTA SN	6,5 (0,4) a	34 (7,3) b	5,6 (0,2) b

Nota: Valores entre parênteses representam o erro padrão dos dados ($n = 4$ para AF e IAF; $n = 6$ para AFE). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$)

Para se estimar a AF das árvores não amostradas na parcela, foi utilizado um modelo alométrico em função do DAP (Figura 14). Como apresentado na Tabela 4, a amplitude dos valores médios de AF foi de 28 m² árv⁻¹ para a espécie tropical no

tratamento controle, até 41 m² árv⁻¹ na espécie subtropical no tratamento com manejo intensivo.

Figura 14 - Equação para estimativa da área foliar total da árvore (AF) em função do diâmetro a altura do peito (DAP). PTA = *P. taeda*; PCH = *P. caribaea* var. *hondurensis*

O *P. taeda* apresentou valor de IAF 24% superior ao *P. caribaea* var. *hondurensis* (6,1 m² m⁻² contra 4,9 m² m⁻²), sendo essa diferença resultado da arquitetura da copa de cada espécie, uma vez que a subtropical apresenta maior quantidade de galhos com mais acículas. O manejo intensivo teve efeito significativo nos valores de IAF comparado ao tratamento controle tanto para a espécie subtropical, quanto para a tropical, com ganhos de 20% e 15%, respectivamente (Tabela 4).

Para calibrar os valores das medições realizadas com o aparelho LAI-2000 com os calculados através do método destrutivo, foram geradas regressões lineares para cada espécie (Figura 15), sendo que nos dois casos observa-se que o método indireto subestimou os valores efetivos.

Esta diferença entre os métodos de amostragem do IAF é citado em vários estudos, onde aferiram que o equipamento LAI-2000 pode subestimar de 30 a 70% os valores reais de IAF em coníferas (GOWER; NORMAN, 1991; STENBERG, 1996; WEISS et al., 2004). Isso ocorre devido a este método de medição ("gap fraction") assumir que a folhagem é aleatoriamente distribuída na copa da árvore. Entretanto,

em copas de coníferas, essa suposição é violada pela folhagem (acículas) ser altamente agrupada (STENBERG, 1996; BAYNES; DUNN, 1997).

Figura 15 – Equação para calibração dos dados de índice de área foliar (IAF) estimado pelo método direto (IAF real) pelo indireto (IAF LAI2000), para o *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e para o *P. taeda* (PTA). R^2 é o coeficiente de determinação da equação linear; RMSE é a raiz do erro quadrático médio ($m^2 m^{-2}$) e n é o número de observações

A sazonalidade do IAF (calibrado pelas equações da Figura 15) está apresentada na Figura 16. Durante o ano mais seco (Ano 1), o IAF atingiu seus menores valores registrados em Abril de 2014, o mês teoricamente com maior valor, com média geral de $3,6 m^{-2} m^2$. Esta redução ocorreu em conjunto com a elevada taxa de deposição de folheto em Março de 2014 em ambas as espécies (Figura 24).

O desenvolvimento e longevidade das folhas são fortemente influenciados pelos recursos hídricos disponíveis (LANDSBERG, 1997). Quando sob estresse a primeira resposta da planta é a redução do crescimento das folhas (BRADFORD; HSIAO, 1982 apud LANDSBERG, 1997), resultando na diminuição de sua área foliar. Além disso, prolongados períodos de estresse não só resultam na redução das taxas de expansão foliares, mas também causam sua senescência (LANDSBERG; SANDS, 2011).

Aos 8,5 anos de idade, o IAF médio anual do *P. caribaea* var *hondurensis* com manejo intensivo foi de $4,5 m^{-2} m^2$ e para o controle foi de $4 m^{-2} m^2$, enquanto

para a espécie subtropical foi de $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $4,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente, sendo que houve diferença estatística entre manejo e entre espécies.

Samuelson et al. (2008), relataram valores de IAF de $5,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para *P. taeda*, aos 8 anos de idade para tratamentos sem manejo; irrigado; irrigado e fertilizado, sendo que o valor de IAF projetado teórico máximo proposto para *P. taeda* é de $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (JOKELA; DOUGHERTY; MARTIN, 2004; SAMUELSON; JOHNSON; STOKES, 2004).

Figura 16 - Índice de área foliar (IAF) medido ao longo do período de estudo para as espécies *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e *P. taeda* (PTA), fertilizado e irrigado (FI) ou sem nenhum manejo (SN). As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$)

4.3 Estoques de carbono

Aos 8,4 anos de idade, o estoque de carbono total (somatório dos compartimentos da árvore, serapilheira acumulada e tocos da rotação anterior) foi de 114 e 100 Mg C ha^{-1} no *P. caribaea* var. *hondurensis* irrigado e fertilizado e no tratamento controle, respectivamente, sendo a diferença de 14%. Já no *P. taeda* o tratamento intensivo apresentou valor de 85 Mg C ha^{-1} , e o controle de 72 Mg ha^{-1} , diferença de 18% entre manejos (Tabela 5). Esta amplitude de valores observados evidencia as diferenças de produtividade entre as espécies.

Tabela 5 – Estoque de carbono (Mg C ha^{-1}) para os diferentes compartimentos da floresta para os tratamentos controle (SN) e irrigado e fertilizado (FI) do *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e *P. taeda* (PTA), ao final de cada ano avaliado

Compartimento	PCH FI	PCH SN	PTA FI	PTA SN
Ano 1 (Junho 2013 – Maio 2014)				
Floresta				
Acícula	6,0 (0,2) a	5,1 (0,2) b	5,9 (0,2) a	4,5 (0,3) b
Galho	7,3 (0,1) c	6,2 (0,1) d	13,6 (0,5) a	10,7 (0,7) b
Casca	10,8 (0,1) a	9,9 (0,1) b	4,0 (0,1) c	3,5 (0,2) d
Fuste	50,9 (1,1) a	43,8 (1,0) b	31,8 (0,9) c	26,3 (1,3) d
Raiz (>10 mm)	18,5 (0,1) a	16,7 (0,2) b	17,1 (0,5) c	14,6 (0,6) d
Serapilheira				
Acícula	5,8 (0,5) a	4,8 (0,3) a	2,8 (0,1) b	3,1 (0,3) b
Material lenhoso	0,4 (0,1) a	0,6 (0,1) a	0,3 (0,1) b	0,3 (0,1) b
Tocos	3,8 (0,6) a	4,0 (0,6) a	5,2 (0,2) a	5,0 (0,4) a
Total	103,4 (1,5) a	91,0 (1,2) b	80,6 (2,1) c	68,0 (2,9) d
Ano 2 (Junho 2014 – Maio 2015)				
Floresta				
Acícula	6,9 (0,1) a	5,9 (0,2) b	7,0 (0,3) a	5,2 (0,4) b
Galho	7,8 (0,1) c	6,7 (0,2) c	14,6 (0,6) a	11,5 (0,6) b
Casca	11,8 (0,1) a	10,7 (0,1) b	4,3 (0,1) c	3,7 (0,1) d
Fuste	58,7 (0,7) a	50,2 (1,3) b	34,0 (1,1) c	28,3 (1,3) d
Raiz (>10 mm)	19,2 (0,1) a	17,5 (0,2) b	17,8 (0,5) c	15,4 (0,6) d
Serapilheira				
Acícula	5,7 (0,5) a	5,0 (0,4) a	3,2 (0,2) b	3,0 (0,2) b
Material lenhoso	1,0 (0,2) a	0,7 (0,2) a	0,5 (0,1) b	0,5 (0,1) b
Tocos	3,0 (0,5) a	3,2 (0,5) a	4,2 (0,1) a	4,1 (0,3) a
Total	114,1 (2,2) a	99,8 (1,0) b	85,5 (3,2) c	71,7 (2,3) d

Nota: Valores entre parênteses representam o erro padrão dos dados ($n = 4$). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente entre tratamentos pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$)

Os valores encontrados neste estudo são similares aos relatados para *Eucalyptus grandis* com 7 anos de idade em uma área próxima (CAMPOE et al., 2012), que variaram de 85 a 114 Mg C ha^{-1} ; porém, são superiores aos valores mostrados por Maier et al. (2004) para *P. taeda*, na Carolina do Norte, aos 12 anos de idade sem nenhum manejo (15,7 Mg C ha^{-1}) e fertilizado e irrigado (33,3 Mg C ha^{-1}).

De todo o carbono estocado, a maior quantidade é encontrada na biomassa arbórea, onde os compartimentos fuste, casca, galho, acícula e raiz grossa representaram mais de 90% do total em ambas as espécies, sendo que no Ano 2 os valores foram de 64 Mg C ha^{-1} (*P. taeda* controle) a 104 Mg C ha^{-1} (*P. caribaea* var. *hondurensis* com manejo intensivo).

É possível observar que a biomassa total da floresta em pé teve aumento significativo com a aplicação de fertilizante e irrigação nos dois anos avaliados. Ao final do estudo, a diferença em biomassa entre os tratamentos com manejo intensivo e controle foi de 13,4 Mg C ha⁻¹ (15%) para o *P. caribaea* var. *hondurensis* e de 13,5 Mg C ha⁻¹ (21%) para o *P. taeda*.

O efeito positivo do manejo na produtividade da floresta pode ser atribuído ao aumento do índice de área foliar (JOKELA; DOUGHERTY; MARTIN, 2004; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004) e da eficiência em converter a luz interceptada em biomassa (CAMPOE et al., 2013). Gower et al. (1994) e Albaugh et al. (1998) citam, também, que este efeito é resultado de maior alocação para as folhas (tecido fotossintético) e menor para as raízes finas.

Neste estudo, as raízes finas não foram amostradas, porém a fertilização e irrigação na espécie tropical e subtropical aumentaram em 17% e em 30%, respectivamente, a biomassa de acículas produzidas nos dois anos avaliados. Isso resultou, no último ano, em índice de área foliar significativamente superior para os tratamentos com manejo intensivo (Figura 16).

Em média, para a espécie tropical, o lenho, casca, raiz grossa, galho e acícula representaram 55, 11, 19, 8 e 6%, respectivamente, do total de carbono estocado nas árvores no final do estudo (Figura 17). Para a espécie subtropical observa-se menor proporção para o lenho (44%) e casca (6%) e maior para galhos (19%), raízes grossas (23%) e acículas (9%). Além disso, os resultados apresentados neste estudo mostram que a diferença nos padrões de proporção da biomassa é observada entre espécies, mas entre manejo a variação é pequena.

Balbinot et al. (2008) avaliaram *P. taeda* e *P. elliotti* dos 5 aos 15 anos de idade, no Sul do Brasil, e concluíram que 21% da biomassa é destinada à raiz e 67% ao tronco. Egunjob e Bada (1979) conduzindo um estudo com *P. caribaea* l. na Nigéria, com 8 anos de idade, observaram valores de partição da biomassa total de 19% para raiz, 48% para o lenho, 9,9% para a casca, 8,9% para galho e 13% para acícula.

Figura 17 – Proporção de biomassa (%), aos 8,4 anos de idade, nas acículas, galhos, casca, lenho e raízes grossas (>10 mm) no *P. caribaea* var. *hondurensis* sem nenhum manejo (PCH SN), fertilizado e irrigado (PCH FI) e no *P. taeda* sem nenhum manejo (PTA SN) e fertilizada e irrigada (PTA FI)

No sudeste dos Estados Unidos há muita literatura sobre o tema com *P. taeda*. Maier et al. (2004) estudando a espécie aos 12 anos, observou que o maior reservatório de carbono nas árvores foi no tronco (45%), sendo que as raízes (grossas e finas) representam 27% do total estocado, tanto em parcelas sem manejo, quanto em parcelas fertilizadas e irrigadas.

Em um estudo com tratamentos similares feito por King et al. (1999), com plantio de 11 anos de idade, os valores de partição para raiz foram de 23%, para tronco de 48%, galho de 18% e acícula de 11%, não importando o manejo testado. Samuelson, Johnsen e Stokes (2004) encontraram para a mesma espécie, com idade de 6 anos, que 22-25% da biomassa total é representada pela raiz, 10% pela acícula, 16% pelo galho e 51% pelo tronco.

De uma maneira geral, a resposta da partição de biomassa depende da espécie (KING et al., 1999; COYLE; COLEMAN; AUBREY, 2008), da disponibilidade de recursos naturais (GOWER et al., 1994; ALBAUGH et al., 1998; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004; SAMUELSON et al., 2008) e, além disso, de acordo com a maioria destes estudos, outro fator determinante da partição é a idade do povoamento florestal.

Porém, muitas vezes não se encontra um padrão, como por exemplo, estudos com *P. taeda* mostraram que fertilização e irrigação aumentaram a fração da biomassa aérea e diminuíram a fração das raízes (ALBAUGH et al., 1998), e outros encontraram que essa proporção não mudou (COYLE; COLEMAN; AUBREY, 2008).

A razão para toda essa disparidade de informações se deve ao pouco entendimento de como a disponibilidade de recursos influencia o balanço de carbono total da floresta (BOWN et al., 2009), pois a biomassa é apenas uma parte de todo o carbono assimilado pelas árvores (FORRESTER; BAUHUS; COWIE, 2006). Além disso, Litton, Raich e Ryan (2007), em sua pesquisa, revelaram que a biomassa por si só é pouco relacionada com o fluxo de carbono e partição da fotossíntese, não devendo ser usada para inferi-los.

4.4 Balanço de carbono

4.4.1 Produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP)

A Tabela 7 mostra o balanço de carbono anual, por componente, para cada tratamento e ano analisado, e o Apêndice B descreve os resultados da análise de variância.

A ANPP foi significativamente diferente entre as espécies (Tabela 6), onde o *P. caribaea* var. *hondurensis* obteve fluxo 98% superior ao *P. taeda* no Ano 1, e 74% maior no Ano 2.

Tabela 6 – Resultado do teste de Tukey ($p = 0,05$) para as variáveis de produção de lenho, produtividade primária líquida (ANPP) e respiração da parte aérea (Ra). PCH = *P. caribaea* var. *hondurensis*; PTA = *P. taeda*; FI = fertilizado e irrigado; SN = controle; 1 = Junho 2013 a Maio 2014; 2 = Junho 2014 a Maio 2015

Variável (g C m ⁻² ano ⁻¹)	Espécie	Manejo		Ano	
		FI	SN	1	2
Lenho	PCH	1078 (204) Aa	901 (178) Ab	1273 (118) Aa	705 (134) Ab
	PTA	309 (63) Ba	289 (66) Ba	390 (195) Ba	208 (104) Ba
ANPP	PCH	1756 (309) Aa	1483 (268) Ab	2076 (167) Aa	1163 (175) Ab
	PTA	894 (120) Ba	822 (132) Ba	1045 (81) Ba	669 (77) Ba
Ra	PCH	2425 (126) Aa	2048 (370) Ab	2868 (231) Aa	1606 (242) Ab
	PTA	1234 (166) Ba	1135 (182) Ba	1444 (111) Ba	924 (107) Ba

Nota: Letras maiúsculas comparam médias de espécies em um mesmo manejo ou ano (comparação na coluna) e letras minúsculas comparam médias de manejo ou ano dentro de uma mesma espécie (comparação na linha). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente. Valores entre parêntesis representam o erro padrão dos dados ($n = 4$)

Os fluxos encontrados para a espécie tropical (1062 a $2250 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) são similares ou até superiores às produtividades de plantações de *Eucalyptus* pelo mundo, com 4 a 10 anos de idade, (GIARDINA et al., 2003; FORRESTER; BAUHUS; COWIE, 2006; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008; RYAN et al., 2010; CAMPOE et al., 2012; NOUVELLON et al., 2012), sendo encontrados nestes trabalhos variação de 750 a $2370 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Isso evidencia a elevada taxa de crescimento da espécie na área em estudo, já que dentre estes trabalhos citados alguns são no Brasil, onde o gênero *Eucalyptus* alcança suas maiores produtividades (GONÇALVES et al., 2004; STAPE et al., 2010).

Os valores encontrados para a espécie subtropical (627 a $1076 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) são menores do que o *P. caribaea* var. *hondurensis*, porém maiores do que muitos estudos realizados com diversas espécies de *Pinus* nos EUA (LITTON; RAICH; RYAN, 2007). Maier et al. (2004), estudando a mesma espécie subtropical aos 12 anos de idade, encontraram valores de ANPP variando de 357 a $840 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.

O manejo e o ano tiveram efeitos significativos na ANPP da espécie tropical (Tabela 6), sendo que a fertilização e irrigação aumentaram o fluxo em 19% comparado ao tratamento controle, enquanto a diferença entre os anos foi de 44% (Figura 18).

Figura 18 - Componentes da produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP) para o *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN) e para o *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN), nos dois anos avaliados. As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$). Produtividade primária líquida da Cf = acícula, do Cbr = galho, da Cba = casca e do Cw = lenho

Como mostrado nas Figuras 8, 9 e 10, entre 2013 e 2014 a área de estudo sofreu por 15 meses consecutivos (Julho de 2013 a Outubro de 2014) com baixa disponibilidade hídrica no solo, principalmente nos meses historicamente responsáveis por sua recarga hídrica. Como consequência, a água disponível do solo terminou o segundo ano de estudo a 70% de sua capacidade máxima (menos do que no primeiro ano).

A disponibilidade hídrica afeta fortemente a eficiência do processo de transformar energia luminosa, CO₂ e água em carboidrato, pois causa o fechamento dos estômatos da planta, restringe ou encerra a captura de CO₂ e cessa o crescimento do vegetal (LANDSBERG, 1997). Além disso, as raízes não conseguem absorver nutrientes de solo secos.

Concomitantemente, a produção de folhas é afetada. Segundo Sampson et al. (2001), as folhas produzidas no ano anterior pela árvore são uma das responsáveis pela recarga do estoque de carbono lábil, carboidratos não estruturais que são intermediários entre o carbono assimilado e o crescimento estrutural, durante a estação de pouco crescimento (neste caso inverno). Este reservatório de carbono lábil é essencial para a manutenção das taxas de crescimento no meio do verão quando a demanda de carbono ultrapassa o carbono capturado devido às altas temperaturas e ao estresse hídrico do solo e atmosférico.

Apesar dessa diferença climática entre os anos estudados e o manejo aplicado nos tratamentos, o *P. taeda* não respondeu significativamente a nenhum desses fatores (Tabela 6). Carneiro (2013) estudou as taxas fotossintéticas das duas espécies, aos 5 anos de idade, na mesma área experimental, e observou que o *P. taeda* possui baixa variação dessas taxas ao longo do ano e do dia, sendo assim, esta espécie mostrou-se pouco responsiva as mudanças do clima em relação a captura de carbono a nível foliar, já o *Pinus tropical* respondeu as essas mudanças. Portanto, o *P. taeda* parece responder mais lentamente a diferentes condições hídricas e nutricionais

Para o *P. caribaea* var. *hondurensis*, nos dois anos avaliados a produtividade do lenho foi o componente dominante da ANPP (61%), seguida da acícula (26%), casca (8%) e galho (5%) (Tabela 7 e Figura 18). Entretanto, para a espécie subtropical observa-se um padrão diferente, onde a produtividade de folhas foi o constituinte em maior quantidade da ANPP (47%), seguida pelo lenho (34%),

galho (14%) e casca (5%). Em valores absolutos, a produção de lenho da espécie tropical foi mais de três vezes superior a subtropical (Tabela 6).

A superioridade da produtividade primária líquida do tronco (lenho e casca) na espécie tropical é resultado de maior fração da GPP usada para produção de madeira (Figura 19b), porém essa fração não muda com o gradiente de produtividade.

Além disso, para as duas espécies maiores taxas de fotossíntese bruta anual (GPP), influenciada pelo manejo e clima, forneceram mais carbono para a produção de tronco (Figura 19a). O mesmo foi encontrado por Litton, Raich e Ryan (2007), onde para diferentes ecossistemas florestais os fluxos de carbono para as folhas e madeira aumentam linearmente com o aumento da GPP.

Por fim, nos constituintes acima do solo, a respiração autotrófica da parte aérea (soma da respiração das folhas, galhos e tronco) foi significativamente maior para o *P. caribaea* var. *hondurensis* do que o *P. taeda* (Tabela 6). Além disso, apenas na espécie tropical houve efeito do manejo, sendo o mesmo padrão encontrado nos resultados da ANPP, uma vez que a respiração foi calculada como uma fração deste fluxo.

A ideia de que a produtividade primária líquida é uma fração constante da GPP é baseada na suposição que o crescimento, fotossíntese e respiração são estreitamente ligados (AMTHOR, 1989 apud MAIER et al., 2004). Assim, o aumento ou diminuição na assimilação líquida, devido a mudanças na disponibilidade de recursos, será seguido por uma concomitante mudança na respiração e taxa de crescimento (RYAN et al., 1996, 2004). Além disso, Litton, Raich e Ryan (2007), através de uma extensa revisão de literatura com florestas de todo o mundo, observaram que a fração da GPP usada para respiração autotrófica da planta parece ser fortemente conservativa entre ecossistemas, sendo aproximadamente 49%.

Com esses dados pode-se verificar que o *P. caribaea* var. *hondurensis* tem maior produtividade primária líquida do que o *P. taeda*, bem como maiores taxas de respiração autotrófica da parte aérea, além de responder a fertilização e irrigação.

Figura 19 - Produtividade primária líquida do tronco em relação à produtividade primária bruta ou fotossíntese anual (GPP) (a) e partição de carbono para o tronco em relação à GPP (b)

Tabela 7 - Fluxos de carbono para os tratamentos irrigado e fertilizado (FI) e controle (SN) no *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) e *P. taeda* (PTA), nos dois anos avaliados

Fluxos (g C m ⁻² ano ⁻¹)	Ano 1 (Junho 13 – Maio 14)				Ano 2 (Junho 14 – Maio 15)			
	PCH		PTA		PCH		PTA	
	FI	SN	FI	SN	FI	SN	FI	SN
ANPP	2250	1904	1076	1017	1263	1062	712	627
Acículas	580	489	466	457	335	283	363	318
Galhos	101	87	158	121	62	57	101	88
Casca	184	167	54	57	95	82	28	25
Lenho	1385	1161	398	382	771	640	220	196
Ra	3106	2629	1485	1403	1745	1467	983	865
TBCF	1428	1456	2197	2139	763	786	1323	1150
Fluxo de CO ₂ do solo	1553	1517	2386	2308	959	968	1544	1411
Folhedo	411	349	294	286	249	209	265	252
Decomposição de tocos	-71	-76	-98	-96	-71	-76	-98	-96
Crescimento de raízes	143	134	122	109	75	81	73	77
Incremento de serapilheira	214	230	81	104	49	22	69	10
GPP	6784	5989	4758	4559	3771	3315	3018	2642
NEP	2125	1843	887	848	1067	880	491	366

Nota: ANPP = produtividade primária líquida da parte aérea; Ra = respiração autotrófica da parte aérea; TBCF = fluxo de carbono para o solo; GPP = produtividade primária bruta; NEP = Produtividade líquida do ecossistema

4.4.2 Fluxo de carbono para o solo (TBCF)

O fluxo de carbono para o solo (TBCF) foi influenciado pela espécie e pelo ano de avaliação, mas não apresentou diferença significativa entre os tratamentos fertilizado e irrigado e o sem nenhum manejo (Tabela 9).

O fluxo de CO₂ do solo (respiração do solo ou Fs) foi o de maior representatividade em todos os tratamentos em todo o período analisado, seguido da deposição de folheto (Fa) (Figura 20). Os três demais componentes (produtividade de raízes grossas ou Cr; serapilheira acumulada sobre o solo ou Cl; decomposição dos tocos da rotação anterior ou Ct) variaram em ordem de importância, dependendo da espécie e do ano de medição.

Figura 20 - Componentes usados no cálculo do fluxo de carbono para o solo (TBCF) nos tratamentos com *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN), e no *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN). Fs = Fluxo de CO₂ do solo; Fa = deposição de folheto; Δ diferença anual no carbono estocado nos compartimentos do solo. Ano 1 = Junho de 2013 a Maio de 2014; Ano 2 = Junho de 2014 a Maio de 2015

Durante os períodos de medições, a emissão de CO₂ do solo (Fs) foi, em média, no primeiro ano de 4,41 μmol m⁻² s⁻¹ e no segundo de 2,54 μmol m⁻² s⁻¹ para o *P. caribaea* var. *hondurensis*, e de 6,57 μmol m⁻² s⁻¹ e 3,85 μmol m⁻² s⁻¹, respectivamente, para o *P. taeda*. Os valores médios de fluxo de CO₂ do solo (μmol m² s⁻¹) de todas as mensurações realizadas estão apresentados na Figura 21, comparando os três pontos de coleta no solo (Item 3.7.3), em cada tratamento.

Pode-se observar que os maiores valores encontrados foram na posição 1 (em média 50% maior do que a posição 3) para as duas espécies, ou seja, no ponto mais próximo da árvore e onde há maior quantidade de raízes e atividade microbiológica.

Samuelson et al. (2004) e Wiseman e Seiler (2004) observaram que quanto mais próximo da árvore estiver o ponto de coleta maior os valores de respiração do solo, pois a respiração das raízes grossas (abaixo de 15 cm de profundidade do solo) representa mais da metade da respiração total das raízes (MAIER; KRESS, 2000), contribuindo mais do que a biomassa radicular logo abaixo dos anéis de medição.

Figura 21 - Valores médios do fluxo de CO₂ do solo para cada posição de coleta (1 – na linha de plantio; 2 – transição entre a linha e entrelinha; 3 – entrelinha) nos 4 tratamentos em estudo (PCH – *P. caribaea* var. *hondurensis*; PTA – *P. taeda*; FI – fertilizado e irrigado; SN – controle). As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$)

Através da Figura 22, que mostra a sazonalidade da respiração do solo em escala quinzenal, é possível verificar que no Ano 1 os maiores valores do fluxo no *Pinus* tropical ocorreram no verão (Dezembro 2013 – Março 2014) e para o subtropical no inverno (Junho – Setembro 2013), e os menores valores foram observados no outono (Março – Junho 2014) para ambas as espécies. Já no Ano 2, para todos os tratamentos, verificou-se maior fluxo no verão (Dezembro 2014- Março 2015) e menores no outono (Março – Junho 2015).

Vários são os fatores que influenciam as taxas de respiração do solo, sendo a temperatura do solo e seu teor de água os principais fatores abióticos (SINGH;

GUPTA, 1977). Há trabalhos que indicam a temperatura do solo como principal variável influenciadora (HAYNES; GOWER, 1995; SAMUELSON et al., 2004), e outros que encontraram melhor relação com a umidade do solo, especificamente quando a mesma se encontra baixa (CARLYLE; BA THAN, 1988; MAIER; KRESS, 2000; MAIER et al., 2004). Segundo Wiseman e Seiler (2004), a umidade do solo, tanto quando muito alta ou baixa, modifica a influência da temperatura do solo no fluxo de CO₂.

Neste estudo não foi possível avaliar a umidade do solo, porém a temperatura do solo foi medida por 9 meses consecutivos, mostrando que sua variação na escala diária foi pequena, sendo a diferença média entre a temperatura máxima e mínima de 1,4 °C.

A baixa amplitude da temperatura do solo era esperada, já que a área é bastante sombreada (fechamento da copa ocorreu entre os 4 e 5 anos de idade) e há grande quantidade de serapilheira sobre o solo. Os valores de respiração do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram correlacionados com os valores médios de temperatura do solo diária, resultando em uma fraca relação tanto na espécie tropical ($p < 0,001$; $R^2 = 0,12$) quanto na subtropical ($p < 0,001$; $R^2 = 0,11$).

Figura 22 - Fluxo de CO₂ do solo medido quinzenalmente, durante o período de 2 anos (Junho de 2013 a Maio de 2015), em resposta ao *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI) e controle (PCH SN), e ao *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN)

A respiração do solo acumulada durante o período de estudo é descrita na Figura 20 e Tabela 7, onde se observa o efeito da espécie e do ano de medição, porém não do manejo (Tabela 8).

Apesar de muitos trabalhos terem reportado que a utilização de fertilizantes reduz a atividade microbiana e de micorrizas no solo (FOSTER; BEAUCHAMP; CORKE, 1980; FOG, 1988; GIARDINA et al., 2003), diminuindo a respiração do solo, isto não ocorreu neste estudo, não havendo, portanto, diferença significativa entre os tratamentos com manejo intensivo e mínimo.

Tabela 8 - Médias dos valores de folhedo e fluxo de CO₂ do solo (Fs), que segundo a ANOVA (Apêndice B) tiveram interação entre ano avaliado (1 e 2) e espécies estudadas (PCH – *P. caribaea* var. *hondurensis* e PTA – *P. taeda*). Valores com letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p = 0,05$). Valores entre parêntesis representam o erro padrão dos dados ($n = 4$)

Variável (gC m ⁻² ano ⁻¹)	Ano	Espécie	
		PCH	PTA
Folhedo	1	380 (31) Aa	290 (15) Ba
	2	229 (13) Bb	259 (10) Aa
Fs	1	1535 (89) Ba	2347 (79) Aa
	2	963 (60) Bb	1478 (62) Ab

Nota: Letras maiúsculas comparam médias de espécies em um mesmo ano (comparação na linha) e letras minúsculas comparam anos de uma mesma espécie (comparação na coluna)

A respiração do solo foi significativamente menor para o *P. caribaea* var. *hondurensis* do que para o *P. taeda*, tanto no Ano 1 (1535 g C m⁻² ano⁻¹ contra 2347 g C m⁻² ano⁻¹, respectivamente) quanto no Ano 2 (963 g C m⁻² ano⁻¹ contra 1478 g C m⁻² ano⁻¹), sendo que a espécie tropical foi a que apresentou maior ANPP.

A maior liberação de CO₂ do solo pela espécie subtropical pode ser resultado do aumento da renovação de raízes finas, maior associação com micorrizas e de maior atividade microbiana do solo (respiração heterotrófica), porém nenhum desses fatores foi levantado no presente estudo. Trabalhos que avaliaram os constituintes da respiração do solo em diferentes espécies de *Pinus* aferiram que a respiração das raízes (autotrófica) representa de 45 a 78% do fluxo de CO₂ do solo total (HANSON et al., 2000; MAIER; KRESS, 2000; LAW; THORNTON; IRVINE, 2001).

Como o estoque de raízes grossas é maior na espécie tropical do que na subtropical (Tabela 5), embora a produção dessas raízes nos últimos dois anos tenha sido significativamente similar entre as espécies (Tabela 9), pode-se supor

que as maiores taxas de respiração do *P. taeda* são resultado da atividade das raízes finas, como seu maior *turnover*, e da respiração heterotrófica.

Os valores anuais de respiração do solo encontrados neste trabalho são compatíveis a resultados com *Eucalyptus* no Brasil (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008; RYAN et al., 2010; CAMPOE et al., 2012; NOUVELLON et al., 2012). Destes estudos, o conduzido por Stape, Binkley e Ryan (2008) no estado da Bahia relatou os maiores valores de F_s , variando de 1200 a 2500 g C m⁻² ano⁻¹, onde também foi encontrada a maior produtividade da espécie.

O carbono perdido pelo solo teve uma redução de 37% entre os períodos estudados, gerando uma diferença de 572 g C m⁻² ano⁻¹ para a espécie tropical e de 869 g C m⁻² ano⁻¹ para a espécie subtropical (Tabela 8).

A diferença de medição entre os anos pode estar relacionada, entre outros fatores, com a umidade do solo, variável não mensurada neste trabalho, ou sua capacidade de armazenamento de água, que caiu 11% entre o Ano 1 e Ano 2 (de 190 mm mês⁻¹ para 169 mm mês⁻¹). Maier et al. (2004) cita em seu trabalho que durante o verão, a alta umidade do solo aumentou significativamente a F_s nas parcelas irrigadas, pois a água do solo estava baixa neste período. Além disso, entre o Ano 1 e Ano 2 houve uma grande redução na produção de raízes grossas (Tabela 7 e 9).

As médias anuais de respiração do solo mostraram relação significativa com a ANPP e GPP nas duas espécies estudadas (Figura 23a e b). Portanto, nota-se uma tendência de aumento do fluxo de CO₂ do solo com o aumento da produtividade dos povoamentos ou maior taxa fotossintética da copa em resposta a maior disponibilidade de recursos, como já observado por Stape (2008) e Litton (2007).

Figura 23 – Relação entre o fluxo de CO₂ do solo e a produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP) (a) e entre a produtividade primária bruta (GPP) (b) para todas as parcelas nos dois anos avaliados

O folheto depositado anualmente foi significativamente maior nos tratamentos com manejo intensivo do que no controle (Tabela 9), com uma diferença de 11% entre os tratamentos. Houve, também, diferença entre as espécies estudadas, sendo 31% maior nos tratamentos de *P. caribaea* var. *hondurensis* do que nos de *P. taeda* no primeiro ano, porém no segundo ano a espécie subtropical teve uma deposição 13% maior do que a tropical (Tabela 8).

Tabela 9 – Médias das variáveis avaliadas para cada efeito principal (espécie, manejo e ano) que foi significativo pela ANOVA, sem haver interação. Valores dentro de cada efeito principal diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p = 0,05$). Valores entre parêntesis representam o erro padrão dos dados ($n = 4$)

Variável (gC m ⁻² ano ⁻¹)	Espécie		Manejo		Ano	
	PCH	PTA	FI	SN	1	2
Folheto			305 (36)	274 (32)		
ΔCt	-73 (11)	-97 (6)				
ΔCr					127 (18)	77 (13)
ΔCI	129 (73)	66 (28)			157 (50)	37(48)
TBCF	1108 (202)	1703 (254)			1805 (212)	1006 (149)
GPP	4964 (834)	3744 (528)	4582 (797)	4126 (715)	5522 (572)	3186 (345)

Nota: PCH = *P. caribaea* var. *hondurensis*; PTA = *P. taeda*; FI = fertilizado e irrigado; SN = controle; Δ diferença anual no carbono estocado no: Ct = troncos da rotação anterior; Cr = raízes grossas > 10 mm; CI = serapilheira depositada; TBCF = fluxo de carbono enviado para o solo; GPP = produtividade primária bruta

A diferença climática entre os anos estudados influenciou a queda de folheto, principalmente para a espécie tropical que teve uma redução de, aproximadamente, 40% na deposição, enquanto o *P. taeda* apenas 11%.

A Figura 24 ilustra a sazonalidade da queda de folheto para os 48 meses avaliados, onde se observa um pico de deposição em Março de 2014 e as menores taxas em Janeiro de 2015. Como já colocado anteriormente, o período mais quente e de menor precipitação resultou neste pico de deposição de folheto, provocando uma queda no IAF do mês de Abril de 2014 (Figura 16), que é o período de maiores valores no ano.

Dessa forma, no Ano 1, para todos os tratamentos, o verão (Dezembro 2013 – Março 2014) foi a estação com maior taxa de queda de folheto, representando em média 41% do total (155 g C m⁻² para o *P. caribaea* var. *hondurensis* e 121 g C m⁻² para o *P. taeda*), mostrando que até mesmo os tratamentos irrigados tiveram aumento da deposição devido ao déficit hídrico ocorrido atipicamente nesta estação (CROMER et al., 1984).

Já no segundo ano, com precipitação mais normalizada, notou-se que para a espécie tropical a maior deposição ocorreu no inverno (Junho – Setembro 2014), queda de 40% do total, e para a espécie subtropical no outono (Abril – Junho 2015), com 35% do total, sendo o valor absoluto de 92 g C m⁻² para ambas as espécies em cada estação citada.

As médias anuais do fluxo de CO₂ do solo foram correlacionadas com o folheto acumulado ao nível de parcela tanto para a espécie tropical ($R^2 = 0,58$; $p < 0,001$; $n = 16$) quanto para a subtropical ($R^2 = 0,3$; $p = 0,029$; $n = 16$). Raich; Nadelhoffer (1989), em uma escala global com dados de florestas boreal, temperada

e tropical, encontraram uma correlação significativamente positiva entre as medidas de respiração do solo e produção de folhodo.

Figura 24 – Queda de folhodo (acículas e material lenhoso) mensal, no Ano 1 (Junho 2013 a Maio 2014) e no Ano 2 (Junho 2014 a Maio 2015), para os tratamentos *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI), controle (PCH SN), *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN)

A produção média de raízes grossas (ΔCr) diferiu significativamente entre o Ano 1 e o Ano 2, ocorrendo uma redução de 44% entre os anos no *P. caribaea* var. *hondurensis* e de 35% no *P. taeda* (Tabela 7 e 9), devido a influência do clima nas taxas de crescimento das espécies (Figura 12). Neste componente observa-se que todos os tratamentos tiveram produtividades muito similares, não havendo diferenças significativas entre espécies e manejos (Tabela 7).

A diferença anual de carbono na serapilheira acumulada (ΔCl) foi expressivamente diferente entre os períodos de estudo (Tabela 9). No primeiro ano se encontrou variação de $222 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (*P. caribaea* var. *hondurensis*) a $93 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (*P. taeda*); já no segundo ano, esses valores caíram para 35 e $39 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. A liberação de carbono pela decomposição dos tocos (ΔCt) de *Eucalyptus saligna* da rotação anterior foi em média de $85 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.

Esses três componentes fluxos, representativos da mudança na quantidade de carbono armazenada abaixo do solo (ΔC – eq. 13), tiveram a menor contribuição no cálculo do TBCF. Dentre eles três, no Ano 1 o ΔCl foi a maior taxa encontrada na espécie tropical e o ΔCr foi a maior para a espécie subtropical. No Ano 2, houve

mudança com o ΔCr sendo o maior constituinte do *P. caribaea* var. *hondurensis* e o ΔCt para o *P. taeda*.

No Ano 1, o TBCF variou de 1428 g C m⁻² ano⁻¹ a 2197 g C m⁻² ano⁻¹ nos tratamentos com *P. caribaea* var. *hondurensis* e *P. taeda*, respectivamente. Já no Ano 2, esses valores caíram consideravelmente, resultando em fluxos de 763 g C m⁻² ano⁻¹ para a espécie tropical e 1323 g C m⁻² ano⁻¹ para a subtropical (Tabela 7).

Raich e Nadelhoffer (1989) utilizaram uma equação mais simples para estimativa do TBCF em florestas com dossel fechado, onde subtraíram da respiração do solo as taxas de deposição do folheto. O TBCF calculado neste trabalho através desta equação foi pouco subestimado, em média, 13% para a espécie tropical e 3% para a subtropical.

O TBCF foi positivamente correlacionado com a ANPP (*P. caribaea* var. *hondurensis* – $p = 0,004$ e $R^2 = 0,45$; *P. taeda* – $p < 0,001$ e $R^2 = 0,73$) e com a GPP (Figura 25a), contudo a partição do TBCF (TBCF:GPP) não foi significativa com o aumento da ANPP (Figura 25b), ou seja, o carbono enviado para baixo do solo aumenta com maior produtividade em uma proporção constante. Este resultado está de acordo com a hipótese que o fluxo de carbono enviado para a raiz é positivamente correlacionado com a produtividade acima do solo (NADELHOFFER; ABER; MELILLO, 1985; RAICH, 1989; NADELHOFFER, 1998).

Muitos estudos diferiram do comportamento encontrado no presente trabalho (GOWER; VOGT; GRIER, 1992; GOWER; ISEBRANDS; SHERIFF, 1995; HAYNES; GOWER, 1995; RAICH, 1998; MAIER et al., 2004), os quais afirmam que o aumento da disponibilidade nutricional tem causado mudança na partição de carbono da parte abaixo do solo para a parte aérea da floresta. Porém, outros estudos mostram que o TBCF pode tanto aumentar, como diminuir ou até se manter estável com aumento da ANPP (NADELHOFFER; ABER; MELILLO, 1985; RAICH; NADELHOFFER, 1989; LITTON; RYAN; KNIGHT, 2004; GIARDINA et al., 2005). Segundo Palmroth et al. (2006), essa aparente inconsistência de respostas pode ser explicada pela variação de IAF em cada estudo e por condições específicas do local e das espécies que controlam a fotossíntese da copa e o reservatório de carbono acima do solo.

As estimativas do TBCF deste trabalho para a espécie tropical são similares a valores encontrados para o *P. taeda* e *P. radiata* em outros países (RYAN et al., 1996; MAIER et al., 2004), que variaram de 625 a 1150 g C m⁻² ano⁻¹. Já para a espécie subtropical, pode-se comparar seus valores com produtivos experimentos

de *Eucalyptus*, onde encontraram fluxos de 1041 a 2466 g C m⁻² ano⁻¹ (GIARDINA et al., 2003; RYAN et al., 2004; FORRESTER; BAUHUS; COWIE, 2006; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008).

Figura 25 - Relação entre o fluxo de carbono enviado para o solo (TBCF) e a produtividade primária bruta (GPP) (a) e relação entre a partição do TBCF (TBCF:GPP) pela ANPP (b), para todas as parcelas nos dois anos avaliados

Dessa forma, com esses dados verificou-se que o *P. taeda* aloca mais carbono para baixo do solo do que o *P. caribaea* var. *hondurensis*, enquanto esta última espécie apresenta maior produtividade aérea.

É interessante observar o diferente padrão de comportamento das espécies, que apesar da irrigação e fertilização não influenciarem de maneira significativa os

resultados (Tabela 9), para a espécie tropical o valor de TCBF foi maior para o tratamento controle nos dois anos estudados, ocorrendo o contrário com a espécie subtropical (maiores valores nos tratamentos com manejo máximo).

4.4.3 Produtividade primária bruta (GPP) e partição de carbono

Após 4 anos de irrigação e duas fertilizações de cobertura, o manejo aumentou significativamente a produtividade primária bruta (GPP) do *P. caribaea* var. *hondurensis* em 13% no Ano 1 e Ano 2, atingindo valores de $6784 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e $3771 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-2}$, respectivamente (Tabela 7 e 9). No *P. taeda* esse aumento significativo foi de 4% no primeiro ano e de 14% no segundo, alcançando $4758 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e $3018 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-2}$, respectivamente.

Apesar de o sistema de irrigação ter funcionado apenas no primeiro ano avaliado, a segunda fertilização de cobertura, realizada em Junho de 2014, pode explicar o manejo máximo na espécie tropical ter mantido a mesma resposta em relação ao controle e o aumento de 10% na resposta da espécie subtropical.

Diversos estudos com *Pinus* e *Eucalyptus* têm mostrado forte relação entre aumento da disponibilidade de recursos naturais e aumento da GPP (RYAN et al., 1996, 2010; MAIER et al., 2004; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008; BOWN et al., 2009; CAMPOE et al., 2012). No sudeste dos EUA, Maier et al. (2004) encontrou um aumento de 103% da GPP através da adição de irrigação e fertilização de *P. taeda* comparado ao tratamento controle. Ryan et al. (1996) também verificaram aumento em 42% na GPP associado com aumento na disponibilidade nutricional do *P. radiata* aos 20 anos de idade.

A GPP também sofreu efeito significativo das espécies e anos estudados (Tabela 9). No primeiro ano, a GPP da espécie tropical foi 37% maior do que a subtropical, e no segundo ano esse valor caiu para 25%. Já a diferença entre o Ano 1 e Ano 2 foi de 45% para o *P. caribaea* var. *hondurensis* (6386 contra $3543 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) e de 39% para o *P. taeda* (4658 contra $2830 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$).

Os valores de GPP aferidos neste trabalho (Figura 26) são, em sua maioria, superiores ao relatado por Maier et al. (2004) e Ryan et al. (1996) em tratamentos irrigados e fertilizados em plantios de *Pinus* nos Estados Unidos e Austrália.

Na mesma região do presente estudo, porém com plantios de *Eucalyptus* com 5 a 7 anos de idade, Campoe et al. (2012) relatou valores de GPP de 2971 a

4132g C m⁻² ano⁻¹, de acordo com o gradiente de fertilidade da área, e Nouvellon et al. (2012) encontrou GPP de 4162 g C m⁻² ano⁻¹.

Figura 26 - Produtividade primária bruta (GPP) e seus constituintes, sendo eles produtividade primária líquida (ANPP) da madeira e das acículas, respiração da parte aérea da floresta (Ra) e fluxo de carbono para o solo (TBCF), nos dois anos de avaliação. PCH FI = *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado; PCH SN = *P. caribaea* var. *hondurensis* controle; PTA FI = *P. taeda* fertilizado e irrigado; PTA SN = *P. taeda* controle

A partição de carbono variou consideravelmente entre as espécies (Tabela 10), porém não teve efeito do manejo e do ano avaliado. Para o *P. caribaea* var. *hondurensis*, a fração alocada para respiração da parte aérea da floresta (Ra) foi o componente que mais contribuiu para a GPP (45%), seguida da ANPP (32%), sendo que 22% foi só para o tronco. Já o *P. taeda* teve como componente mais representativo da GPP o TBCF (45%), seguido da Ra (31%) e a partição para o tronco foi de apenas 9%.

Relações similares de carbono alocado abaixo do solo pela GPP foram encontradas em diversos estudos com outras coníferas, utilizando para o cálculo do TBCF a metodologia proposta por Raich and Nadelhoffer (1989), variando de 21 a 51% (RYAN et al., 1996; WILLIAMS et al., 1997; MAIER et al., 2004).

Dentro da espécie tropical pode-se notar que o tratamento fertilizado e irrigado alocou menor fração da GPP para baixo do solo comparado ao controle (de 24% para 21%) e aumentou a fração alocada na parte aérea da planta (de 32% para 33%), porém estas diferenças não foram significativas. O mesmo não foi observado

nos tratamentos da espécie subtropical, onde a fração da GPP particionada para a ANPP e TBCF não mudou.

Tabela 10 - Partição de carbono (C) para os tratamentos *P. caribaea* var. *hondurensis* fertilizado e irrigado (PCH FI), controle (PCH SN), *P. taeda* fertilizado e irrigado (PTA FI) e controle (PTA SN), para os dois anos avaliados. Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$)

Variáveis	PCH		PTA	
	FI	SN	FI	SN
Ano 1 (Junho 2013 – Maio 2014)				
Cbr:GPP	0,01	0,02	0,03	0,02
Cc:GPP	0,09	0,08	0,10	0,10
Ctr:GPP	0,23	0,22	0,10	0,10
ANPP:GPP	0,33 a	0,32 a	0,23 b	0,22 b
Ra:GPP	0,46 a	0,44 a	0,31 b	0,31 b
TBCF:GPP	0,21 b	0,24 b	0,46 a	0,47 a
Ano 2 (Junho 2014 – Maio 2015)				
Cbr:GPP	0,02	0,02	0,03	0,03
Cc:GPP	0,09	0,09	0,12	0,12
Ctr:GPP	0,22	0,21	0,08	0,08
ANPP:GPP	0,33 a	0,32 a	0,23 b	0,23 b
Ra:GPP	0,46 a	0,43 a	0,32 b	0,32 b
TBCF:GPP	0,21 b	0,25 b	0,45 a	0,45 a

Nota: Cbr, Cc, Ctr = diferença no carbono estocado na biomassa de galhos, folhas e tronco, respectivamente, em um ano. ANPP = produtividade primária líquida acima do solo; Ra = respiração autotrófica da parte aérea; TBCF = fluxo de carbono enviado para o solo

A fração de carbono particionado para o TBCF não mostrou correlação com a GPP para nenhuma das duas espécies ($0,326 < p < 0,855$ e $0,004 < R^2 < 0,07$), ao contrário do encontrado por Litton, Raich e Ryan (2007). Os autores documentaram queda na partição para o TBCF (TBCF:GPP) com o aumento da GPP em ecossistemas florestais, presumidamente porque o suprimento de recursos abaixo do solo também aumenta. Neste trabalho, o que causou o aumento ou diminuição do TBCF foi a quantidade de fotossíntese realizada pela floresta (Figura 25a).

As frações de carbono particionado para a ANPP, e especificamente para a produção de madeira (Figura 19b), também não se correlacionaram com a GPP ($p > 0,772$ e $R^2 < 0,01$) em nenhuma das espécies. Dessa forma, neste trabalho a disponibilidade de recursos naturais influenciou a fotossíntese bruta e a produção de madeira, mostrando que o efeito foi principalmente na GPP sem mudanças de partição em seus componentes.

Muitos trabalhos tem mostrado ampla gama de variação nos fluxos e partição com mudanças na disponibilidade de recursos. Stape, Binkley e Ryan (2008) também não encontraram mudança na partição de carbono com o aumento dos recursos hídricos (irrigação), sendo a diferença na produção justificada pelo aumento da captura de carbono. Já Ryan et al. (1996, 2004, 2010), Bown et al. (2009) e Maier et al. (2004) estudando diferentes espécies de *Pinus* e *Eucalyptus* relataram diminuição na partição abaixo do solo (TBCF), com o aumento dos recursos disponíveis (fertilização ou irrigação).

Esta elevada gama de respostas do fluxo de carbono enviado para o solo (TBCF) e partição de carbono em relação ao aumento na disponibilidade de recursos mostra que não se deve esperar nenhum padrão para uma aplicação generalizada, precisando que se entenda melhor os controladores das diversas respostas do fluxo abaixo do solo e da partição (RYAN et al., 2010).

Resumidamente, neste estudo a produção de madeira (lenho, casca e galho) do *P. caribaea* var. *hondurensis* é quase três vezes maior do que a do *P. taeda* com a mesma idade, implantados no mesmo local e sob as mesmas condições edafoclimáticas. Essa superioridade da espécie tropical é resultado de maior produtividade primária bruta (49%), maior partição de carbono para incremento de madeira (24% contra 12% na espécie subtropical) e menor partição para baixo do solo (TBCF) (23% contra 45% na espécie subtropical).

Portanto, a maior produção de madeira no *P. caribaea* var. *hondurensis* comparado ao *P. taeda* é explicada pelas suas diferenças na captura e partição de carbono, enquanto o efeito do manejo é resultado apenas do aumento da GPP.

4.4.4 Produtividade líquida do ecossistema (NEP)

A produtividade líquida do ecossistema (NEP) encontrada em todos os tratamentos foram positivas, indicando que tanto o *P. caribaea* var. *hondurensis* quanto o *P. taeda*, dos 6,5 aos 8,5 anos de idade, nesta área funcionaram como dreno de carbono, sequestrando de 366 g C m⁻² ano⁻¹ a 2125 g C m⁻² ano⁻¹ (Figura 27 e Tabela 7). Como era esperado, pelos resultados já apresentados, a espécie tropical sequestrou significativamente mais carbono do que a subtropical (Tabela 11).

Florestas de coníferas pelo mundo demoram a se tornar reservatórios de carbono, como uma floresta boreal que leva décadas para a produtividade primária líquida exceder a respiração heterotrófica (SCHULZE; WIRTH; HEIMANN, 2000). Law (2001) estudando *P. ponderosa* com 15 anos de idade nos EUA mostrou que esta floresta ainda é uma fonte de CO₂ e que sítios, na mesma área, com 50 e 250 anos são pequenos drenos, capturando de 20 a 100 g C m⁻² ano⁻¹.

Segundo Gower et al. (1994), a NEP, teoricamente, atingiria seu máximo perto do fechamento de copa do povoamento quando a relação de biomassa de folha pela biomassa de madeira é maior. No estudo de Maier (2004) a copa estava quase fechada, no *P. taeda* aos 12 anos de idade, com IAF de 3,5 m² m⁻², atingindo valores de NEP nas parcelas fertilizadas de aproximadamente 700 g C m⁻² ano⁻¹. Porém, neste mesmo estudo o tratamento controle teve NEP igual à zero, não sendo nem uma fonte nem dreno de carbono.

Figura 27 – Componentes da produtividade líquida do ecossistema para os tratamentos com *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH), *P. taeda* (PTA), fertilizado e irrigado (FI) e sem manejo (SN). Cr, CI, ANPP madeira, ANPP acícula e Ct são a mudança no carbono estocado na biomassa de raiz, na serapilheira, na biomassa de madeira (lenho, casca e galho), biomassa de acícula e de tocos da rotação anterior, respectivamente

O tempo necessário para uma floresta deixar de ser uma fonte de carbono e começar a sequestrar carbono depende de vários fatores, como clima, quantidade inicial de carbono no solo, produtividade da planta, idade, entre outros (MAIER, 2000; LAW, 2001). Entretanto, um destaque deve ser dado à fertilidade do solo, pois

nos trabalhos de Maier e Kress (2000) e Maier et al. (2004) a fertilização acelerou a transição da floresta de fonte para dreno de carbono em áreas de baixa fertilidade do solo.

Neste estudo, a fertilização e irrigação aumentaram significativamente os valores de NEP aos 7,5 e 8,5 anos de idade do *P. caribaea* var. *hondurensis*, sendo este aumento na ordem de 15% e 21%, respectivamente. Já a espécie subtropical não mostrou sofrer efeito do manejo (Tabela 11).

O ano avaliado também influenciou os valores de NEP para a espécie tropical apenas. Como colocado anteriormente, diversos fatores influenciam nos valores de carbono estocado e trocado com a atmosfera, sendo o clima um deles.

Tabela 11 - Médias dos valores de produtividade líquida do ecossistema (NEP), que segundo a ANOVA (Apêndice B) teve interação entre espécies (PCH – *P. caribaea* var. *hondurensis* e PTA – *P. taeda*), ano avaliado (1 e 2) e manejo (FI – fertilizado e irrigado; SN – controle). Valores com letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p = 0,05$). Valores entre parêntesis representam o erro padrão dos dados ($n = 4$)

Espécie	Ano		Manejo	
	1	2	FI	SN
PCH	1983 (145) Aa	973 (153) Ab	1595 (307) Aa	1361 (266) Ab
PTA	867 (97) Ba	428 (99) Ba	688 (132) Ba	607 (159) Ba

Nota: Letras maiúsculas comparam médias de espécies em um mesmo ano (comparação na coluna) e letras minúsculas comparam anos ou manejo de uma mesma espécie (comparação na linha)

5 CONCLUSÃO

Com base no estudo dos padrões de alocação e captura de carbono em plantios de *P. caribaea* var. *hondurensis* e *P. taeda*, dos 6,5 aos 8,5 anos de idade, submetidos a dois diferentes manejos (mínimo e intensivo), em Itatinga – SP, pode-se concluir que:

- A região de Itatinga mostrou-se apta para o desenvolvimento de ambas as espécies, sendo que o *P. caribaea* var. *hondurensis* apresentou produtividade do tronco superior ao *P. taeda*;
- O aumento da disponibilidade de recursos (nutrientes e água) afetou significativamente apenas a ANPP do *P. caribaea* var. *hondurensis* e a GPP de ambas as espécies, sendo os demais fluxos similares entre manejo intensivo e mínimo;
- A fertilização e irrigação não alteraram a partição da GPP para a ANPP e TBCF comparado ao tratamento controle, e a diferença em produção de madeira foi explicada principalmente pelas diferenças na GPP;
- Em cada espécie, a produtividade primária líquida do lenho, o TBCF e o fluxo de CO₂ do solo apresentaram relação positiva com a ANPP e GPP, porém a partição de carbono da GPP para estes fluxos não apresentou relação alguma;
- O triplo de produtividade primária líquida do tronco encontrada na espécie tropical em relação a subtropical foi um resultado combinado de maiores valores de GPP, bem como menor partição de carbono para o solo e maior partição para produtividade primária líquida da parte aérea, especificamente maior partição para a produção de tronco;
- Com a adoção do método de estudo do balanço de carbono permitiu obter-se conhecimentos que ajudaram a explicar a diferença de produtividade entre as espécies e como os recursos naturais influenciam no crescimento da floresta.

Assim, retornando às hipóteses desse estudo, temos:

- i) O *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tem maior GPP, maior TBCF e maior ANPP do que o *Pinus taeda*: **Não corroborada**;
- ii) Diferenças na produção de madeira entre as duas espécies podem ser explicadas pelas suas diferentes estratégias de partição de carbono, sendo que a espécie tropical tem menor partição para a raiz (TBCF:GPP) e maior para o tronco (Tronco NPP:GPP) do que a subtropical: **Corroborada**;
- iii) Os tratamentos com manejo mais intensivo, dentro de cada espécie, tem maior GPP, maior TBCF e menor partição para a raiz (TBCF:GPP) e maior para a parte aérea (ANPP:GPP) do que o tratamento controle: **Não corroborada**.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A.V.; SOUSA, V.A.; SHIMIZU, J.Y. Espécies de pinus mais plantadas no Brasil. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 135, 2013. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1672&subject=Pinus&title=Esp%C3%A9cies de pinus mais plantadas no Brasil>. Acesso em: 10 Mai 2015
- ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M.; JOHNSON, K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p. 3–19, 2004.
- ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M.; KRESS, L.W.; KING, J.S. Leaf area and above and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n. 2, p. 317–328, 1998.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**, Roma, 1998, 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56)
- ALVARES, C.A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de *Eucalyptus* no sul do estado de São Paulo**. 2011. 280p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARIAS, D.; CALVO-ALVARADO, J.; DOHRENBUSCH, a. Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 247, p. 185–193, 2007.
- ARNETH, A.; KELLIHER, F.; MCSEVENY, T.; BYERS, J. Net ecosystem productivity, net primary productivity and ecosystem carbon sequestration in a *Pinus radiata* plantation subject to soil water deficit. **Tree Physiology**, Victoria, v. 18, p. 785–793, 1998.
- BALBINOT, R.; VALÉRIO, Á.F.; SANQUETTA, C.R.; CALDEIRA, M.V.W.; SILVESTRE, R. Estoque de carbono em plantações de *Pinus spp.* em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317–324, 2008.
- BALDOCCHI, D.D.; HINCKS, B.B.; MEYERS, T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, Berlin, v. 69, n. 25, p. 1331 – 1340, 1988.
- BALLONI, E.A. **Efeitos da fertilização mineral sobre o desenvolvimento do *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* Barret et Golfari em solo de cerrado do estado de São Paulo**. 1984. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

BAYNES, J.; DUNN, G.M. Estimating foliage surface area index in 8-year-old stands of *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* of variable quality. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 27, n. 9, p. 1367–1375, 1997.

BILA, J.M.; SANQUETTA, C.R.; MACHADO, S.D.A. Classificação de sítios com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região de prata, minas gerais. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 465–474, 2012.

BIZON, J.M.C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**. 2005. 95p.

Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BOWN, H.E.; WATT, M.S.; CLINTON, P.W.; MASON, E.G.; WHITEHEAD, D. The influence of N and P supply and genotype on carbon flux and partitioning in potted *Pinus radiata* plants. **Tree Physiology**, Victoria, v. 29, n. 7, p. 857–868, 2009.

BROWN, S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate. **Unasylva** (FAO), Roma, v. 185, n. 47, p. 3 – 9, 1996.

BUTNOR, J.R.; JOHNSEN, K.H.; MAIER, C. a. Soil properties differently influence estimates of soil CO₂ efflux from three chamber-based measurement systems. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 73, n. 1, p. 283–301, 2005.

CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y. Stand-level patterns of carbon fluxes and partitioning in a *Eucalyptus grandis* plantation across a gradient of productivity, in São Paulo State, Brazil. **Tree Physiology**, Victoria, v. 32, n. 6, p. 696–706, 2012.

CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; BAUERLE, W.L.; BINKLEY, D.; LE MAIRE, G. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 14–20, 2013.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 470p.

CAPITANI, L.R.; SPELTZ, G.É.; CAMPOS, W. de O. Efeitos de calagem e adubação fosfatada no deselvovimento de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*.

Silvicultura, São Paulo, v. 7, n. 23, p. 235 – 238, 1982.

CARLYLE, J.; BA THAN, U. Abiotic controls of soil respiration beneath an eighteen-year-old *Pinus radiata* stand in south-eastern Australia. **The Journal of Ecology**, London, v. 76, n. 3, p. 654–662, 1988.

CARNEIRO, R.L. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Pinus taeda* em Itatinga, São Paulo**. 2013. 84p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

- CHAPIN, F.S.; WOODWELL, G.M.; RANDERSON, J.T.; RASTETTER, E.B.; LOVETT, G.M.; BALDOCCHI, D.D.; CLARK, D. a.; HARMON, M. E.; SCHIMEL, D. S.; VALENTINI, R.; WIRTH, C.; ABER, J. D.; COLE, J.J.; GOULDEN, M.L.; HARDEN, J.W.; HEIMANN, M.; HOWARTH, R.W.; MATSON, P.a.; MCGUIRE, a. D.; MELILLO, J. M.; MOONEY, H. a.; NEFF, J. C.; HOUGHTON, R. a.; PACE, M. L.; RYAN, M. G.; RUNNING, S. W.; SALA, O. E.; SCHLESINGER, W. H.; SCHULZE, E. D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. **Ecosystems**, Verona, v. 9, n. 7, p. 1041–1050, 2006.
- CHEN, J.M.; RICH, P.M.; GOWER, S.T.; NORMAN, J.M.; PLUMMER, S. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington, v. 102, n. D24, p. 429–443, 1997.
- CLARK, D. a; SANDRA, B.; DAVID, K.W.; CHAMBERS, J.Q.; THOMLINSON, J.R.; NI, J. Measuring Net Primary Production in Forests : Concepts and Field Methods. **Ecological Applications**, Washington, v. 11, n. 2, p. 356–370, 2001a.
- CLARK, D.A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D.W.; CHAMBERS, J.Q.; THOMLINSON, J.R.; NI, J.; HOLLAND, E.A. NPP in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, Washington, v. 11, p. 371 – 384, 2001b.
- COHEN, W.B.; HARMON, M.E.; WALLIN, D.O.; FIORELLA, M. Two Decades of Carbon Flux from Forests of the Pacific Northwest. **BioScience**, Washington, v. 46, n. 11, p. 836–844, 1996.
- CORRÊA, R.S.; BELLOTE, J.; FRANCISCO, A. Soil attributes and biomass yield from *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 181–187, 2011.
- COYLE, D.R.; COLEMAN, M.D.; AUBREY, D.P. Above- and below-ground biomass accumulation, production, and distribution of sweetgum and loblolly pine grown with irrigation and fertilization. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 6, p. 1335–1348, 2008.
- CROMER, R.N.; TOMPKINS, D.; BARR, N.J.; WILLIAMS, E.R.; STEWART, H.T. L. Litterfall in a *Pinus radiata* Forest - the effect of irrigation and fertilizer treatments. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 21, n. 1, p. 313–326, 1984.
- D'ANDRÉA, A.F. **Fluxo de CO₂ do solo em áreas com cafeeiros e povoamentos florestais**. 2004. 97p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- DAVIDSON, E.A.; SAVAGE, K.; BOLSTAD, P.; CLARK, D. A.; CURTIS, P.S.; ELLSWORTH, D.S.; HANSON, P.J.; LAW, B.E.; LUO, Y.; PREGITZER, K.S.; RANDOLPH, J.C.; ZAK, D. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 113, n. 1/4, p. 39–51, 2002.
- DEBLONDE, G.; PENNER, M.; ROYER, A. Measuring leaf area endex with the Li-Cor LAI-2000 in pine stands. **Ecology**, Durhan, v. 75, n. 5, p. 1507–1511, 1994.
- DELUCIA, E.H.; DRAKE, J.E.; THOMAS, R.B.; GONZALEZ-MELER, M. Forest carbon use efficiency: is respiration a constant fraction of gross primary production? **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n. 6, p. 1157–1167, 2007.

- DENMAN, K.L.; G. BRASSEUR, A. CHIDTHAISONG, P.; CIAIS, P.M.; COX, R.E. ;DICKINSON, D. ;HAUGLUSTAINE, C. ;HEINZE, E. ;HOLLAND, D. ;JACOB, U.; LOHMANN, S.; RAMACHANDRAN, P.L. ;DA SILVA; DIAS, S.C.; WOFSY ,X. ZHANG. Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: SOLOMON, S.D. QIN, M.; MANNING, Z.; CHEN, M.; MARQUIS, K.B. ;AVERYT, M.;TIGNOR AND H.L.; MILLER. **Climate Change: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 541-584.
- DIXON, R.K.R.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.A.; SOLOMON, a. M.; TREXLER, M.C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, Washington, v. 263, n. 20, p. 185–190, 1994.
- EGUNJOB, J.K.; BADA, S.O. Biomass and nutrient distribution in stands of *Pinus caribea* L. in the dry forest zone of Nigeria. **Biotropica**, Washington, v. 11, n. 2, p. 130–135, 1979.
- EPRON, D.; LACLAU, J.-P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONCALVES, J.L.M.; PONTON, S.; SETTE, C.R.; DELGADO-ROJAS, J.S.; BOUILLET, J.-P.; NOUVELLON, Y. Do changes in carbon allocation account for the growth response to potassium and sodium applications in tropical Eucalyptus plantations? **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 667–679, 2012.
- EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; RYAN, M.G. Introduction to the invited issue on carbon allocation of trees and forests. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 639–643, 2012.
- ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E.; REICH, P. Organic Carbon in Soils of the World. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 1, p. 192, 1993.
- FEDERICI, S.; TUBIELLO, F.N.; SALVATORE, M.; JACOBS, H.; SCHMIDHUBER, J. New estimates of CO₂ forest emissions and removals : 1990 – 2015. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 352, p. 89–98, 2015.
- FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D.; REISSMANN, C.B.; BELLOTE, A.F.J.; MARQUES, R. **Nutrição de Pinus no sul do Brasil**: diagnóstico e prioridades de pesquisa. Colombo: Embrapa Florestas, 2001.23p.
- FOG, K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. **Biological Reviews**, London, v. 63, n. 3, p. 433–462, 1988.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L. Carbon allocation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amesterdam, v. 233, n. 2/3, p. 275–284, 2006.
- FOSTER, N.W.; BEAUCHAMP, E.G.; CORKE, T. Microbial activity in a *Pinus banksiana* Lamb. forest floor amended with nitrogen and carbon. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 60, n. 2, p. 199 – 209, 1980.
- FOWELLS, H.A. **Silvics of forest trees of the united states**. Washington: USDA Forest Service, 1965. 761p.
- FREITAS, M.L.M.; ZANATTO, C.A.S.; MORAES, E.; LEMOS, S.V.; FERNANDES, A.C.; SEBBENN, A.M. Teste de procedências de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* aos 32 anos de idade em Bebedouro-SP. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 17–23, 2005.

GIARDINA, C.P.; COLEMAN, M.D.; HANCOCK, J.E.; KING, J.S.; LILLESKOV, E.A.; LOYA, W.M.; PREGITZER, K.S.; RYAN, M.G.; TRETTIN, C.C. The response of belowground carbon allocation in forests to global change. In: BINKLEY, D.; MENYAILO, O. **Tree species effects on soils: implications for global change**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2005. p. 119–154.

GIARDINA, C.P.; GIARDINA, C.P.; RYAN, M.G.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D.; BINKLEY, D.; FOWNES, J.H.; FOWNES, J.H. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in a tropical experimental forest. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, p. 1438–1450, 2003.

GIARDINA, C.P.; RYAN, M.G. Total belowground carbon allocation in a fast-growing *Eucalyptus* plantation estimated using a carbon balance approach. **Ecosystems**, Verona, v. 5, n. 5, p. 487–499, 2002.

GIFFORD, R. The global carbon cycle: A viewpoint on the missing sink. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 21, n. 1, p. 1–15, 1994.

GIFFORD, R.M. Plant respiration in productivity models: conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbon-cycle research. **Functional Plant Biology**, Canberra, v. 30, n. 2, p. 171–186, 2003.

GOLFARI, L. Coníferas aptas para repoblaciones forestales en el Estado de São Paulo. **Silvicultura**, São Paulo, v. 6, p. 7–62, 1987.

GONÇALVES, J.L.D.M.; ALVARES, C.A.; GONÇALVES, T.D. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 187–201, 2012.

GONÇALVES, J.L.D.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.-P.; SMETHURST, P.; GAVA, J. L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 45–61, 2004.

GOWER, S.T. Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. **Annual Review of Environment and Resources**, Palo Alto, v. 28, n. 1, p. 169–204, nov. 2003.

GOWER, S.T.; GHOLZ, H.L.; NAKANE, K.; BALDWIN, V.C. Production and carbon allocation patterns of pine forests. **Ecological Bulletins**, Copenhagen, n. 43, p. 115–135, 1994.

GOWER, S.T.; ISEBRANDS, J.G.; SHERIFF, D.W. Carbon allocation and accumulation in conifers. In: SMITH, W.K.; HINCKLEY, T.M. **Resource physiology of conifers: Acquisition, allocation and utilization**. San Diego: Academic Press, 1995. p. 217–254.

GOWER, S.T.; MCMURTRIE, R.E.; MURTY, D. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. **Trends in Ecology & Evolution**, Cambridge, v. 11, n. 9, p. 378–382, 1996.

GOWER, S.T.; NORMAN, J.M. Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. **Ecology**, Berlin, v. 72, n. 5, p. 1896–1900, 1991.

GOWER, S.T.; VOGT, K.A.; GRIER, C.C. Carbon dynamics of Rocky Mountain Douglas-Fir: Influence of water and nutrient availability. **Ecological Monographs**, Ithaca, v. 62, n. 1, p. 43–65, 1992.

HANSON, P.J.; EDWARDS, N.T.; GARTEN, C.T.; ANDREWS, J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration : A review of methods and observations. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 48, n. 1, p. 115–146, 2000.

HAYNES, B.E.; GOWER, S.T. Belowground carbon allocation in unfertilization and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin. **Tree Physiology**, Victoria, v. 15, n. 5, p. 317–325, 1995.

HIGA, R.C.V.; WREGE, M.S.; RADIN, B.; BRAGA, H.; CAVIGLIONE, J.H.; BOGNOLA, I.; ROSOT, M.A.D.; GARRASTAZU, MC.; CARAMORI, P.H.; OLIVEIRA, Y. M.M. de. **Zoneamento Climático: *Pinus taeda* no Sul do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 17p.

HÖGBERG, P.; NORDGREN, a; BUCHMANN, N.; TAYLOR, a F.; EKBLAD, a; HÖGBERG, M.N.; NYBERG, G.; OTTOSSON-LÖFVENIUS, M.; READ, D.J. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. **Nature**, London, v. 411, n. 6839, p. 789–792, 2001.

IBÁ. **Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2014**. Brasília, 2015. 64p.

JOKELA, E.J.; DOUGHERTY, P.M.; MARTIN, T. a. Production dynamics of intensively managed loblolly pine stands in the southern United States: A synthesis of seven long-term experiments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 117–130, 2004.

JOKELA, E.J.; MARTIN, T. a.; VOGEL, J.G. Twenty-five years of intensive forest management with southern pines: important lessons learned. **Journal of Forestry**, Christchurch, v. 108, n. Nov., p. 338–347, 2010.

KADEBA, O. Growth and nutrient accumulation by *Pinus caribaea* on three savanna sites in northern Nigeria. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 49, n. 2, p. 139–147, 1994.

KING, J.; ALBAUGH, T.; ALLEN, H.; KRESS, L. Stand-level allometry in *Pinus taeda* as affected by irrigation and fertilization. **Tree Physiology**, Oxford, v. 19, n. 12, p. 769–778, 1999.

KOHL, M.; LASCO, R.; CIFUENTES, M.; JONSSON, O.; KORHONEN, K.T.; MUNDHENK, P.; DE JESUS NAVAR, J.; STINSON, G. Changes in forest production, biomass and carbon: result from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 352, p. 21–34, 2015.

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

LANDSBERG, J.J. Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, n. 3, p. 385–397, 2003.

_____. The biophysical environment. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 65 – 96.

LANDSBERG, J.J.; SANDS, P. **Physiological ecology of forest production: principles, processes and models**. London: Academic Press, 2011. 331p.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, n. 3, p. 209–228, 1997.

LAW, B.; THORNTON, P.; IRVINE, J. Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 7, p. 755–777, 2001.

LE QUÉRÉ, C.; PETERS, G.P.; ANDRES, R.J.; ANDREW, R.M.; BODEN, T. a.; CIAIS, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HOUGHTON, R. a.; MARLAND, G.; MORIARTY, R.; SITCH, S.; TANS, P.; ARNETH, a.; ARVANITIS, a.; BAKKER, D.C.E.; BOPP, L.; CANADELL, J.G.; CHINI, L.P.; DONEY, S.C.; HARPER, a.; HARRIS, I.; HOUSE, J.I.; JAIN, a. K.; JONES, S.D.; KATO, E.; KEELING, R.F.; KLEIN GOLDEWIJK, K.; KÖRTZINGER, a.; KOVEN, C.; LEFÈVRE, N.; MAIGNAN, F.; OMAR, a.; ONO, T.; PARK, G.-H.; PFEIL, B.; POULTER, B.; RAUPACH, M.R.; REGNIER, P.; RÖDENBECK, C.; SAITO, S.; SCHWINGER, J.; SEGSCHNEIDER, J.; STOCKER, B.D.; TAKAHASHI, T.; TILBROOK, B.; VAN HEUVEN, S.; VIOVY, N.; WANNINKHOF, R.; WILTSHIRE, a.; ZAEHLE, S. Global carbon budget 2013. **Earth System Science Data**, Salt Lake City, v. 6, n. 1, p. 235–263, 2014.

LITTON, C.M.; RAICH, J.W. J.W.; RYAN, M.G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n. 10, p. 2089–2109, 2007.

LITTON, C.M.; RYAN, M.G.; KNIGHT, D.H. Effects of tree density and stand age on carbon allocation patterns in postfire lodgepole pine. **Ecological Applications**, Washington, v. 14, n. 2, p. 460–475, 2004.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2009. 316p.

MAIER, C.A.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M. Respiratory carbon use and carbon storage in mid-rotation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations: The effect of site resources on the stand carbon balance. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, n. 8, p. 1335–1350, 2004.

MAIER, C.A.; KRESS, L.W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 3, p. 347–359, 2000.

MARCHIORI, J.N.C. **Dendrologia das gimnospermas**. Santa Maria: UFSM, 2005. 160p.

MARTIN, T. a.; JOKELA, E. J. Stand development and production dynamics of loblolly pine under a range of cultural treatments in north-central Florida USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 39–58, 2004.

MILLER, H.G.; COOPER, J.M.; MILLER, J.D.; PAULINE, O.J.L. Nutrient cycles in pine and their adaptation to poor soils. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 9, p. 19–26, 1979.

MORO, L.; GATIBONI, L.C.; SIMONETE, M.A.; CASSOL, P.C.; CHAVES, D.M. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1181–1189, 2014.

MUNHOZ, J. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco**. 2011. 116p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

NADELHOFFER, K.J.; ABER, J.D.; MELILLO, J.M. Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: A new hypothesis. **Ecology**, Berlin, v. 66, n. 4, p. 1377–1390, 1985.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; EPRON, D.; LE MAIRE, G.; BONNEFOND, J.M.; GONCALVES, J.L.M.; BOUILLET, J.P. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 680–695, 2012.

ODUM, E.P.; BARRETT, G.W. **Fundamentos de ecologia**. 5. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 612p.

PALMROTH, S.; OREN, R.; MCCARTHY, H.R.; JOHNSON, K.H.; FINZI, A.C.; BUTNOR, J.R.; RYAN, M.G.; SCHLESINGER, W.H. Aboveground sink strength in forests controls the allocation of carbon below ground and its [CO₂]-induced enhancement. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 103, n. 51, p. 19362–19367, 2006.

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

PERRY, J.P. **The pines of Mexico and Central America**. Portland: Timber Press, 1991. 231p.

PINTO JÚNIOR, J.E.; SANTOS, P.E.T. dos; AGUIAR, A.V.; KALIL FILHO, N.A.; PALUDZYSZYN FILHO, E.; STURION, J.A.; RESENDE, M.D.V.; SOUSA, V.A. **Melhoramento genético de espécies arbóreas na Embrapa Florestas: uma visão histórica**. Colombo: Embrapa Florestas, 2013. 109p.

POGGIANI, F. **Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus*. Implicações silviculturais**. 1985. 211p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing v. 3.3**. Vienna, 2014. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 15 Set 2014.

RAICH, J.W. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rain forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 107, n. 1, p. 309–318, 1998.

RAICH, J.W.; NADELHOFFER, K.J.K. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. **Ecology**, Berlin, v. 70, n. 5, p. 1346–1354, 1989.

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

Relatório anual de resultados do Projeto Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil - PPPIB (ano base 2014), 2015. 27p.

- ROCHA, J.H.T. **Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis***. 2014. 123p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de Balanços Hídricos: Normal, Seqüencial, de Cultura e de Produtividade Real e Potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133–137, 2002.
- RYAN, M.G. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems. **Tree physiology**, Oxford, v. 9, n. 1/2, p. 255–266, 1991.
- RYAN, M.G.; BINKLEY, D.; FOWNES, J.H. Age-related decline in forest productivity: pattern and process. **Advances in Ecological Research**, London, v. 27, p. 213–262, 1997.
- RYAN, M.G.; BINKLEY, D.; FOWNES, J.H.; GIARDINA, C.P.; SENOCK, R.S. An experimental test of the causes of forest growth decline with stand age. **Ecological Monographs**, Ithaca, v. 74, n. 3, p. 393–414, 2004.
- RYAN, M.G.; GOWER, S.T. Annual carbon cost autotrophic respiration boreal forest ecosystems in relation to species and climate. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 102, n. 24, p. 28871–28883, 1997.
- RYAN, M.G.; HUBBARD, R.M.; PONGRACIC, S.; RAISON, R.J.; MURTRIE, R.E. M.C. Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status. **Tree physiology**, Oxford, v. 16, n. 3, p. 333–343, 1996.
- RYAN, M.G.; LAW, B.E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 73, n. 1, p. 3–27, 2005.
- RYAN, M.G.; STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. a.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M. N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1695–1703, 2010.
- SAINT-ANDRÉ, L.; M'BOU, A.T.; MABIALA, A.; MOUVONDY, W.; JOURDAN, C.; ROUPSARD, O.; DELEPORTE, P.; HAMEL, O.; NOUVELLON, Y. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 205, n. 1/3, p. 199–214, 2005.
- SAMPSON, D. a.; JOHNSEN, K.H.; LUDOVICI, K.H.; ALBAUGH, T.J.; MAIER, C. a. Stand-scale correspondence in empirical and simulated labile carbohydrates in loblolly pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, n. 1, p. 60–68, 2001.
- SAMUELSON, L.J.; BUTNOR, J.; MAIER, C.; STOKES, T. a.; JOHNSEN, K.; KANE, M. Growth and physiology of loblolly pine in response to long-term resource management: defining growth potential in the southern United States. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 4, p. 721–732, 2008.

SAMUELSON, L.J.; EBERHARDT, T.L.; BUTNOR, J.R.; STOKES, T. a.; JOHNSEN, K. H. Maximum growth potential in loblolly pine: results from a 47-year-old spacing study in Hawaii. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, n. 10, p. 1914–1929, 2010.

SAMUELSON, L.J.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 59–70, 2004.

SAMUELSON, L.J.; JOHNSEN, K.; STOKES, T.; LU, W. Intensive management modifies soil CO₂ efflux in 6-year-old *Pinus taeda* L. stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 200, n. 1/3, p. 335–345, 2004.

SCHÄFER, K.V.R.; OREN, R.; ELLSWORTH, D.S.; LAI, C.T.; HERRICK, J.D.; FINZI, A.C.; RICHTER, D.D.; KATUL, G.G. Exposure to an enriched CO₂ atmosphere alters carbon assimilation and allocation in a pine forest ecosystem. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, n. 10, p. 1378–1400, 2003.

SCHULTZ, R. P. **Loblolly pine: the ecology and culture of loblolly pine (*Pinus taeda* L.)**. New Orleans: USDA, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1997. 493p.

SCHULZE, E.D.; WIRTH, C.; HEIMANN, M. Managing forests after Kyoto. **Science**, Washington, v. 289, p. 2058–2059, 2000.

SCHUMACHER, M.V.; WITSCHORECK, R.; CALDEIRA, M.V.W.; WATZLAWICK, L.F. Estoque de carbono em florestas de *Pinus taeda* L. e *Acacia mearnsii* De Wild. plantadas no Estado do Rio Grande do Sul - Brasil. In: SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B.; GOMES, F. DOS S. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 141–152.

SHIMIZU, J.Y. Pinus na silvicultura brasileira. **Revista da Madeira**, 2006. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=952&subject=Esp%C3%A9cies&title=Pinus na silvicultura brasileira](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=952&subject=Esp%C3%A9cies&title=Pinus%20na%20silvicultura%20brasileira)>. Acesso em: 20 Abr 2015.

SHIMIZU, J.Y.; HIGA, A.R. Variação racial do *Pinus taeda* L. no sul do Brasil até o sexto ano de idade. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n. 2, p. 1–25, 1981.

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

SICARD, C.; SAINT-ANDRE, L.; GELHAYE, D.; RANGER, J. Effect of initial fertilisation on biomass and nutrient content of Norway spruce and Douglas-fir plantations at the same site. **Trees**, Berlin, v. 20, n. 2, p. 229–246, 2006.

SILVA JÚNIOR, F.G. Utilização múltipla de madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de celulose kraft. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 9, n. 27, p. 56–62, 1993.

SINGH, J.S.; GUPTA, S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. **The Botanical Review**, New York, v. 43, n. 4, p. 449–528, 1977.

SMITH, F.W.; RESH, S.C. A decrease in wood production and below-ground carbon allocation in *Pinus contorta* forests. **Forest Science**, Bethesda, v. 45, n. 3, p. 333–341, 1999.

SPRUGEL, D.G.; RYAN, M.G.; BROOKS, J.R.; VOGT, K.A.; MARTIN, T.A. Respiration from the organ level to the stand. In: SMITH, W.K.; HINCKLEY, T.M. **Resource physiology of conifers: acquisition, allocation and utilization**. San Diego: Academic Press, 1995. p. 255–300.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 3-4, p. 920–930, 2008.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R. a.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.D.A; LIMA, A.M N.; GAVA, J.L.; LEITE, F P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G. C.; AZEVEDO, M.R. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010.

STENBERG, P. Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 1–8, 1996.

WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J.; WILLIAMS, M. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? **Tree Physiology**, Victoria, v. 18, n. 2, p. 129–134, 1998.

WEISS, M.; BARET, F.; SMITH, G.J.; JONCKHEERE, I.; COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 121, n. 1/2, p. 37–53, 2004.

WILLIAMS, M.; RASTETTER, E.B.; FERNANDES, D.N.; GOULDEN, M.L.; SHAVER, G.R.; JOHNSON, L.C. Predicting Gross Primary Productivity in Terrestrial Ecosystems. **Ecological Applications**, Washington, v. 7, n. 3, p. 882–894, 1997.

WISEMAN, P.E.; SEILER, J.R. Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 2/3, p. 297–311, 2004.

WOODWELL, G.M.; WHITTAKER, R.H. Primary production in terrestrial ecosystems. **American Zoologist**, Utica, v. 8, n. 1, p. 19–30, 1968.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Descrição do método de calibração dos aparelhos medidores de fluxo de CO₂ do solo, LI-8100 e PPSytem

Em Abril de 2014 foi realizada uma medição nas 16 parcelas de estudo com os aparelhos PPSytem (com uma câmara SRC-1 adaptada com diâmetro de 20 cm) e LI-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, USA). As leituras foram realizadas durante todo o dia, sendo que primeiro media-se os anéis com o PPSytem e logo em seguida usava-se o LI-8100. O fluxo de CO₂ médio das parcelas variou de 2 a 5,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para o PPSytem e de 3,5 a 6,4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para o LI-COR. Os dados de respiração média do solo para cada parcela tiveram correlação, gerando em uma equação de regressão com intercepto não significativo (LI-COR = 1,64 x PPSystems, $R^2 = 0,56$, $P < 0,01$). Como diversos estudos apontam para estimativas mais precisas com o uso do aparelho LI-COR, no presente trabalho foi usada essa equação para calibrar os dados gerados pelo PPSytem.

APÊNDICE B – Resultado da análise de variância (ANOVA) com medidas repetidas apresentando a significância dos efeitos principais de espécie (S), manejo (M) e ano (A) ou interação entre espécie e manejo (SxM), espécie e ano (SxA), manejo e ano (MxA) e espécie, manejo e ano (SxMxA) como: ns, não significativo; * significativo a $P < 0,05$; ** significativo a $P < 0,01$; *** significativo a $P < 0,001$

Variáveis	ANOVA						
	S	M	A	SxM	SxA	MxA	SxMxA
ANPP	***	**	***	*	*	ns	ns
Acículas	ns	**	***	ns	*	ns	ns
Galhos	***	**	*	ns	ns	ns	ns
Casca	***	*	***	ns	*	ns	ns
Lenho	***	**	**	*	*	ns	ns
Ra	***	**	***	*	*	ns	ns
TBCF	***	ns	***	ns	ns	ns	ns
Fluxo de CO ₂ do solo	***	ns	***	ns	*	ns	ns
Folhedo	*	*	**	ns	**	ns	ns
Decomposição de tocos	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Crescimento de raízes	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
Incremento de serapilheira	***	ns	*	ns	ns	ns	ns
GPP	***	**	***	ns	ns	ns	ns
NEP	***	**	***	*	*	ns	ns

ANPP = produtividade primária líquida da parte aérea; Ra = respiração autotrófica da parte aérea; TBCF = fluxo de carbono enviado para o solo; GPP = produtividade primária bruta; NEP = produtividade líquida do ecossistema