

GABRIELA CAROLINA VILLAMAGUA VERGARA

**ECOFISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE *Bambusa*, *Eucalyptus* e *Salix* EM
SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO**

Botucatu

2018

GABRIELA CAROLINA VILLAMAGUA VERGARA

**ECOFISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE *Bambusa*, *Eucalyptus* e *Salix* EM
SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutora em Ciência Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças

Co-orientador: Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

V494e Vergara, Gabriela Carolina Villamagua, 1980-
Ecofisiologia e produtividade de *Bambusa*, *Eucalyptus* e *Salix* em sistemas florestais de curta rotação / Gabriela Carolina Villamagua Vergara. - Botucatu: [s.n.], 2018
104 p.: fots. color., grafs., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2018
Orientador: Kléber Pereira Lanças
Coorientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra
Inclui bibliografia

1. Florestas. 2. Ecofisiologia vegetal. 3. Biomassa aérea. 4. Eficiência de transpiração. I. Lanças, Kléber Pereira. II. Guerra, Saulo Philipe Sebastião. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ECOFISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE *Bambusa*, *Eucalyptus* e *Salix* EM SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO

AUTORA: GABRIELA CAROLINA VILLAMAGUA VERGARA

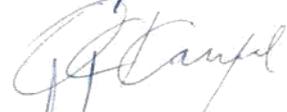
ORIENTADOR: KLEBER PEREIRA LANÇAS

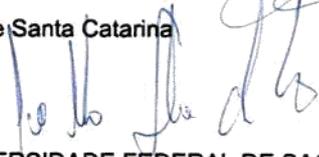
COORIENTADOR: SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

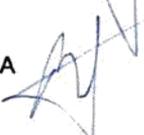
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIA FLORESTAL, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA 
Dep de Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA 
Depto de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. OTÁVIO CAMARGO CAMPOE 
Campus Curitibanos / Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. JOSÉ MAURO SANTANA DA SILVA 
Departamento de Ciências Ambientais / UNIVERSIDADE FEDERAL DE SAO CARLOS

Prof. Dr. RODRIGO EIJI HAKAMADA 
- / São Paulo

Botucatu, 04 de junho de 2018.

*A minha mãe Carolina,
principal fonte de amor, apoio e inspiração,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

A minha família, Rolando Ramiro, Ramiro Ernesto, Sebastián e em especial a minha avó Norma, pelo apoio, compreensão e carinho nesta longa caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças e co-orientador Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra, pela oportunidade dada, ajuda e colaboração para realização do projeto de doutorado.

Aos professores, Alexandre Dal Pai, Éder Aparecido Garcia, Marcelo de Almeida Silva, Otávio Camargo Campoe, Rodrigo Hakamada e José Mauro Santana da Silva pelas contribuições feitas na qualificação e defesa desta tese.

Ao professor Dr. José Raimundo de Souza Passos, pela colaboração e ensinamentos na parte estatística desta tese.

Ao Programa de Apoio a Estudantes Estrangeiros de Doutorado (PAEDEX) pela bolsa concedida.

A Faculdade de Ciências Agronômicas / UNESP – Campus de Botucatu, pela estrutura e apoio em todas as frentes de ensino e pesquisa; especialmente aos docentes e funcionários do Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia e Departamento de Ciência Florestal; ao pessoal da Biblioteca, Seção de Pós-Graduação e Manutenção das fazendas experimentais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pelos ensinamentos, apoio na execução das análises nutricionais do projeto de tese, ajuda econômica para a participação em eventos científicos, amizade, sugestões, e conselhos nesta caminhada, em especial aos docentes Magali Ribeiro Da Silva, Iraê Amaral Guerrini, Vera Lex Engel e Edson Luiz Furtado.

Ao Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia – LABB, Laboratório de Ecofisiologia Aplicada à Agricultura – LECA, Laboratório de Ecologia Restauração Florestal – LERF e Laboratório de Controle Biológico de Plagas Florestais – LCBPF, que disponibilizaram o espaço físico, material vegetativo, os equipamentos e suporte para o desenvolvimento do projeto de tese.

Ao pessoal do LABB e agregados pela ajuda na instalação do experimento, manutenção da área, trabalhos de campo, trocas de ideias e pelas muitas gargalhadas; principalmente: Carla Brito, Mariana Montelatto, Breno Lima, Fernanda Bortolheiro, Emanuel Spadim, André Merthan, Stephanie Vaz Martins, Fabiana Castanho, Breno Kawasaki, Beatriz Zerbinato, Julia Faria, Humberto Junior, Marcelo Denadai, Jorge Malatrasi, Elaine Leonello, Barbara Lopes, Dany Caldeira, Diana Villota, Isabela Gonçalves, Julia Bergamin, Raoni Melo, Rafael Soler, André Vitor Manso, Murilo de Oliveira, Samara Maschetti e Bruna Ferregutti.

Um agradecimento especial a Carla Brito e Mariana Montelatto, pela excelente parceria nos trabalhos de campo, compreensão, amizade e carinho durante o dia-a-dia.

À minha equipe editora, Giulia Caterina, Vera Carvalho Silva Santos, Humberto Junior, Dany Caldeira, Fabiana Morbi Fernandes e Breno Lima, pelas aulas de português intensivas, críticas construtivas, ótimos momentos de aprendizagem e descontração; pelas longas conversas sobre análises de dados, conversas transcendentais e não transcendentais, obrigada!

As minhas amigas, Priscila Prado, Natalia Samaniego, Marjorie Diaz, Adriana Baltodano, Consuelo Maldonado, Luz María Castro e Johana Muñoz, muito obrigada pelo apoio, amizade e cumplicidade nesse período de minha vida.

A minha família no Brasil, Vera Carvalho Silva Santos, Barbara Lopes, Guilherme Franceschini, Luísa Lopes, Glaucia Santos, Maiara Gonçalves, Dany, Alberto e Ana Luísa Caldeira, a extinta república feminina de pós-graduação “Sem Nome”, república de graduação “Erva Doce”, Vanessa Polonio, Giulia Catarina, Carla Brito, Mariana Montelatto, Fabiana Morbi Fernandes e Diana Villota, que me proporcionaram ótimos momentos de descontração e tornaram minha estadia aqui mais agradável. GRACIAS!

As minhas amigadas, Andrea Hidalgo, Jimena Cisneros, Marta Erazo, Andrea Aguirre, Amaranta e Monica Maldonado, Alejandra Ramirez, Susan Butrón, Daniel Segura e Jean Pierre Morales, obrigada pela torcida!

Enfim, agradeço a todas as pessoas, cujos nomes agora se me escapam, que de uma maneira ou de outra contribuíram direta ou indiretamente na conclusão dessa tese.

“Muchas veces salimos en busca de una cosa y encontramos otra”.

Neem Karoli Baba

RESUMO

Com a necessidade de buscar espécies florestais mais eficientes na utilização dos recursos naturais como luz, água e nutrientes, o que pode possibilitar um incremento da biomassa da parte aérea, o objetivo do presente trabalho foi o de quantificar as taxas de crescimento, eficiência da utilização da luz, água e nutrientes de florestas energéticas sob mesmas condições de solo, altitude e manejo. Foram utilizados plantios adensados de *Bambusa vulgaris*, híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla* – clone AEC-144, híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* - clone LW07 e *Salix nigra*. A determinação da produtividade primária líquida do tronco (PPLT), eficiência do uso da luz (EUL), eficiência do uso da água (EUA) foram obtidas através de acompanhamentos mensais e individuais em 15 plantas por espécie, no período de 12 meses. Foi obtido dados de: diâmetro e altura total das plantas, e posteriormente, taxa fotossintética (A), taxa transpiratória (E) e condutância estomática (gs). Foi realizada ainda a determinação do índice de vegetação e a coleta de amostras para determinação de macro e micronutrientes em laboratório. A espécie *B. vulgaris* apresentou o maior valor de biomassa por planta e, conseqüentemente, os maiores incrementos em matéria seca por planta ($8,07 \text{ kg pl}^{-1}$ e $1,56 \text{ kg pl}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente), no entanto, observou-se que clone de *E. urophylla* AEC-144 obteve maior eficiência no uso da luz por área ($1,80 \text{ g MJ}^{-1}$) e maior eficiência intrínseca no uso da água ($68,09 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$). Em relação à eficiência do uso da água, o clone *E. grandis* × *E. urophylla* - LW07 apresentou o maior valor ($4,93 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$). Nota-se que houve diferença em relação ao acúmulo de nutrientes entre as espécies estudadas, sendo que os maiores valores obtidos foi observado em *B. vulgaris*.

Palavras-chave: PPL. Biomassa aérea. APAR. Eficiência de transpiração. EUN.

ABSTRACT

In the search for forest species more efficient in the use of resources (light, water and nutrients) to increase aerial biomass, this study aimed to quantify the growth, light, water and nutrients use efficiency of short rotation plantations under the same conditions of soil altitude and management of *Bambusa vulgaris*, the spontaneous hybrid of *Eucalyptus urophylla* - clone AEC-144, interspecific hybrid of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* - clone LW07 and *Salix nigra*. To determine trunk net primary productivity (TNPP), light use efficiency (LUE) and water use efficiency (WUE), 15 plants per treatment were monitored monthly for 12 months. Plants diameter and total height were collected, as well as photosynthetic rate (A), transpiration rate (E) and stomatal conductance (gs), using infrared gas analyzer (IRGA) (LI-COR 6400). Vegetation index was also obtained using AccuPAR (LP-80) ceptometer and were collected samples for determination of macro and micronutrients in the laboratory. *Bambusa vulgaris* was the species that obtained the highest biomass per plant ratio and consequently higher net primary productivity (8.07 kg pl⁻¹ and 1.56 kg pl⁻¹ year⁻¹, respectively), however, clone AEC-144 showed higher light use efficiency per area (1.80 g MJ⁻¹) and higher intrinsic water use efficiency (68.09 μmol CO₂ mol H₂O⁻¹). Clone LW07 obtained the highest value (4.93 μmol CO₂ mol H₂O⁻¹) of instantaneous water use efficiency, when compared to other species. There was a difference in nutrient accumulation between species, and the highest values were observed in *Bambusa vulgaris*.

Keywords: NPP. Biomass above ground. APAR. Transpiration efficiency. NUE

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
Sistemas florestais de curta rotação – SFCR	18
Uso energético dos gêneros <i>Eucalyptus</i> , <i>Bambusa</i> e <i>Salix</i>	19
Produtividade primária líquida – PPL	22
Indicadores ecofisiológicos de resposta	23
CAPÍTULO 1 - EFICIÊNCIA NO USO DA LUZ E DA ÁGUA NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA E PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA LÍQUIDA DO TRONCO DE <i>Bambusa</i>, <i>Eucalyptus</i> e <i>Salix</i> EM SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO	31
1.1 Introdução	32
1.2 Material e métodos	35
1.3 Resultados	44
1.4 Discussão.....	56
1.5 Conclusões	66
Referências	68
CAPÍTULO 2 - ACUMULACIÓN DE BIOMASSA E NUTRIENTES DE <i>Bambusa</i>, <i>Eucalyptus</i> e <i>Salix</i> EN SISTEMAS FORESTALES DE ROTACIÓN CORTA	75
2.1 Introducción	77
2.2 Material e métodos	78
2.3 Resultados	81
2.4 Discusión.....	86
2.5 Conclusiones	89
Referencias	90
CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS	97

INTRODUÇÃO GERAL

A crise energética mundial ocasionada pelo esgotamento dos combustíveis fósseis e a necessidade de reduzir as emissões de CO₂, têm incentivado a busca por novas fontes de energia renovável. O uso da biomassa vegetal como matéria prima para a produção de biocombustíveis pode contribuir na redução global de emissões de gases de efeito estufa, uma vez que permite a absorção de CO₂ no crescimento da planta.

Muitas espécies vegetais têm sido estudadas para a produção de biocombustíveis, como os de primeira geração (1G), que são produzidos a partir de cultivos alimentares, todavia, ainda ocorrem críticas por problemas de sustentabilidade pela sua saída da cadeia produtiva agrícola alimentícia, ocasionando assim escassez e aumento nos preços dos alimentos básicos. Em função disso, espécies sem valor nutricional têm-se tornado objeto de estudos para a geração de biocombustíveis de segunda geração (2G) a partir de cultivos energéticos ricos em celulose e lignina, como as espécies florestais. O desenvolvimento de biocombustíveis de 2G oferece a vantagem de evitar a competição com a produção de alimentos e utilizando assim a matéria prima para explorar os solos marginais, aqueles não aptos para a produção de alimentos.

Com o objetivo de diversificar a matriz energética brasileira e aumentar a competitividade da biomassa florestal surgem os sistemas florestais de curta rotação - SFCR, como uma alternativa de manejo na produção de matéria prima para energia. Considerando que a demanda por madeira para produção de energia irá dobrar até 2020 (EPE, 2016), existe um crescente interesse em estudar os SFCR, cujos esforços têm sido direcionados à quantificação da biomassa, assim como a avaliação do efeito do espaçamento do plantio e dose de adubação utilizada. Entretanto, ainda é desconhecido os processos fisiológicos que controlam o crescimento vegetal nesse sistema.

O conhecimento da ecofisiologia em SFCR é fundamental para que seja realizado um manejo florestal eficiente para produção de biomassa. Existem muitos fatores ecofisiológicos que podem interagir tais como: a estrutura do dossel e seu desenvolvimento, a arquitetura e a eficiência do uso da luz, da água e de nutrientes. A identificação da relação entre produção, luz, água e nutrientes precisa ser

estudada com a finalidade de desenvolver recomendações silviculturais específicas para este tipo de sistema.

Com a intenção de estudar opções bioenergéticas em espécies florestais não convencionais, caracterizadas por possuírem alta biomassa disponível em curto período de desenvolvimento e corte de três a quatro anos, nota-se a necessidade de realizar ensaios com espécies florestais alternativas a aquelas utilizadas tradicionalmente, além de ser vantajoso por apresentar custo médio com projeção sustentável. Dessa maneira, o presente estudo teve como objetivo quantificar as taxas de crescimento, eficiência da utilização da luz, água e nutrientes em plantios adensados de *Bambusa vulgaris*, de híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla* – clone AEC-144, de híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* - clone LW07 e *Salix nigra*, determinando assim qual espécie florestal é a mais eficiente na utilização da luz, água e nutrientes para a produção de biomassa, sob condições semelhantes de solo, altitude e manejo silvicultural.

Sistemas florestais de curta rotação – SFCR

Os sistemas florestais de curta rotação (SFCR) são caracterizados pela alta densidade das árvores por unidade de superfície e utilização de maiores doses de adubação, assim como ciclos de coleta mais curtos. A biomassa produzida nestes sistemas é comumente utilizada para fins energéticos (JOHNSON et al., 2007; GUERRA et al., 2014). Segundo Rousseau (2016), os SFCR têm sido projetados para espécies lenhosas que se manejadas intensivamente na produção de matéria prima de alta qualidade podem facilmente serem colocada em um processo para a produção de bioenergia, biocombustível ou ser ainda utilizada para desenvolver vários polímeros, como a fibra de carbono. O manejo intensivo é dependente da espécie, melhoramento genético, do próprio sistema de coleta utilizado e ainda de várias técnicas silviculturais com a finalidade de aumentar a produtividade (GUERRA et al., 2014; ROUSSEAU, 2016).

No Brasil, o gênero *Eucalyptus* é plantado neste tipo de sistema, e observa-se rendimentos na produção de biomassa com valores acima de 20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ nos espaçamentos de 3 m x 0,5 m até 45 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (MULLER, 2005; GUERRA et al., 2014).

Uso energético dos gêneros *Eucalyptus*, *Bambusa* e *Salix*

O gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália e tem mais de 600 espécies, as quais um grande número possui facilidade de adaptação e boa capacidade de produzir madeira para os distintos meios de utilização (CAMPINHOS, 1999). No Brasil, o plantio foi introduzido em 1904, inicialmente com o objetivo de suprir as necessidades utilização na forma de: lenha, postes e dormentes além do abastecimento das estradas de ferro (MORA; GARCIA, 2000).

Atualmente, as plantações de eucalipto no Brasil ocupam aproximadamente 7 milhões de hectares, sendo 1.176.480 hectares de plantios destinados para utilização na forma de carvão vegetal (EPE, 2016). Dentre as espécies de eucalipto cultivadas com esta finalidade, destacam-se o *Eucalyptus grandis*, o *Eucalyptus urophylla* e os híbridos dessas duas espécies. Segundo estudos, tais clones de *Eucalyptus*, com idades entre 42 e 84 meses apresentam densidades básicas entre 428 e 570 kg m⁻³ e teores de lignina total entre 26 e 34% (NEVES et al., 2011; SANTANA et al., 2012; CASTRO et al., 2013; NEVES et al., 2013; CARNERO et al., 2014). Especificamente para o clone AEC-144, com idades entre 55 e 68 meses, foi observado densidades básicas entre 428 e 476 kg m⁻³ e teores de lignina total entre 26 e 31% (NEVES, et al., 2011; NEVES et al. 2013).

A densidade básica da madeira e teor de lignina total dos clones de eucalipto para carvão vegetal são características que estão sob um forte controle genético e raramente apresentam influência ambiental, sendo assim, os clones de eucalipto apresentam maior taxa de conversão CO₂ em biomassa e esse fator contribui com a obtenção de um balanço de carbono favorável para a conversão da matéria prima lignocelulósica em energia (BOTREL et al., 2007; BOTREL et al., 2010; TRUGILHO et al., 2009).

Guerra et al. (2016), em cinco plantações de eucalipto, localizadas em diferentes estados brasileiros sob uma ampla gama de condições como clones, idade, densidade de plantio, reportaram uma produção média de biomassa para energia de 90 a 157 Mg ha⁻¹ além de apresentar diâmetro à altura do peito (DAP) variando entre 5 a 8 cm, aos dois anos de idade.

Eloy et al. (2015) determinaram a produtividade energética de diferentes compartimentos da biomassa da parte aérea das espécies florestais *Acacia mearnsii* e *Eucalyptus grandis*, distribuídas em diferentes espaçamentos, segundo o estudo,

Eucalyptus grandis apresentou o maior potencial de produtividade energética de madeira, equivalente a duas vezes maior do que produtividade energética obtida para *Acacia mearnsii*, ao trabalhar no espaçamento mais adensado (2 m × 1 m).

O gênero *Bambusa* é originário da Ásia e foi introduzido no Brasil no período da colonização e pode ser utilizado para diversas finalidades como: produção de polpa de papel, fonte de bebida alcoólica e, mais recentemente, como biomassa para geração de energia. *Bambusa vulgaris* é uma das espécies mais plantadas no nordeste do Brasil por apresentar grande adaptabilidade, rusticidade, além apresentar ciclo curto (três anos) e longevidade de touceiras (KLEINE, 2015).

Bambusa vulgaris apresenta crescimento favorecido em altitudes entre 500 e 1.200 m, temperaturas entre 20 e 26 °C, precipitação anual entre 1.500 e 3.800 mm, umidade relativa entre 75 e 80% e em solos francos, franco-siltoso e arenoso-siltoso, continuamente úmidos e bem drenados, assim como em pH do solo variando entre 5 e 7 (FRANCIS, 1993).

Santos et al. (2016) ao avaliarem as características da biomassa e do carvão vegetal em três espécies de bambu, incluindo *B. vulgaris* obtiveram características energéticas similares ou superiores em relação ao híbrido *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* com idade de seis anos, com exceção dos teores de materiais voláteis e de cinzas, indicando assim o seu potencial para utilização como fonte de energia. Na Tabela 1 estão apresentadas as propriedades energéticas de biomassa e carvão vegetal de duas espécies do gênero *Bambusa*, comparado ao eucalipto.

Tabela 1 – Propriedades energéticas na biomassa e carvão vegetal no bambu e o eucalipto (SANTOS et al., 2016).

Propriedades energéticas da Biomassa				
Espécie	Carbono fixo (%)	Densidade básica (kg m ⁻³)	Poder calorífico (kcal kg ⁻¹)	Densidade energética (Gcal m ⁻³)
<i>Bambusa tuldoides</i>	21,8 a	421 a	4515 a	1,96 a
<i>Bambusa vulgaris var vittata</i>	22,8 b	462 b	4663 a	2,16 b
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	17,5 c	482 b	4658 a	2,17 b
Propriedades energéticas do Carvão Vegetal				
Espécie	Carbono fixo (%)	Densidade básica (kg m ⁻³)	Poder calorífico (kcal kg ⁻¹)	Densidade energética (Gcal m ⁻³)
<i>Bambusa tuldoides</i>	72,3 a	320 b	6752 a	2,2 a
<i>Bambusa vulgaris var vittata</i>	73,4 b	340 b	6777 a	2,3 a
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	70,4 a	360 b	6670 a	2,4 a

Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo Teste de Tukey (p≤0,05)

Segundo o Grupo Industrial João Santos, *apud* Kleine (2015), o espaçamento de 3 m x 6 m para produção de biomassa pode atingir produtividades entre 30 e 60 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, aliado a utilização de adubação de cobertura aos 60, 90 e 120 dias após do plantio. No entanto, no Brasil não há estudos que comprovam que o adensamento desses plantios apresente maiores valores de produtividade de biomassa.

Existem aproximadamente 300 espécies conhecidas de árvores e arbustos do gênero *Salix*, distribuídos em diferentes latitudes da Europa, Ásia, América do Norte e no norte e sul da África, além de muitas outras variedades e híbridos. Espécies de *Salix* produtoras de vime foram introduzidas e climatizadas no Brasil há mais de meio século inicialmente no estado de São Paulo e nos estados do Sul (*S. albae* e *S. purpurea*). Também, *Salix babilonica*, o “chorão”, foi introduzida no país, sendo empregada como uma espécie ornamental (EMBRAPA, 2002).

Em países de clima temperado como a América do Norte e Europa o gênero *Salix* é uma fonte de energia renovável. Patrício et al. (2013) plantaram no norte de Portugal o salgueiro (híbrido local *Salix alba* x *Salix fragilis* e um clone de salgueiro sueco *Salix*. L., Terra Nova), por estaquia direta em linha dupla com densidades variando entre 10.000 a 15.000 estacas por hectare. No terceiro ano da primeira rotação, a produtividade da biomassa para energia ficou entre 0,89 e 5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹

¹, valores que foram superiores quando comparados com espécies nativas. Na Alemanha as árvores para energia de *Salix* clone “Tordis” (*Salix viminalis* x *Salix schwerinii*) têm sido plantadas em sistemas de curta rotação com densidades de 11.850 plantas por hectare (BREDEMEIER et al., 2015), com produtividades mais altas.

O gênero *Salix* plantado nos Estados Unidos da América (EUA) e Europa com a finalidade de produzir biomassa para energia, com baixos regimes de adubação e irrigação, atingiu aos três anos da primeira rotação, produtividades de 27 e 30 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Pensando nas limitações de água para a produtividade em larga escala, estabeleceram plantios de *Salix*, não irrigados, obtendo entre 8,4 e 11 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, na primeira rotação. Já na segunda rotação, a produtividade aumentou 18 e 62% nos EUA e Europa, respectivamente (VOLK et al., 2006).

Resultados semelhantes foram relatados por Robertson (1986), para a produtividade e o valor energético de estacas de dois e três anos dos clones selecionados de *Salix viminalis*, *S. alba*, *S. fragilis* e *S. nigra*, com uma densidade de 30.000 estacas ha⁻¹ em Pasadena, Terra Nova, EUA. *S. viminalis* obteve uma maior produtividade de matéria seca (28,5 Mg ha⁻¹ano⁻¹), com estacas de três anos de idade.

Produtividade primária líquida – PPL

A Produtividade Primária Bruta - PPB (GPP - do inglês *Gross Primary Production*) indica a quantidade de energia captada por uma planta que pode ser convertida em biomassa através do processo da fotossíntese, em um intervalo de tempo (CAMPBELL, 1990). A Produtividade Primária Líquida - PPL (NPP - do inglês *Net Primary Production*) é definida como a diferença entre produtividade bruta e o carbono consumido durante a respiração da planta, ou seja, indica a energia que foi efetivamente convertida em biomassa, descontando-se as perdas (CHAPIN III et al., 2002). A PPL representa aproximadamente 50% do carbono assimilado pelo dossel florestal durante o processo de fotossíntese e suas altas taxas de produtividade são determinadas pela disponibilidade de água, da temperatura e dos nutrientes (LANDSBERG; GOWER, 1997).

De forma prática, a produtividade primária líquida (PPL) compreende todos os materiais que juntos representam a quantidade de matéria seca recente que foi

mobilizada pelas plantas vivas no final do período de avaliações no campo e a quantidades de matéria seca produzida e perdida pelas plantas durante o mesmo período. Nas florestas, estes materiais representam o incremento de biomassa acima do solo, a produção de serapilheira, a perda acima do solo por herbivoria, as emissões de compostos orgânicos voláteis, os incrementos líquidos de biomassa em raízes (grossas e finas), as raízes mortas, as perdas de raízes por consumidores e exsudatos das raízes (CLARK et al., 2001).

Ribeiro et al. (2015) relataram que na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, as pastagens, vegetação predominante na região, apresentaram os menores valores de PPL (0,95 e 0,96 kg C m⁻² ano⁻¹); enquanto que, cultivos de Eucalipto obtiveram uma PPL intermediária entre 1,09 e 1,44 kg C m⁻² ano⁻¹, inferiores aos dos remanescentes de mata atlântica que apresentaram PPL média de 1,70 kg C m⁻² ano⁻¹.

Em florestas plantadas por apresentar menor complexidade do sistema, pode-se simplificar a abordagem, restringindo o estudo a apenas um componente como a produtividade primária líquida da madeira (CAMPOE, 2008). Dessa forma, no estudo realizado na estação experimental Itatinga, SP, nos plantios de *Eucalyptus grandis*, com diferentes espaçamentos, a PPL do fuste variou entre 1,30 a 2,15 kg C m⁻² ano⁻¹, enquanto que para *Acacia mangium* os valores de PPL do fuste oscilou entre 0,042 a 0,30 kg C m⁻² ano⁻¹. Em plantios mistos entre ambas as espécies foi observado valores entre 1,68 e 2,15 kg C m⁻² ano⁻¹ (LE MAIRE et al., 2013). Em florestas nativas de bambu (*Phyllostachy pubescens*) localizadas em Taiwan valores de PPL entre 1,58 e 8,04 kg C colmo⁻¹ ano⁻¹ foram observados (YEN, 2016). No Canadá, segundo estudos de Labrecque et al. (1993), os plantios de *Salix viminalis* apresentaram valores médios de 0,02 kg C m⁻² ano⁻¹.

Indicadores ecofisiológicos de resposta

O IAF é uma variável que apresenta alta correlação entre a área foliar e a produtividade do plantio. Define-se como a área das folhas por unidade de área de superfície de solo e é um dos parâmetros mais úteis para projetar o volume e a biomassa produzida em sistemas florestais, bem como na determinação do uso eficiente da água e dos nutrientes, balanço de carbono e danos produzidos por

patógenos e pragas nas plantações (MITCHELL, 1992; FANG et al., 1999; SMETHURST et al., 2003).

O IAF tem sido determinado, normalmente, de duas formas através de métodos diretos indiretos. O primeiro requer coleta de amostras, sendo este destrutivo e bastante trabalhoso demandando muito tempo para sua execução, porém o método direto apresenta grande exatidão e é utilizado para a calibração dos métodos indiretos. O método indireto envolve a avaliação do comportamento da radiação no dossel, sendo este método muito utilizado em florestas devido às limitações e dificuldade ao acesso das copas das árvores (NORMAN; CAMPBELL, 1989; JONCKHEERE et al., 2004).

Os métodos diretos medem área foliar por meio do medidor de área LI 3100 (LI-COR), após a coleta do material no campo. A área foliar é medida em uma sub-amostra de folhas e relacionada com a massa seca (área foliar específica - AFE $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) para finalmente determinar a massa total de folhas coletadas de uma superfície de solo conhecida e convertida em IAF multiplicando-se pela AFE (BREDA, 2003).

Os métodos indiretos inferem sobre o IAF a partir de medições da radiação transmitida pelo dossel. Esses métodos não são destrutivos e estão baseados em abordagens estatísticas e probabilísticas da distribuição das folhas no dossel. Os métodos indiretos não medem o IAF, pois interceptam a luz de todos os elementos do dossel superestimando o IAF. Assim sendo, o resultado precisa ser corrigido por meio da equação de Lambert-Beert, onde são utilizados os valores medidos pelos aparelhos de radiação incidente (I_0) e transmitida (I) e o coeficiente de extinção de luz (BREDA, 2003; JONCKHEERE et al., 2004).

O coeficiente de luz (k) representa a área de sombra feita pelo dossel distribuída em uma superfície horizontal dividida por sua área de folhas. O k deve ser determinado para cada espécie e sítio específico devido ao ângulo, formato e sobreposição das folhas (MONTEITH, 1972; JONCKHEERE et al., 2004).

Os instrumentos mais utilizados, baseados na medição da atenuação de radiação pelo dossel são as fotografias hemisféricas ou sensores ópticos (LI-COR LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, Decagon AccuPAR) (LE MAIRE et al., 2011, OLIVAS et al., 2013) assim como o uso de sensoriamento remoto (LE MAIRE et al., 2011; GANGULY et al., 2012).

Em plantações comerciais de eucalipto é comum observar a utilização dos métodos indiretos para o cálculo do IAF por serem menos oneroso e mais

econômicos mesmo que ainda sejam considerados menos precisos ao serem comparados com os diretos. A importância da estimativa deste parâmetro reside na relação existente entre o IAF e os processos de fotossíntese, transpiração, respiração, interceptação de energia e água da floresta (OLIVAS et al., 2013).

Eficiência do uso da luz

A luz é um recurso crítico para as plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004). O crescimento e o desenvolvimento das espécies dependem da quantidade de luz absorvida pelo aparelho fotossintético e sua eficiência para produzir carboidratos, os quais serão alocados nos diferentes tecidos (BINKLEY et al., 2004).

Estima-se que 47% da radiação solar recebida pela biosfera encontram-se na faixa espectral entre 380-710 nm, faixa está utilizada pelas plantas para o processo de fotossíntese. Essa radiação é denominada "radiação fotossinteticamente ativa" ou PAR (*Photosynthetic Active Radiation*) (LARCHER, 2006). A radiação marca o início do processo fotoquímico estimulando a abertura dos estômatos e a atividade da enzima de carboxilação Rubisco (POTIS, 2003).

Tanto as baixas quanto as altas taxas de radiação podem ocasionar como consequência diminuição da produtividade; seja por baixos ganhos de carbono ou por danos causados por fotoinibição (LAMBERS et al., 2008), por isso a eficiência no uso desse recurso é de grande interesse.

A quantidade de biomassa aérea produzida por unidade de luz interceptada pelo aparelho fotossintético é conhecida como eficiência do uso da luz (EUL) ou modelo épsilon (CAMPOE, 2012) e é influenciada por fatores como estresse hídrico e nutricional além das condições climáticas do ambiente.

Em plantios irrigados, a eficiência de utilização da luz é maior devido à capacidade das folhas conseguirem fixar maior quantidade de carbono por unidade de luz interceptada do que quando comparadas com folhas que apresentam fechamento de estômatos em situações de déficit hídrico (BINKLEY et al., 2004). Segundo Ryan et al. (2010) o aumento da produção de madeira, pode ser resultante do incremento na EUL.

Stape (2002) avaliou a produtividade primária bruta em povoamentos de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* e observou incremento de 6,1 a 11,3 kg m⁻² ano⁻¹ no tratamento com irrigação e a porcentagem de luz interceptada pelo

dossel registrou aumento de 63 a 71%. Os plantios mais produtivos podem ser o resultado de maiores taxas de fotossíntese por unidade de luz absorvida ou de variações na alocação de carboidratos, armazenando maiores proporções de fotoassimilados no tronco (STAPE et al., 2008; RYAN et al., 2010).

Na Tabela 2 estão apresentados os valores de EUL para as principais espécies energéticas no Brasil e ao redor do mundo. Considerando que, a EUL é definida pela razão do crescimento da biomassa pela quantidade de luz absorvida, e segundo tais estimativas, com exceção de *Miscanthus giganteus* (gramínea perene), não foi considerado o incremento em matéria seca de folhas e galhos, mostrando que os resultados obtidos mostram que houve 30% a menos que a produtividade primária líquida da biomassa acima do solo (ANPP) segundo Le Maire et al. (2013).

Tabela 2 – Eficiência no uso da luz em diferentes plantios no Brasil e al redor do mundo.

Espécie	EUL (g MJ⁻¹)	País	Fonte
<i>Eucalyptus grandis</i>	1,05	Brasil	Le Maire et al. (2013)
<i>Eucalyptus</i> spp.	1,18	Brasil	Marsden et al. (2010)
<i>Acacia mangium</i>	0,87	Brasil	Le Maire et al. (2013)
<i>Acacia mangium</i>	1,03	Indonésia	Khasanah et al. (2006)
<i>Eucalyptus</i> spp.	0,56 - 0,65	Brasil	Da Silva et al. (2016)
<i>Salix</i> spp.	0,60 - 1,70	Reino Unido	Cerasuolo et al. (2016)
<i>Salix</i> spp.	1,40	Suécia	Linderson et al. (2007)
<i>Populus</i> spp.	0,82 - 1,01	República Checa	Tripathi et al. (2016)
<i>Miscanthus × giganteus</i>	2,70	Italia	Alexoupoulou (2018)

Valores abaixo de 0,50 g MJ⁻¹ podem estar relacionados com as diferenças em zonas climáticas limitadas pela disponibilidade de água, entanto que, valores com médias iguais a 2 g MJ⁻¹ podem estar associados com regiões altamente produtivas (STAPE et al., 2004). Valores acima de 2 g MJ⁻¹ podem estar relacionadas também pela espécie e a densidade do plantio. Assim sendo, uma gramínea C4 apresenta alta capacidade fotossintética e, conseqüentemente uma alta produtividade (CEOTTO et al., 2013). Isso associado ao maior número de indivíduos por área aumenta a eficiência de interceptação da radiação solar (TOLLENAAR et al., 1997) e, portanto, na maior conversão de biomassa por cada unidade de luz absorvida.

Os valores de EUL também podem ser muito baixos nos primeiros dois anos após o plantio, apresentando aumento nas idades de quatro e cinco anos. A baixa EUL no início do plantio pode ser causada pela maioria dos fotossintatos estarem alocados nos órgãos de captação de recursos (folhas e raízes), diminuindo o valor para o tronco (LE MAIRE et al., 2013).

Eficiência do uso da água

A eficiência do uso da água (EUA) nas plantas pode ser definida como o volume da água que as plantas necessitam consumir (evapotranspiração) para incorporar em sua biomassa uma determinada quantidade de carbono proveniente da atmosfera. A EUA se torna dependente de dois fatores: 1) características do ambiente, nos quais a planta cresce e se desenvolve, interferindo assim na manifestação do material genético escolhido; e 2) características intrínsecas da espécie além de variedades que tenham relação com a otimização do processo de assimilação de carbono e evapotranspiração (MEDRANO et al., 2007).

A quantidade de água disponível no solo é um fator determinante na produção de biomassa, tornando-se importante principalmente quando se tem a necessidade de quantificar a produção anual (kg ha^{-1}) e a água utilizada ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$). Nos diferentes biomas, apesar de existirem fatores limitantes como temperatura, disponibilidade de nutrientes e horas de luz, nota-se correlação entre precipitação anual e a produção de biomassa destes. Ao analisar as mesmas espécies, notam-se que diferentes os regimes de irrigação proporcionam ajustes de produção ainda maiores (MEDRANO et al., 2007).

Tatagiba et al. (2009) em estudos, observaram que a deficiência hídrica foi suficiente para reduzir o teor de água nos tecidos vegetais de plantas de eucalipto, o que provocou redução no processo de abertura estomática, gerando queda na assimilação de carbono pela fotossíntese e diminuindo ainda a produtividade primária da floresta de eucalipto.

Em relação às características da espécie, algumas apresentam menores exigências hídricas por quilograma de matéria seca, tal fato deve-se a alta taxa fotossintética e maiores rendimentos, assim como arquitetura foliar que é determinada pelas características genéticas e a disponibilidade de recursos durante o crescimento. Quanto maior for o tamanho e a quantidade de folhas, maior será o

porte da árvore e mais aberta a copa, e com isso conseqüentemente ocorre maior consumo de água. A disponibilidade de água ajusta o tamanho e quantidade de folhas, fazendo controle na regulação dos estômatos para redução das perdas de água. O fechamento dos estômatos é responsável pela redução da taxa de transpiração e, portanto, pelo incremento da EUA (MEDRANO et al., 2007).

Espécies do gênero *Eucalyptus*, apresentam mecanismos para realizar economia de água (SILVA et al., 2004; STAPE et al., 2004). Alguns desses mecanismos envolvem a presença de tecido foliar coriáceo mais espesso, alinhamento vertical das folhas, fechamento rápido dos estômatos, baixas taxas de transpiração e elevada razão entre raiz e parte aérea (SILVA et al., 2004).

A EUA pode ser medida principalmente em florestas a partir da troca de gases que geralmente integra um período curto de tempo a partir da utilização de um aparelho de gás infravermelho (Infra Red Gas Analyser – IRGA, modelo Li-6400XT, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA). As medidas de trocas gasosas nas folhas permitem determinar a transpiração (saída da água) e a fotossíntese líquida (entrada líquida de carbono nas folhas). A EUA é a razão entre as taxas fotossintética e taxas de transpiração, podendo ser considerada em dois níveis, sendo um deles a taxa fotossintética/transpiração (A/E , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$), e a eficiência intrínseca no uso da água, definida como a razão da taxa fotossintética pela condutância estomática (A/g , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$). Ambas as medidas têm as mesmas unidades, porém, a eficiência da transpiração depende da planta e das condições ambientais, enquanto que a eficiência intrínseca registra diferenças relacionadas com a capacidade da folha em regular a fotossíntese e a condutância estomática, as quais são independentes das condições atmosféricas e do ambiente no momento da medição (MEDRANO et al., 2007).

Eficiência do uso dos nutrientes

Os nutrientes, seguida água são um dos principais fatores que afetam o crescimento das culturas. A nutrição correta de maneira geral promove o aumento da área foliar, a relação parte aérea e raiz e pode diminuir a mortalidade das raízes finas, o que torna um método eficiente de aumento de produção. Avaliações nutricionais são necessárias para que seja realizado o zoneamento potencial de plantios (STAPE et al., 2004).

Boa parte das necessidades anuais nutricionais dos sistemas florestais de curta rotação, podem ser satisfeitas por meio da deposição e decomposição da serapilheira, no entanto, é necessário o fornecimento de uma fonte externa de nutrientes, como por exemplo, a aplicação de 30 a 80 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ para manutenção de produtividades do local estudado, proporcionou uma produção média anual de 10 a 20 Mg MS ha⁻¹. A determinação da quantidade de nutrientes necessária para manter a produção é baseada nos ensaios de fertilidade, rendimento e dados de pesquisa sobre remoções de nutrientes pela cultura e eficiência de nutrientes (MITCHELL, 1992).

No caso específico de *Bambusa vulgaris* não foram encontrados na literatura consultada estudos sobre recomendação indicada e até mesmo adequada para a espécie. De maneira geral, Kleinkhenz e Midmore (2001) mencionam que a proporção sugerida é 7 K: 6 N: 1P para bambus touceirantes, uma vez que requerem maiores quantidades de potássio e conseqüentemente apresentam maiores teores deste na biomassa total. Com relação à exportação de macronutrientes em plantios comerciais de *B. vulgaris*, Neto et al. (2010) concluem que os cavacos de *B. vulgaris* exportaram quantidades aproximadamente duas vezes maiores de potássio do que nitrogênio, e observaram ainda que fósforo e enxofre foram os que apresentaram menores quantidades exportados pela cultura.

A eficiência do uso de nutrientes (EUN) permite que as plantas atinjam altas produtividades com maior sustentabilidade (AHLGREN, et al., 2008) e pode ser definida como a razão entre produtividade primária ou peso seco da parte aérea da planta por unidade de nutriente disponível no solo (MOLL et al., 1982). Ensaios com doses altas e baixas de nitrogênio permitem diferenciar genótipos de uma mesma espécie ou entre espécies, justamente por apresentarem diferentes resultados na eficiência no uso de nitrogênio (DE OLIVEIRA et al., 2008).

Santana et al. (2002) observaram maior EUN no *Eucalyptus grandis* com relação ao *E. saligna* para os nutrientes nitrogênio, fósforo e magnésio e não observou diferenças significativas quando avaliou a eficiência entre as duas espécies para cálcio e potássio. O cálcio e potássio são os nutrientes que tornam a produtividade do próximo ciclo limitante, quando se considera a colheita do tronco (lenho e casca), porem, esta limitação pode ser reduzida, se for realizada somente a colheita do lenho. Resultados similares foram reportados por Rosim et al. (2016), que observaram maior eficiência no uso de nutrientes no fósforo e magnésio para os

clones de *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*. No estudo citado anteriormente, os autores destacam maior eficiência de utilização na madeira promovida pelo nutriente cálcio.

Com relação a EUN em *B. vulgaris*, Mendes et al. (2010) mencionam que, a eficiência de utilização de nutrientes na produção de componentes de biomassa aérea explorada em diferentes densidades da espécie, não apresentou diferenças, com exceção do potássio, que apresentou a eficiência de utilização menor justamente por apresentar maior acúmulo na biomassa. No gênero *Salix*, Weih et al., (2010) observaram maior eficiência na utilização de nitrogênio em relação aos outros nutrientes. Resultados similares foram observados em *Salix glauca* (BOWMAN; CONANT, 1994).

CAPÍTULO 1 - EFICIÊNCIA NO USO DA LUZ E DA ÁGUA NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA E PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA LÍQUIDA DO TRONCO DE *Bambusa*, *Eucalyptus* e *Salix* EM SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO

Gabriela Carolina Villamagua Vergara, Mariana Bonacelli Montelatto, Alexandre Dal Pai, Marcelo de Almeida Silva, Kléber Pereiral Lanças, Saulo Philipe Sebastião Guerra

Faculdade de Ciências Agrônômicas / Universidade Estadual Paulista
Rua José Barbosa de Barros, 1780 Botucatu – SP

RESUMO

A eficiência com a qual as árvores convertem a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e a água em biomassa tem sido estudada consistentemente em monoculturas de eucalipto e pinus plantadas com a finalidade de fornecer matéria prima para a fabricação de celulose e papel. Entretanto, a eficiência do uso da luz e água raramente foram medidas em sistemas florestais de curta rotação para fins energéticos, o que torna essas avaliações em espécies como o bambu serem inéditas. Comparou-se, a produção de biomassa e produtividade primária líquida do tronco, a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e a eficiência no uso da luz e da água entre quatro espécies: *Bambusa vulgaris*, o híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla* – clone AEC-144, o híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* - clone LW07 e *Salix nigra*, com o objetivo de determinar qual espécie florestal é a mais eficiente na produção de biomassa para energia, sob as mesmas condições de solo, altitude e manejo. *B. vulgaris* foi a espécie que apresentou a maior quantidade de biomassa por planta e, conseqüentemente, a maior produtividade primária líquida (8,07 kg pl⁻¹ e 1,56 kg pl⁻¹ ano⁻¹, respectivamente), ao passo que, notou-se que o clone de *E. urophylla* AEC-144 apresentou uma maior eficiência no uso da luz por área (1,80 g MJ⁻¹) e maior eficiência intrínseca no uso da água (68,09 μmol CO₂ mol H₂O⁻¹). Na eficiência no uso da água, o clone *E. grandis* × *E. urophylla* - LW07 registrou o maior valor (4,93 μmol CO₂ mol H₂O⁻¹), ao ser comparado às outras espécies. O presente estudo mostra que a produtividade dos SFCR em ambientes tropicais está mais associada à disponibilidade de água, e portanto, as limitações deste recurso podem afetar a eficiência no uso de luz e da água, assim como a alocação de biomassa nos diferentes componentes da planta.

Palavras chave: bambu, eucalipto, salgueiro, biomassa aérea, APAR, estrutura do dossel, transpiração.

ABSTRACT

The efficiency with which trees convert photosynthetic active radiation (PAR) and water in biomass has been consistently documented in cellulose and paper industry eucalyptus and pine monocultures. However, water and light efficiency has rarely been measured in energy short rotation woody crops, and even less in species such as bamboo. We compared biomass production, trunk net primary productivity, absorbed photosynthetically active radiation (APAR), water and light efficiency from four species: *Bambusa vulgaris*, the spontaneous hybrid of *Eucalyptus urophylla* - clone I144, interspecific hybrid of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* - clone LW07 and *Salix nigra*, to determine which of these forest species is the most efficient to produce biomass for energy. *Bambusa vulgaris* was the species that obtained the highest biomass per plant ratio and consequently higher net primary productivity (8.07 kg pl⁻¹ and 1.56 kg pl⁻¹ year⁻¹, respectively), however, clone AEC-144 showed higher light use efficiency per area (1.80 g MJ⁻¹) and higher intrinsic water use efficiency (68.09 μmol CO₂ mol H₂O⁻¹). Clone LW07 obtained the highest value (4.93 μmol CO₂ mol H₂O⁻¹) of instantaneous water use efficiency, when compared to other species. This study shows that the short rotations woody crops in tropical environments the productivity is more associated with water availability, and that the limitations of this resource can affect light and water use efficiency as well as the allocation of biomass in the different components of the plant.

Keywords: bamboo, eucalyptus, willow, biomass above ground, APAR, canopy structure, transpiration.

1.1 Introdução

A crescente demanda de energia e o eventual esgotamento das fontes energéticas fósseis, fez com que se tornasse primordial a inclusão de fontes de energia renováveis dentro da matriz energética mundial. Segundo a EPE (2016), apenas 9,7% da matriz energética mundial é oriunda de biomassa vegetal, situação

diferente quando comparada com a matriz brasileira, que é composta por 25,5% de biomassa florestal (lenha e carvão vegetal) e de cana-de-açúcar.

O sistema florestal de curta rotação (SFCR) surge então como um modelo alternativo a partir de plantios monoespecíficos, manejados intensivamente com o objetivo de produção de matéria prima com a finalidade de geração de energia renovável. Segundo Guerra et al. (2014), o SFCR possui alta produtividade de biomassa em reduzidos períodos de tempo e área, tornando-se interessante para a rápida produção de biomassa para bioenergia.

Tradicionalmente, os SFCR têm sido compostos por monocultivos de eucalipto no Brasil e por espécies de *Populus* spp. e *Salix* spp. na Europa e no norte da América (FISCHER et al., 2010). Diante disso, surge então a necessidade de diversificar cada vez mais as espécies que podem ser utilizadas nesse tipo de sistema de manejo.

Considerando seu rápido crescimento, alta produtividade, pouca exigência com relação ao solo, resistência a pragas e doenças, altos aportes de serapilheira e retenção de nutrientes, o bambu surge como uma boa opção para esse sistema (BERALDO; AZZINI, 2004). De acordo com estudos realizados, comprova-se que, energeticamente, as diferentes espécies de bambu apresentam características similares ou até superiores ao eucalipto, indicando assim seu forte potencial como fonte de bioenergia (BRITO et al., 1987; SCURLOCK et al., 2000; VARANDA et al., 2010; SANTOS et al., 2016; VALE et al., 2017).

As altas taxas de crescimento nas florestas plantadas são geralmente associadas com a eficiência que as plantas utilizam os recursos disponíveis no ambiente tais como água e nutrientes, o que promove questionamentos sobre a sustentabilidade da produção da madeira (CALDATO; SCHUMACHER, 2013).

O estudo das relações entre produção versus água, nutrientes e luz deve ser realizado para fins de desenvolvimento de recomendações silviculturais específicas com a finalidade de melhorar e promover o máximo de produtividade do manejo florestal.

As avaliações de eficiência com a qual as árvores convertem a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e água em biomassa têm sido consistentemente estudadas em monocultivos de eucalipto e pinus com o objetivo de fornecer biomassa para a fabricação de celulose e papel, porém, pouco se sabe sobre sistemas de curta rotação, principalmente em espécies como o bambu. Sabe-se que

as espécies possuem diferenciações entre si, como por exemplo, o tipo de metabolismo fotossintético (C3 e C4), sistemas radiculares, taxa de crescimento vertical, estrutura de copa, fenologia foliar e origem do material genético, que fazem com que elas possuam diferenças na captura e eficiência do uso de luz e de água (CARDINALE et al., 2007).

A eficiência do uso dos recursos como luz e água é medida através da produtividade de cada espécie, sendo chamada de produtividade primária líquida acima do solo (PPLA) ou biomassa. Assim sendo, a PPLA é definida como o crescimento da biomassa aérea estimada por cada unidade de recurso, água, luz ou nutrientes utilizados em um intervalo de tempo determinado (STAPE et al., 2004; LE MAIRE et al., 2013).

As taxas anuais de PPLA observadas em monoculturas florestais, mostram uma correlação positiva e linear em relação à radiação fotossinteticamente ativa interceptada (IPAR), indicando o eficiente uso da radiação solar (PANGLE et al., 2008). No caso da APAR (radiação fotossinteticamente ativa absorvida), em escala de árvore, é uma variável importante que não é diretamente mensurável em dosséis fechados, sendo assim, necessário o uso de um modelo de interceptação de luz (LE MAIRE et al., 2013).

A produtividade, medida com base na eficiência do uso da água apresenta variação ao longo dos anos e é altamente influenciada pela variação das estações e do próprio indivíduo analisado. Folhas que apresentam rápido fechamento dos estômatos e menores taxas de transpiração apresentam queda na assimilação de carbono pela fotossíntese e, conseqüentemente, evita a diminuição de produtividade da floresta em SFCR (FISCHER et al., 2012).

O presente estudo avaliou quatro espécies florestais: *Bambusa vulgaris*, híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla* – clone AEC-144, híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* - clone LW07 e *Salix nigra* em plantios adensados, sob as mesmas condições de solo, altitude e manejo e objetivou-se determinar qual espécie florestal é a mais eficiente para a produção de biomassa com finalidade energética, a partir da comparação dos parâmetros ecofisiológicos de produtividade primária líquida (PPL), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e eficiência no uso da luz e da água.

1.2 Material e métodos

1.2.1 Área de estudo e delineamento do experimento

O estudo foi realizado no município de Botucatu (22° 50' 55" S e 48° 26' 09" O), estado de São Paulo, Brasil a 826 m de altitude. O clima desta região, de acordo com a classificação de Köppen é mesotérmico (Cfa), com verões quentes e chuvosos e invernos moderadamente frios e secos. A precipitação média anual é de 1.500 mm e temperatura média anual de 22 °C (CUNHA, 2009). A área experimental corresponde a um solo Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média (VETTORATO, 2003) e a cultura anterior correspondia a plantações de eucalipto. Na Tabela 1 encontra-se a análise química do solo, segundo a metodologia de Raij et al. (2001).

Tabela 1 – Características químicas do solo, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, antes da instalação do experimento.

Camada cm	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P _{resina} mg dm ⁻³	S	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	B	Cu	Fe	Mn	Zn
							mmol _c dm ⁻³							mg dm ⁻³			
0-20	4,3	14	3	9	3	32	0,7	5	1	7	39	19	0,31	0,9	56	3,2	0,4
20-40	3,9	12	2	5	2	38	0,5	4	1	5	44	12	0,29	0,9	45	2,1	0,2

Foram utilizadas quatro espécies florestais: *Bambusa vulgaris* (bambu), híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla* – clone AEC-144, híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* – clone LW07 e *Salix nigra* (salgueiro).

O bambu e o clone AEC-144 foram plantados em janeiro de 2016 e o estabelecimento do bambu só ocorreu aos quatro meses de idade. Os plantios do clone LW07 e o salgueiro foram realizados em abril de 2016 em parcelas contínuas de 500 m² cada uma, sob mesmas condições de solo, altitude e manejo, no espaçamento, 3 x 2 m para o bambu e 3 m x 1 m para as outras espécies. No espaçamento 3 m x 1 m, as parcelas foram compostas por cinco linhas com 21 plantas úteis, enquanto que no espaçamento 3 m x 2 m, as parcelas foram compostas com quatro linhas com 12 plantas úteis (Fotografia 1).

Fotografia 1 - Localização das parcelas experimentais na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP. Da esquerda para a direita: plantios de salgueiro, clone LW07, clone AEC-144 e bambu.



Fonte: Denadai (2017)

Para preparo do solo foram feitas uma gradagem pesada e sulcagem, seguida de calagem com aplicação de 5 t ha^{-1} de calcário (PRNT 85%) corrigido de 0 a 40 cm, com plantio manual. Foi realizada capina manual e aplicações de herbicida (Glifosato 2 L ha^{-1}) trimestralmente no bambu e nos clones de eucalipto, até o fechamento do dossel. Para o salgueiro, foi mantido a capina manual e aplicação do herbicida trimestralmente até o fim das avaliações. Foi utilizado o inseticida (Deltametrina 200 ml ha^{-1}) nos clones de eucalipto e o salgueiro. No eucalipto foram realizadas três aplicações do inseticida durante o período de outubro 2016 a janeiro 2017, deve-se ressaltar que este é o período de maior incidência do *Costalimaita ferruginea*. No mês de maio 2017, os clones de eucalipto apresentaram ataque de *Gonipterus platensis*, controlado biologicamente com *Anaphes nitens*. O salgueiro apresentou ataque frequente da vaquinha da *Salix* (besouro desfolhador da ordem Coleóptera, família Chrysomelidae) e, portanto, foi aplicado inseticida trimestralmente. A adubação de base foi realizada no plantio e em seguida a adubação de cobertura foi realizada aos três, seis e 12 meses após o plantio (Tabela 2).

Tabela 2 – Épocas e doses de aplicação de adubos no experimento.

Fertilizantes	Dias	Dose 1 Dose 2 Dose 3 Dose 4			
		g planta ⁻¹			
NPK (8-27-10)	0	*			
NPK (20-05-20)	90		110		
NPK (20-05-20) + B (8%)	180			110 + 20	
NPK (20-00-20) + B (8%)	360				110 + 20

*75 g planta⁻¹ no espaçamento 3 × 1 m e 150 g planta⁻¹ no espaçamento 3 × 2 m

Para determinar a biomassa do tronco, a produtividade primária líquida do tronco (PPLT) a escala de planta, as eficiências do uso da luz e da água foram selecionadas ao acaso em cada linha de três a quatro plantas, segundo a densidade do plantio, totalizando 15 plantas por tratamento, as quais foram monitoradas mensalmente entre setembro 2016 e agosto 2017. Para a obtenção dos parâmetros silviculturais, produção e acúmulo de biomassa, incremento médio anual e produtividade líquida do tronco por área foi utilizado os dados do inventario florestal, realizados mensalmente no mesmo período acima descrito por parcela e extrapolados para hectare.

1.2.2 Avaliações climáticas

Os dados climáticos diários de temperatura média (°C) e precipitação pluviométrica (mm) foram obtidos da estação meteorológica Lageado da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP Botucatu, durante o período de setembro 2016 a agosto de 2017.

1.2.3 Balanço hídrico

O balanço hídrico foi estimado para o período de setembro de 2016 até agosto de 2017 pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) com uma capacidade de água disponível (CAD) no solo de 300 mm para os clones de eucalipto e 70 mm para bambu e o salgueiro, tais valores foram, considerados baseando-se na profundidade efetiva do sistema radicular para a exploração de água, avaliando assim a influência da disponibilidade de água na dinâmica do crescimento florestal.

1.2.4 Biomassa e produtividade primária líquida do tronco (PPLT)

A biomassa do tronco foi determinada multiplicando o volume comercial pela densidade básica da madeira de cada espécie (SOARES, 2006; RUÍZ DÍAZ et al., 2014). O diâmetro e altura total das plantas em cada parcela foram mensurados mensalmente, no período de 12 meses. No bambu e salgueiro foram medidos: o diâmetro à altura da base durante todo o período de avaliação, enquanto que para os clones de eucalipto foram medidos o diâmetro na base até o primeiro ano de idade e depois foi medido o diâmetro a altura do peito (DAP). O volume das plantas foi calculado através da seguinte equação:

$$V_{total} = D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot Ht \cdot f \quad (1)$$

Sendo que: V_{total} = volume comercial estimado com casca (m^3); D = diâmetro na base ou na altura do peito com casca (m), segundo especificações acima descritas; Ht = altura total (m), f = fator de forma de cada espécie ($ffa_{bambu}:0,47$; $ffa_{AEC-144}:0,43$; $ffa_{LW07}:0,38$; $ffa_{AEC-144}:0,57$; $ffa_{LW07}: 0,51$; $ffa_{salgueiro}: 0,30$)¹.

O fator de forma específico para cada espécie foi calculado como a razão entre o volume real obtido pelo método de Smalian e o volume do cilindro (SOARES, 2006). Para isso foram selecionadas e desbastadas no final das avaliações, três plantas de cada espécie, com diâmetro médio, foram medidos o diâmetro e altura total de cada planta para estimar o volume do cilindro (Equação 2) e em seguida feita cubagem rigorosa calculando-se o volume das toras de acordo com a fórmula de volume do parabolóide truncado de Smalian (Equação 3).

$$V_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Ht \quad (2)$$

Sendo que: V_c = volume estimado do tronco (m^3); D = diâmetro do tronco (m); Ht = altura total (m).

¹ ffa: fator de forma absoluto; ffo: fator de forma ordinário.

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(D1 + D2)^2}{2} \cdot L \quad (3)$$

Sendo que: V = volume da seção (m³); D1 = Diâmetro da extremidade inferior da seção (m); D2 = diâmetro da extremidade superior da seção (m); L = comprimento da seção (m).

Para a determinação da densidade básica da madeira foram coletados cinco discos por planta, ao longo do tronco nas posições 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, de acordo com a metodologia descrita por Vital (1984). A densidade básica foi obtida através da relação entre a massa e volume saturado dos espécimes segundo a norma brasileira ABNT NBR 11941 (ABNT 2003).

Por fim, o crescimento do tronco ou produtividade primária líquida do tronco (PPLT) foi calculado como a diferença no estoque de matéria seca do tronco entre o mês dois e um, quatro e três e assim sucessivamente até os 12 meses.

$$\Delta MS \text{ tronco} = MStronco_f - MStronco_i \quad (4)$$

Sendo que: $\Delta MStronco$ = crescimento em matéria seca do tronco (g pl⁻¹); $MStronco_f$ = matéria seca do tronco no período final (g pl⁻¹); $MStronco_i$ = matéria seca do tronco no período inicial (g pl⁻¹).

Adicionalmente foi calculado o incremento médio anual (IMA) dividendo a biomassa acumulada total pela idade do plantio (SOARES, 2006).

1.2.5 Índice de área foliar (IAF)

O índice de vegetação foi mensurado mensalmente durante 12 meses. A medição foi realizada através do método indireto utilizando um Ceptômetro (AccuPAR – 80, Decagon Devices Inc., Pulman, USA). Foi medida a radiação fotossinteticamente ativa - PAR incidente (I_o) acima do dossel e, simultaneamente, com ajuda de um sensor externo foram feitas as medições da PAR transmitidas (I) embaixo do dossel, coletando-se 15 pontos por parcela (Figura 1). As leituras foram sempre realizadas no intervalo das 12h às 14h em condições de céu aberto.

passado pelo Medidor de Área (modelo Li-3100C, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) para o cálculo da área foliar. A somatória do ¼ de folhas medidas para cada um dos indivíduos foi extrapolado para a planta. Portanto, o IAF pelo método destrutivo foi determinado multiplicando-se a área foliar total estimada por cada planta pela respectiva densidade do plantio e dividindo-se pela área. A média do IAF das três plantas por espécie foi considerada para o cálculo do k.

1.2.6 Determinação da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR)

Para a determinação da radiação fotossinteticamente ativa, ou PAR, foi necessário corrigir o valor de radiação solar global (Q_g) por um fator $p = 0,5$, de forma a considerar situações de céu encoberto, nas quais a radiação fotossinteticamente é, em média, 47% (0,47 aproximado 0,5) da radiação global (Lancher, 2006; Dal Pai e Calça, 2016), sendo que:

$$PAR = 0,5 \cdot Q_g \quad (7)$$

Os valores de radiação solar foram fornecidos pela estação meteorológica Lageado da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP Botucatu, durante o período de setembro 2016 até agosto de 2017.

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida foi calculada através da Lei de Lambert-Beer, seguindo a equação (Landsberg e Sands, 2011):

$$APAR = PAR \cdot (1 - \exp^{-k \cdot IAF}) \quad (8)$$

Onde: APAR = radiação fotossinteticamente ativa absorvida ($\text{MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$); PAR = radiação fotossinteticamente ativa ($\text{MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$); k = coeficiente de extinção da luz ($k_{\text{bambu}}:0,52$; $k_{\text{AEC-144}}: 0,45$; $k_{\text{LW07}}:0,39$; $k_{\text{salgueiro}}:1,15$); IAF = índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{folha m}^{-2} \text{solo}$).

1.2.7 Eficiência do uso da luz e da água

1.2.7.1 *Eficiência do uso da luz*

A eficiência do uso da luz (EUL) foi calculada para cada tratamento, mensalmente durante o período de setembro de 2016 a agosto de 2017, dividindo o crescimento mensal da matéria seca do tronco, pela radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) do mês, segundo a metodologia proposta por Pangle et al. (2009).

$$EUL = \frac{\Delta M_{\text{Tronco}}}{APAR} \quad (9)$$

Sendo que: EUL = eficiência do uso da luz (g MJ^{-1}), ΔM_{Tronco} = crescimento em matéria seca do tronco ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ período}^{-1}$), APAR = radiação fotossinteticamente ativa absorvida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$).

- Avaliação nutricional do dossel

Para auxiliar na interpretação dos resultados de eficiência do uso da luz foram determinados os teores de nutrientes no dossel. Foram coletadas mensalmente durante um ano, folhas da parte superior, mediana e baixa das copas de 20 indivíduos por parcela, de forma aleatória, totalizando 180 folhas por tratamento. Após determinação da área foliar (AF) com o programa ImageJ, todo o material foi seco em estufa a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingir peso constante em seguidas moídas em moinho tipo Willey e encaminhadas ao laboratório para a determinação dos teores de macro e micronutrientes.

A área foliar, massa foliar e a área foliar específica média ($\text{cm}^2 \text{ folha g}^{-1} \text{ folha}$) das amostras compostas por parcela foram calculadas para analisar as relações entre essas variáveis e a eficiência no uso da luz.

Para quantificar a dependência entre concentrações de nutrientes presentes no dossel e a radiação fotossintética ativa interceptada pelas folhas foi calculado o índice de relação nutrição e uso da luz segundo Green et al. (2003).

$$I_{Nut} = \frac{IAF \cdot N_{dossel}}{\left[\frac{IPAR}{PAR} \right]} \quad (10)$$

Sendo que: I_{Nut} = índice de relação nutrição e uso da luz, N_{dossel} = concentração de X nutriente na massa foliar (g N kg⁻¹ folhas ou mg N kg⁻¹ folhas), IAF = índice de área foliar (m² folha m² solo), IPAR = radiação fotossintética interceptada pelo dossel (MJ ha⁻¹ período⁻¹), PAR = radiação fotossintética ativa (MJ ha⁻¹ período⁻¹).

1.2.7.2 Eficiência do uso da água

A eficiência do uso da água foi calculada para cada tratamento em dois níveis, durante o período de setembro de 2016 a agosto de 2017. O primeiro nível foi calculado através da eficiência da transpiração ou eficiência no uso da água (EUA), dividindo a taxa fotossintética (A), pela taxa de transpiração (E), e o segundo nível, a eficiência intrínseca do uso da água (EUAI) dividindo a taxa fotossintética (A), pela condutância estomática (gs). Para a medição das taxas fotossintética, transpiratória e condutância estomática, inicialmente foram selecionadas aleatoriamente 15 plantas por parcela, as quais foram medidas mensalmente com o analisador de gás infravermelho (Infra Red Gas Analyser – IRGA, modelo Li-6400XT, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA). As folhas foram escolhidas aleatoriamente do terço superior da copa, com exposição total à radiação solar incidente, sadias e totalmente expandidas. As medições foram sempre realizadas no intervalo das 8h30 às 11h30 em condições de céu aberto.

1.2.8 Análise estatística

Na análise estatística das variáveis: taxa fotossintética, taxa transpiratória, condutância estomática, IAF, biomassa do tronco, PPLT, EUL, EUA e EUAI foram ajustados modelos lineares generalizados com a distribuição gama e função de ligação logarítmica tendo como fator as espécies e o tempo considerado como covariável contínua. Foi utilizado uma estrutura de medidas repetidas no tempo (232, 265, 293, 323, 361, 386, 419, 451, 495, 530, 558 e 587 dias) para o bambu e o clone AEC-144 e (138, 171, 199, 229, 267, 292, 325, 357, 401, 436, 464 e 493 dias)

para o clone LW07 e o salgueiro, pelo método de Equações de Estimação Generalizadas (NELDER; WEDDERBURN, 1972; DIGGLE et al., 2002; GBUR, et al., 2012). Foi feita também a análise de correlação de Spearman entre as variáveis acima descritas, seguidas dos valores-p do teste cuja hipótese de nulidade considera a correlação nula, contra a hipótese de que a correlação é diferente de zero.

Para as variáveis referentes à avaliação nutricional do dossel: AF, MSF e AFE, foram ajustados modelos lineares generalizados com a distribuição gama e função de ligação logarítmica tendo como fator as espécies e o tempo considerado como covariável contínua (NELDER; WEDDERBURN, 1972; DIGGLE et al., 2002). Foi feita também a análise de correlação de Spearman entre as variáveis: índices de nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês e zinco e EUL, seguidas dos valores-p do teste cuja hipótese de nulidade considera a correlação nula, contra a hipótese de que a correlação é diferente de zero.

A qualidade dos ajustes de todos os modelos lineares generalizados ajustados foi feita através da análise de desvios (deviance), gráficos dos resíduos de Pearson padronizados. Para comparações entre tratamentos foi utilizado o teste de Tukey-Kramer (WESTFALL et al., 1999) do procedimento Genmod do programa estatístico SAS – Free Statistical Software, SAS University Edition.

1.3 Resultados

1.3.1 Condições ambientais do local

A precipitação total registrada no período de setembro 2016 a agosto 2017 foi de 1.647,52 mm, sendo janeiro de 2017, o mês que apresentou o maior volume de chuva (339,10 mm) (Figura 2). O período chuvoso concentrou-se nos meses de outubro a março e, excepcionalmente, o mês de maio apresentou chuvas aproximadamente duas vezes maiores (207,01 mm), quando comparada com a média registrada para este mês nos últimos 20 anos (90 mm). Nos meses mais secos, setembro 2016 e julho 2017, não houve precipitação, registrando um déficit hídrico total de 6,54 mm para os clones de eucalipto e 28,42 mm para o bambu e o salgueiro (Figura 3). No período chuvoso, a temperatura oscilou entre 21,01 e 24,30

°C; enquanto no período seco, a temperatura encontrou-se abaixo dos 21 °C sem ultrapassar os 15 °C.

Figura 2 - Precipitação pluviométrica (■) e temperatura média (—) entre setembro de 2016 e agosto de 2017 na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.

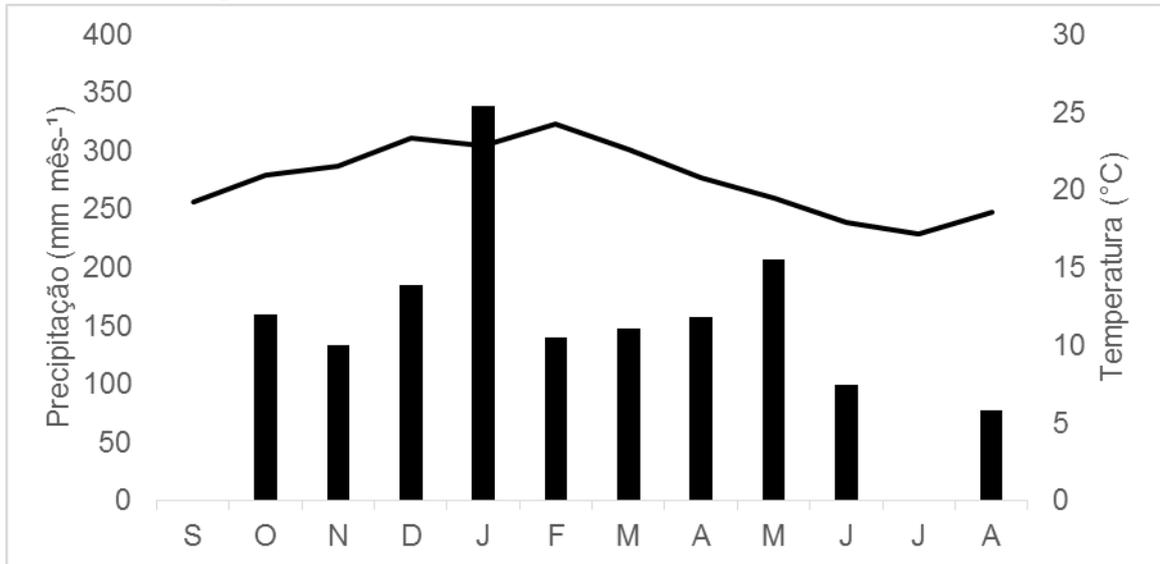
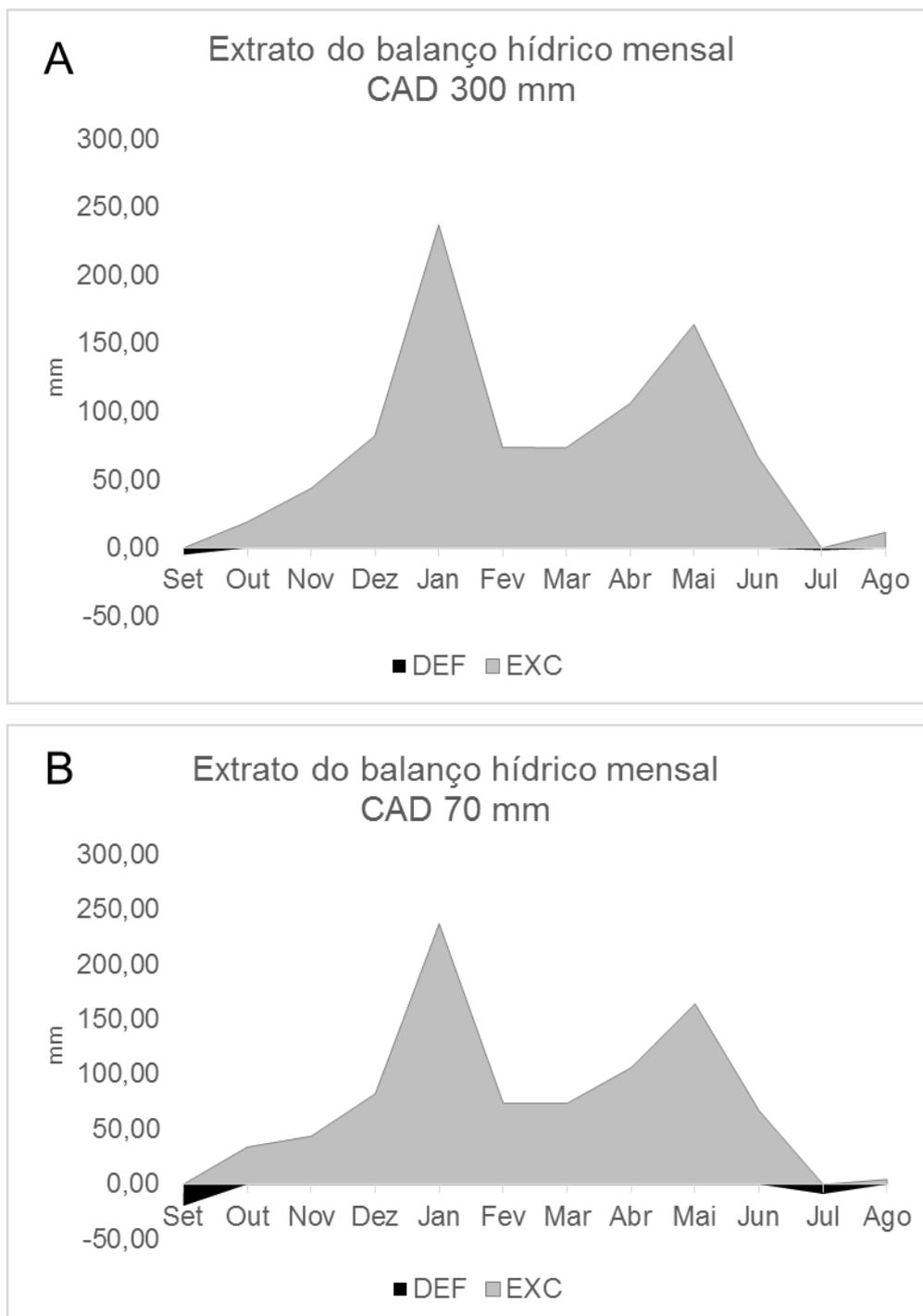


Figura 3 - Balanço hídrico normal, realizado pelo método de Thornthwaite e Mather (1995), para o período de setembro de 2016 até agosto de 2017, considerando a capacidade de água disponível no solo de 300 mm para os clones de eucalipto (A) e 70 mm para o bambu e o salgueiro (B); amostrados o excedente hídrico (EXC) e o déficit hídrico (DEF) na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.



1.3.2 Parâmetros silviculturais, produção de biomassa e produtividade primária líquida do tronco

O eucalipto apresentou maior diâmetro e altura quando comparado com as outras espécies (Tabela 3). Porém, nas plantas de bambu a produção de biomassa e produtividade do tronco a nível individual, foram superiores (Tabela 5) ao analisar o número de colmos por planta. Quando se analisa a nível de área foram encontrados os maiores valores de biomassa acumulada, incremento de madeira e produtividade para os clones de eucalipto, provavelmente em função dos plantios terem sido mais adensados, quando comparado com o plantio de bambu (Tabelas 3 e 5). O salgueiro apresentou os menores valores médios registrados para quantidade de biomassa e crescimento do tronco, quando analisado a escala de planta, como por área.

Tabela 3 - Médias de diâmetro (D), altura total (Ht), número de colmos por planta, biomassa seca acumulada (Bs), incremento médio anual (ICA) e produtividade primária líquida do tronco (PPLT) por área, correspondente ao décimo segundo mês de avaliações.

Arranjo	Idade	D (cm)	Touceira	Ht	Bs tronco	ICA	PPLT
	(mês)	Colmo/fuste	(colmos pl ⁻¹)	(m)	(Mg ha ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	
Bambu 3 x 2 m	18	2,88 D	10	3,2 B	16,59 C	10,4 B	16,4 C
AEC-144 3 x 1 m	18	8,31 A	-	10,5 A	32,21 A	20,1 A	30,3 A
LW07 3 x 1 m	14	6,81 B	-	9,42 A	22,82 B	19,0 A	22,6 B
Salgueiro 3 x 1 m	14	3,41 C	-	2,14 C	0,98 D	0,81 C	0,95 D

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste de Tukey-Kramer ao 5% de significância.

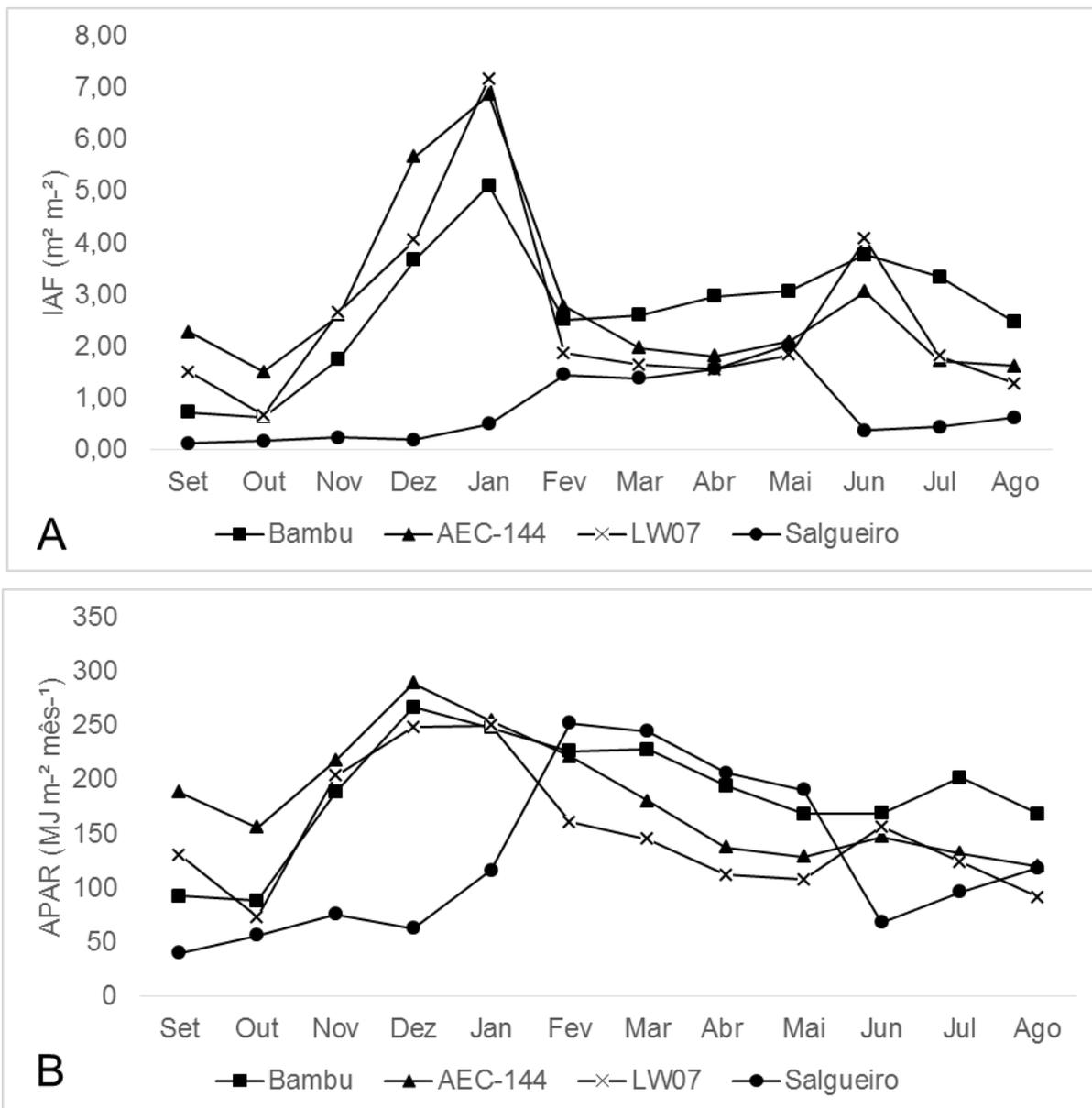
1.3.3 IAF e APAR

O máximo do IAF nos clones de eucalipto e o bambu foram registrados no mês de janeiro 2017, período este com maior precipitação, sendo que após esse pico máximo, houve queda do IAF mantendo-se na faixa de 1,5 e 3. Houve alguns picos

no mês de junho 2017 por consequência da elevada disponibilidade hídrica na forma de precipitação ocorrida no anterior (Figura 4).

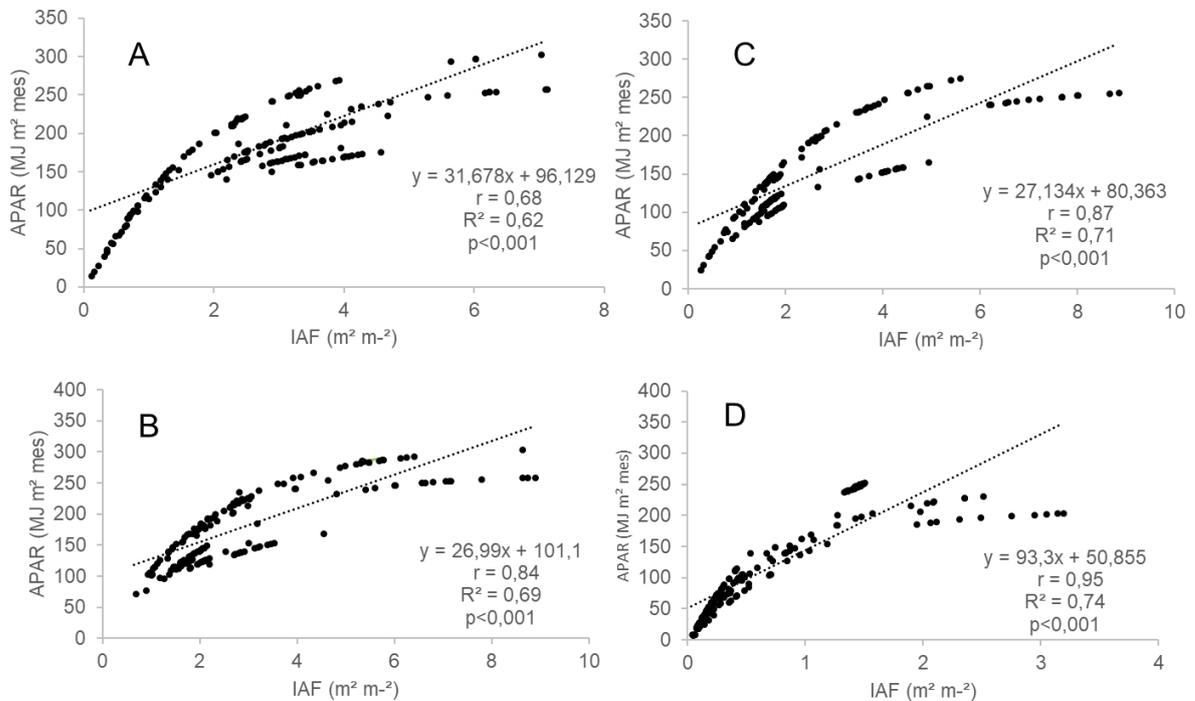
Os valores médios de IAF durante o ano foram significativamente maiores no clone AEC-144 de eucalipto do que no bambu e no clone de eucalipto LW07, porém, ao analisar os valores de APAR para o clone AEC-144 e bambu observou-se que estes não diferiram entre si. O salgueiro registrou os menores valores médios de IAF e APAR (Tabela 5 e Figura 4).

Figura 4 – IAF (A) e APAR (B) nos plantios de bambu, clone AEC-144, clone LW07 e salgueiro, no período setembro de 2016 até agosto de 2017 na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.



Todas as espécies, com exceção do salgueiro, apresentaram um elevado IAF médio, indicando que os clones de eucalipto absorveram grande parte da PAR. O bambu também absorveu grande parte da radiação, apesar de ter sido plantado com metade da sua densidade. Tais resultados mostraram que o IAF apresentou uma correlação positiva com APAR ($r=0,68$ bambu; $r=0,84$ AEC-144; $r=0,87$ LW07; e $r=0,95$ salgueiro) significativa ($p<0,001$), sendo mais estreita nos clones de eucalipto e o salgueiro (Figura 5).

Figura 5 – Correlações entre IAF e APAR nos plantios de bambu (A), clone AEC-144 (B), clone LW07 (C) e salgueiro (D), localizados na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.

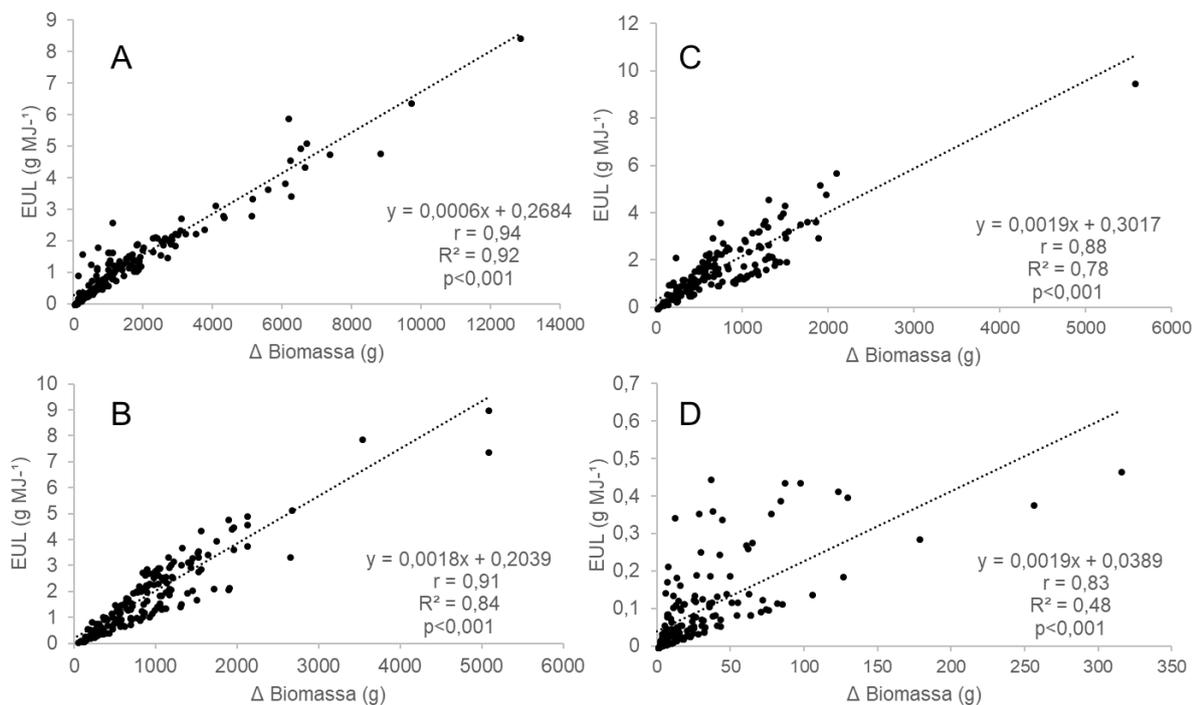


1.3.4 Eficiência no uso da luz

Os valores médios por área de EUL foram significativamente maiores no clone AEC-144 seguidos pelo clone LW07 e o bambu. Esse resultado nos permite dizer que para a mesma quantidade de radiação absorvida pelo dossel, o clone AEC-144 produziu 29% a mais de biomassa no tronco do que o bambu. Podemos ainda concluir que tais resultados mostram que a EUL apresentou correlação positiva com a produtividade primária líquida do tronco ($r=0,94$ bambu; $r=0,91$ AEC-144; $r=0,88$

LW07; e $r=0,83$ salgueiro) significativa ($p<0,001$) (Figura 6). O salgueiro apresentou os menores valores de crescimento do tronco, portanto, foi a espécie que apresentou menor eficiência em realizar a conversão de unidades de luz absorvida em gramas de biomassa produzida (Tabela 5).

Figura 6 – Correlações entre PPLT (Δ Biomassa) e EUL nos plantios de bambu (A), clone AEC-144 (B), clone LW07 (C) e salgueiro (D), localizados na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.



1.3.4.1 Relação entre área foliar, nutrientes no dossel e EUL

Com exceção do salgueiro, não foram observadas diferenças estatísticas em relação à área foliar entre as espécies estudadas (Tabela 4). Observa-se que a matéria seca foliar foi superior nos clones de eucalipto, seguidos pelo bambu e salgueiro e que tanto a área foliar como a matéria seca foliar apresentaram diferenças significativas ao longo tempo, apesar de não apresentaram diferença significativa em relação a área foliar específica entre tratamentos.

Tabela 4 - Médias de área foliar (AF), matéria seca foliar (MSF) e área foliar específica (AFE) ao longo do ano, junto com o erro padrão da média (EPM) e teste de Tukey-Kramer, cujas médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de significância de 5%.

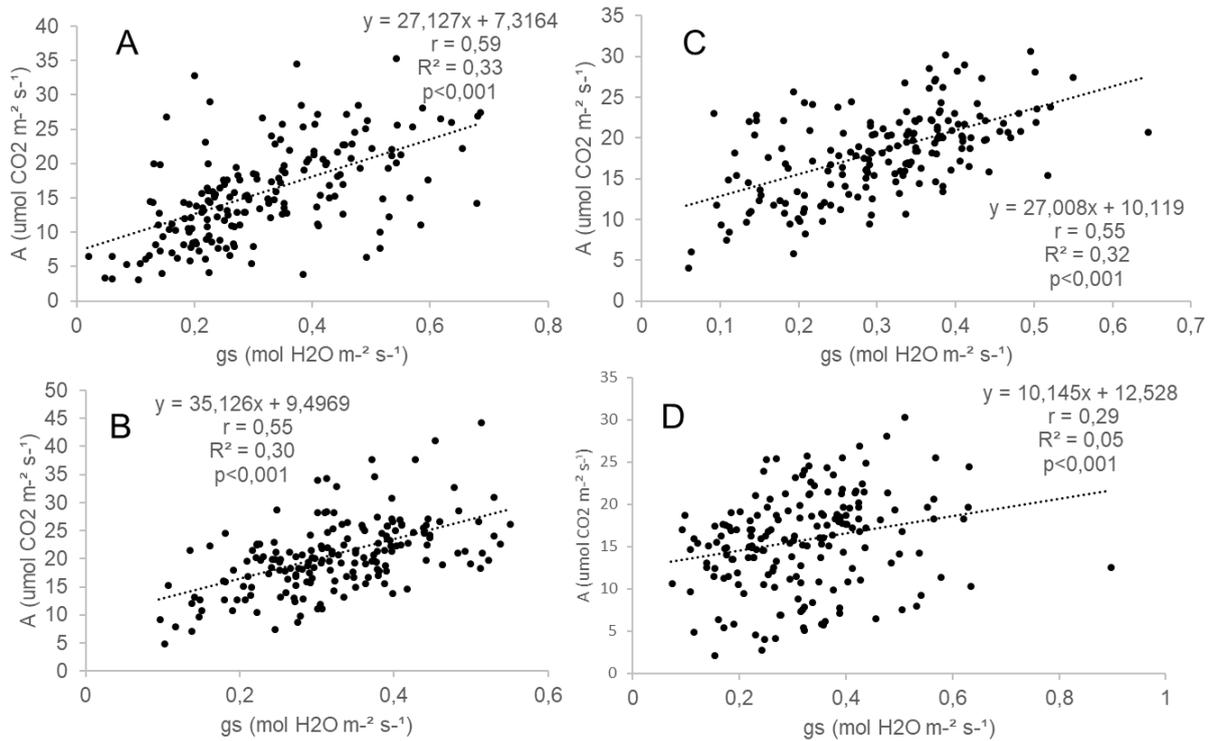
Idade (meses)	Arranjo	AF (cm ²)			MSF (g)			AFE (cm ² g ⁻¹)		
		Média	EPM	Test	Média	EPM	Test	Média	EPM	Test
18	Bambu 3 x 2 m	6069	638	A	48,34	8,02	B	155,19	15,23	A
18	AEC-144 3 x 1 m	6717	359	A	72,85	4,41	A	93,95	4,60	A
14	LW07 3 x 1 m	5287	375	A	55,89	5,51	A	101,13	7,52	A
14	Salgueiro 3 x 1 m	724	39	B	8,19	1,31	C	130,17	6,51	A

Houve correlação positiva significativa ($p < 0,05$) para o bambu, entre EUL e os índices de nutrientes, exceto para o nutriente ferro, com valores entre $r = 0,67$ para boro e $r = 0,83$ para enxofre. Não houve correlações entre a EUL e os índices de nutrientes para os clones de eucalipto e salgueiro (Apêndice 1).

1.3.5 Assimilação líquida de CO₂ e eficiência no uso da água

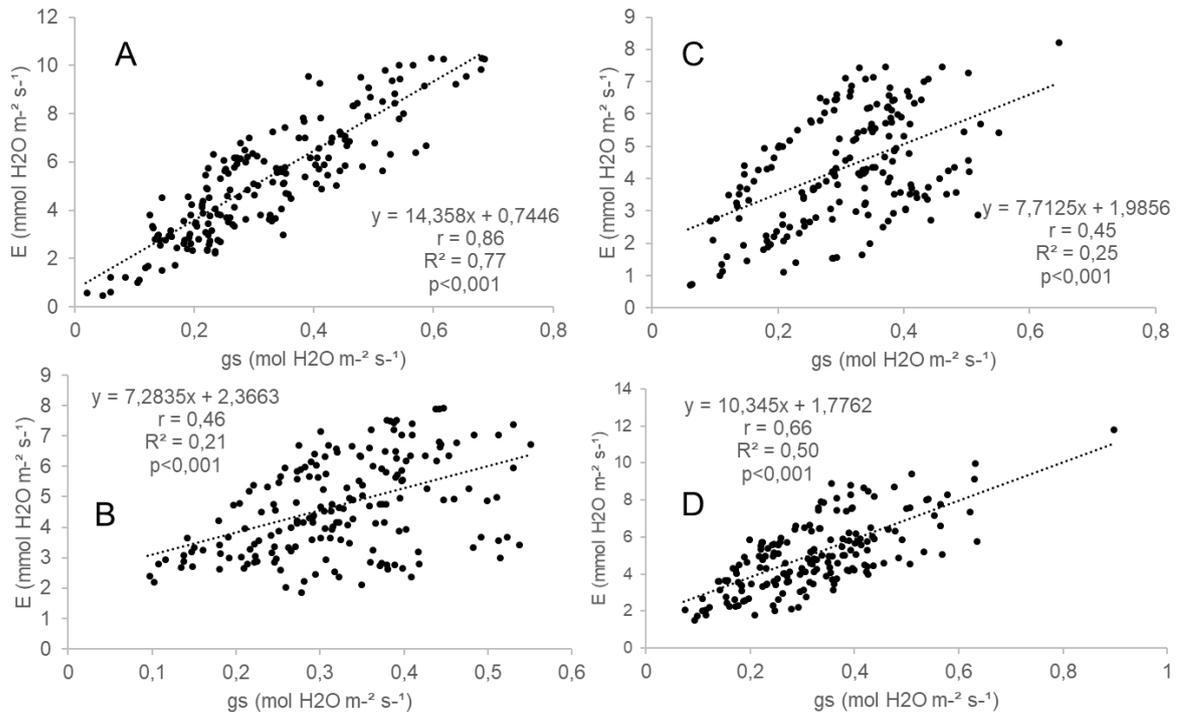
O maior valor de taxa fotossintética foi observado no clone AEC-144, sendo que o bambu e o salgueiro apresentaram taxas fotossintéticas similares (Tabela 6). Apesar de o bambu ser uma planta C₄, foi observado uma assimilação líquida de CO₂ menor do que os clones de eucalipto. A condutância estomática média não apresentou diferenças entre as espécies, porém, houve correlação positiva significativa ($p < 0,001$) entre a taxa fotossintética e a condutância estomática para bambu e os clones AEC-144 e LW07 ($r = 0,59$; $r = 0,55$; $r = 0,55$), justificada pelo fato de que a diminuição na condutância estomática leva a uma diminuição na taxa fotossintética e vice-versa (Figura 7).

Figura 7 – Correlações entre assimilação líquida de CO₂ (A) e condutância estomática (gs) nos plantios de bambu (A), clone AEC-144 (B), clone LW07 (C) e salgueiro (D), localizados na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.



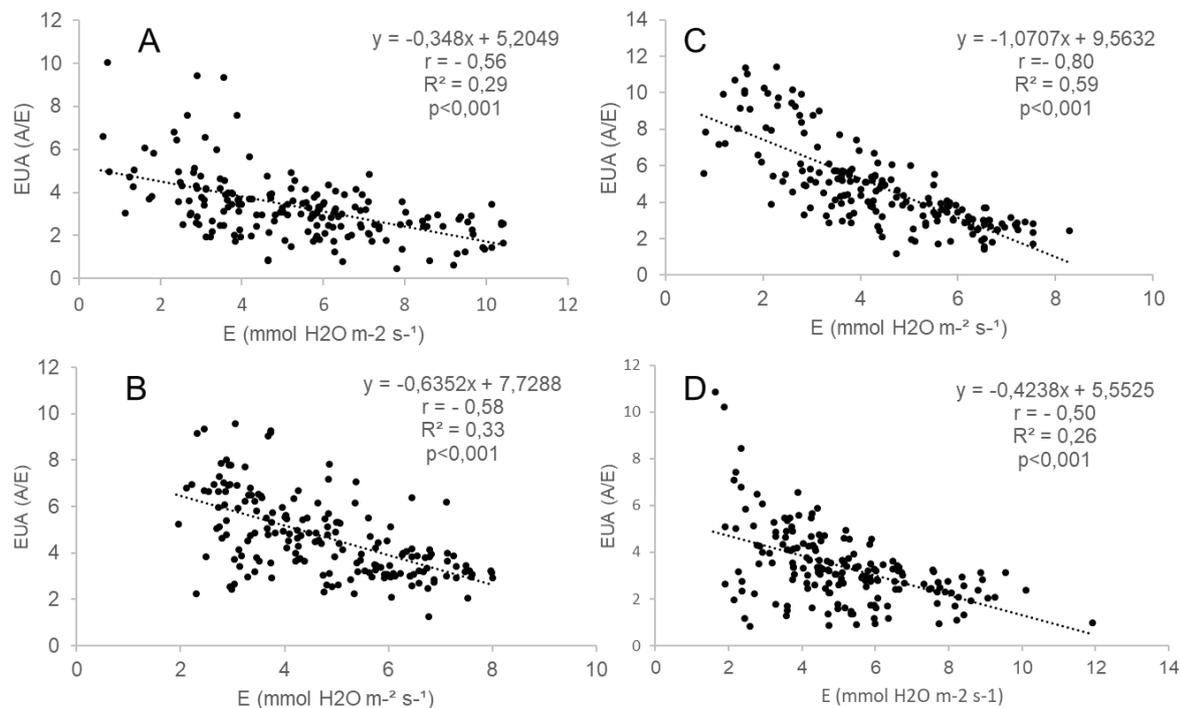
Ao analisar o bambu, nota-se uma alta correlação positiva e significativa ($r=0,86$; $p<0,001$) entre condutância estomática e transpiração (Figura 8), mostrando que o aumento na condutância estomática implica no aumento das taxas de transpiração e, conseqüentemente, menor EUA observada para essa espécie.

Figura 8 – Correlações entre taxa de transpiração (E) e condutância estomática (g_s) nos plantios de bambu (A), clone AEC-144 (B), clone LW07 (C) e salgueiro (D), localizados na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.



Os maiores valores de EUA foram observados nos clones de eucalipto do que no bambu e o salgueiro (Tabela 6). Tais resultados obtidos são consistentes com as taxas de transpiração, mostrando que a melhor EUA nos clones de eucalipto foi devida a uma redução na taxa de transpiração, enquanto que, no bambu e no salgueiro foram menos por consequência do aumento nas taxas de transpiração. Foi observada uma correlação negativa entre a taxa de transpiração e a EUA ($r = -0,56$ bambu; $r = -0,58$ AEC-144; $r = -0,80$ LW07; $r = -0,50$ salgueiro) significativa ($p < 0,001$), sendo mais estreita para o clone LW07 (Figura 9).

Figura 9 – Correlações entre taxa de transpiração (E) e EUA nos plantios de bambu (A), clone AEC-144 (B), clone LW07 (C) e salgueiro (D), localizados na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.



A EUAI também foi maior nos clones de eucalipto, denotando assim uma maior eficiência na conversão de unidades de água em unidades de biomassa produzida (Tabela 6).

No caso do bambu, também se observou relação negativa entre a produção de biomassa e a eficiência no uso da água ($r = -0,56$; $p < 0,001$) e correlação positiva no caso do clone LW07 ($r = 0,56$; $p < 0,001$), demonstrando problemas no desempenho deste, ocasionado pelas condições ambientais do local.

Tabela 5 - Médias do Índice de área foliar (IAF), radiação fotossintética ativa absorvida (APAR), biomassa seca (Bs) produtividade primária líquida do tronco (PPLT) e eficiência no uso da luz ao longo de um ano, junto com o erro padrão da média (EPM) e teste de Tukey-Kramer, cujas médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de significância de 5%.

Idade (meses)	Arranjo	IAF (m ² m ⁻²)			APAR (MJ m ⁻² ano ⁻¹)			Bs (g pl ⁻¹)			PPLT (g pl ⁻¹ ano ⁻¹)			EUL (g MJ ⁻¹)		
		Média	EPM	Test	Média	EPM	Test	Média	EPM	Test	Média	EPM	Test	Média	EPM	Test
18	Bambu 3 x 2 m	2,72	0,11	AB	182,19	4,32	A	8070	530	A	1562	144	A	1,28	0,10	C
18	AEC-144 3 x 1 m	2,82	0,13	A	177,37	4,31	A	4560	260	B	873	53	B	1,8	0,11	A
14	LW07 3 x 1 m	2,51	0,13	AB	148,39	4,34	B	3180	200	C	683	44	B	1,57	0,10	B
14	Salgueiro 3 x 1 m	0,76	0,06	C	121,3	5,96	C	110,0	10	D	25	2	C	0,09	0,00	D

Tabela 6 - Médias da taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), taxa de transpiração (E), condutância estomática (gs), eficiência da transpiração (EUA) e eficiência intrínseca no uso da água (EUAI) ao longo de um ano, junto com o erro padrão da média (EPM) e teste de Tukey-Kramer, cujas médias seguidas da mesma letra não diferem estaticamente entre si, ao nível de significância de 5%.

Idade (meses)	Arranjo	A (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)			E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)			gs (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)			EUA (μmol CO ₂ mol H ₂ O ⁻¹)			EUAI (μmol CO ₂ mol H ₂ O ⁻¹)		
		Média	EPM	Test	Média	EPM	Test	Média	EPM	Test	Média	EPM	Test	Média	EPM	Test
18	Bambu 3 x 2 m	15,86	0,51	C	5,26	0,17	A	0,31	0,01	A	3,41	0,12	B	57,19	2,59	B
18	AEC-144 3 x 1 m	20,78	0,47	A	4,70	0,12	B	0,32	0,01	A	4,74	0,13	A	68,10	1,63	A
14	LW07 3 x 1 m	18,33	0,38	B	4,33	0,13	C	0,30	0,01	A	4,93	0,17	A	66,67	2,18	AB
14	Salgueiro 3 x 1 m	15,74	0,42	C	5,05	0,14	AB	0,32	0,10	A	3,37	0,11	B	57,55	2,31	B

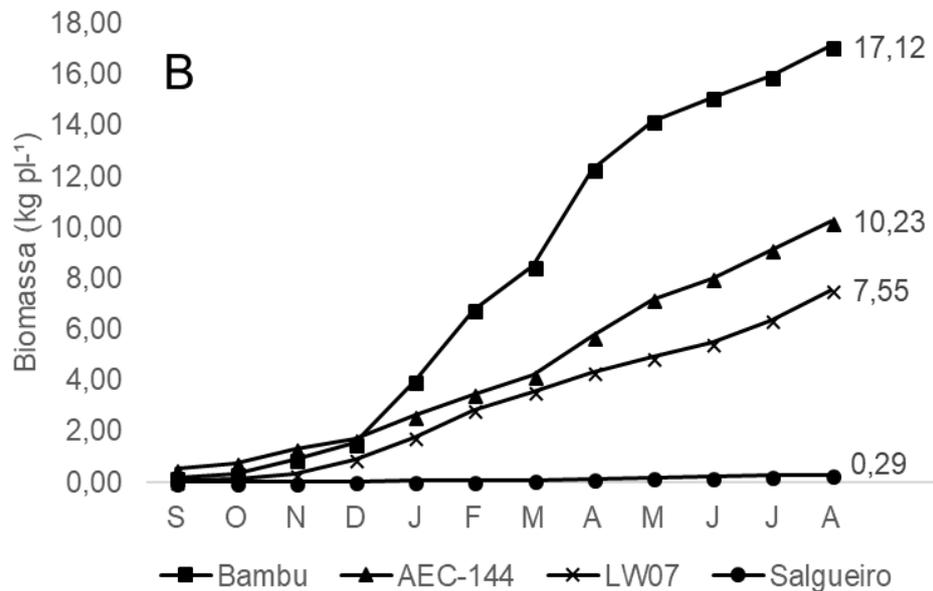
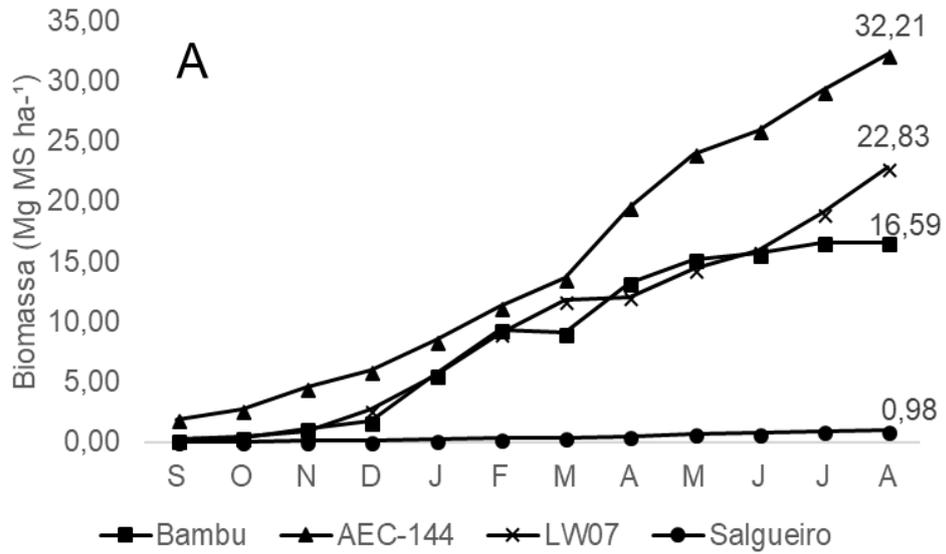
1.4 Discussão

1.4.1 Produção e acúmulo de biomassa

O acúmulo de biomassa neste estudo foi calculado ao nível do tronco e foram obtidos aos 18 meses para o clone AEC-144 e bambu em 32,21 e 16,59 Mg MS ha⁻¹ respectivamente, enquanto, para o clone LW07 e o salgueiro, com 14 meses de idade 22,82 e 0,98 Mg MS ha⁻¹ (Figura 10). Baseando-se no estudo realizado por Stape et al. (2004), o IMA reportado para este estudo para os clones de eucalipto são altos, intermediários para bambu e muito baixo para o salgueiro. Embora, os resultados ao nível de planta resultem que o bambu foi a espécie com maior produção de biomassa (Tabela 5 e Figura 10), essas diferenças na produtividade da biomassa podem ser justificadas devido ao espaçamento, uma vez que foram utilizados menores espaçamentos no plantio de eucalipto e maiores no plantio do bambu.

No entanto, o bambu apresentou valores menores devido ao maior espaçamento, quando comparado aos clones de eucalipto, sendo que estes valores foram maiores em relação as outras espécies de bambu. Liese (1985) relatou valores entre 3 Mg MS ha⁻¹ para *Bambusa tulda* na Índia e entre 10 e 14 Mg MS ha⁻¹ para *Melacanna bambusoides* e *Phyllstachys bambusoides* em Bangladesh e Japão, respectivamente. Além disso, plantios com menores espaçamentos podem ser mais desejáveis devido à crescente crise hídrica, por terem sido demonstrado que embora, nos primeiros anos os plantios mais adensados apresentem altas taxas de produtividade, quando comparados aos plantios menos adensados, nos anos subsequentes as taxas de produtividade entre os dois espaçamentos tendem a ser iguais, pelo fato da necessidade de redistribuição de recursos. Campoe et al. (2010) demonstraram que plantios de espécies nativas nos espaçamento 3 m × 1 m, nos primeiros dois anos, apresentam taxas de produtividade maiores em relação aos plantios com espaçamento 3 m × 2 m, sendo que, a partir dos 3,5 anos as taxas de produtividade se igualaram entre os plantios mais e menos adensados.

Figura 10 – Produção e acúmulo de biomassa seca a nível de área (A) e a escala de planta (B) nos plantios de bambu, clone AEC-144, clone LW07 e salgueiro, no período setembro de 2016 até agosto de 2017 na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP.



1.4.2 Produtividade primária líquida do tronco

A PPLT média estimada nesse estudo, à escala de planta para os clones AEC-144 e LW07 foi de 873 e 683 g C pl⁻¹ ano⁻¹ e por área 3.030 e 2.260 g C pl⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. O aumento na produtividade por área ocorreu devido ao maior número de indivíduos por unidade de superfície. Leite et al. (1997) constataram que o aumento da densidade de plantas afetou a alocação do carbono no povoamento, com maior proporção de fotoassimilados alocados no tronco aumentando sua produtividade nos plantios mais densos e de copa menos densas. Esses resultados são consistentes e corroboram com os obtidos nesse estudo.

Os valores deste estudo encontram-se no intervalo reportado por Stape et al. (2004), que determinaram para diferentes estados brasileiros e com uma ampla gama de condições como clone, idade e densidade de plantio, uma PPLT entre 470 e 3.000 g C pl⁻¹ ano⁻¹, sendo mais comum uma média de 1.575 g C pl⁻¹ ano⁻¹ (LE MAIRE et al., 2013; RIBEIRO et al., 2015). Plantios mistos, como entre *E. grandis* e *Acacia mangium* podem apresentar valores médio levemente superiores (1.875 g C pl⁻¹ ano⁻¹) ao reportado para plantações puras (LE MAIRE et al., 2013). Os valores registrados nesse estudo, a escala de planta, segundo Stape et al. (2004) são valores de produtividade baixos, sendo que entre 1.000 e 1.700 g C pl⁻¹ ano⁻¹ seriam intermediários e acima de 1.700 g C pl⁻¹ ano⁻¹ altos. Porém, a nível de área, pelo menor espaçamento dos plantios de eucalipto, os valores apresentados de PPLT neste estudo foram altos e intermediários para o bambu (1.640 g C pl⁻¹ ano⁻¹) e deficientes para o salgueiro (0,095 g C pl⁻¹ ano⁻¹). Os valores para eucalipto encontram-se dentro também do intervalo relatado por Guerra et al. (2014) (2.000 a 4.500 g C pl⁻¹ ano⁻¹), para plantações energéticas. Valores importantes, considerando que os autores calcularam a produtividade a partir do crescimento da biomassa aérea e não apenas o tronco, como neste estudo. Esses resultados sugerem que a região não apresenta limitações para o desenvolvimento de plantações de eucalipto (clones AEC-144 e LW07) para obtenção de alta produtividade.

Existem poucos estudos sobre produtividade para o bambu. A produtividade média para *Bambusa vulgaris* neste estudo foi estimada a escala de planta em 1.562 g C pl⁻¹ ano⁻¹ e a nível de área em 1.640 g C pl⁻¹ ano⁻¹, valores que não diferem entre si, provavelmente pelo maior espaçamento entre plantas, correspondendo a

produtividades intermediárias segundo o trabalho de Stape et al. (2004), quando comparado com o eucalipto. No entanto, apresenta valor médio baixo, quando comparado a outros estudos realizados. Sohel et al. (2015), uma vez que nas florestas de *Bambusa vulgaris* no Bangladesh reportaram em média, uma produtividade primária líquida aérea (PPLA) de 5.044 g C pl⁻¹ ano⁻¹. Yen (2016), enquanto que nas florestas nativas de *Phyllostachy pubescens* em Taiwan reportou um valor médio de PPL de 4.810 g C colmo⁻¹ ano⁻¹ incluindo no cálculo o crescimento de folhas e galhos, porém, para esse mesmo estudo, observou-se uma PPLT média de 4.400 g C colmo⁻¹ ano⁻¹. Wang et al. (2015) reportaram para as florestas de *Phyllostachy makinoi*, também na Taiwan, uma PPLA de 2.481 g C pl⁻¹ ano⁻¹. Tais resultados mostram que, *B. vulgaris*, *P. pubescens* e *P. makinoi* nas condições de Bangladesh e Taiwan, produziram 69%, 64% e 37% a mais biomassa respectivamente, quando comparada à média registrada neste estudo. As discrepâncias observadas nos dados, além das frações consideradas no cálculo de PPL, podem ser justificadas devido às melhores condições ambientais dos locais, principalmente em relação à disponibilidade de água (2.200 a 4.600 mm ano⁻¹), uma vez que as temperaturas (11 a 25°C) relatadas pelos autores são similares ao período de estudo nesse experimento. Francis (1993) relata que *B. vulgaris* apresenta maior taxa de crescimento em precipitações anuais entre 1.500 e 3.800 mm. Outros fatores, como a idade do plantio e características intrínsecas das espécies do gênero *Phyllostachy*, como o porte, também podem estar influenciando os resultados obtidos.

A produtividade do tronco obtida para o salgueiro foi de 5 g C pl⁻¹ ano⁻¹ superior a encontrada por Labrecque et al. (1993), 20 g C pl⁻¹ ano⁻¹ em plantios de *Salix viminalis* no Canadá. Segundo estudos a produtividade encontrada é muito baixa, uma vez que existem produtividades relatadas para diferentes espécies de *Salix* em áreas temperadas, com médias entre 89 e 3.000 g C pl⁻¹ ano⁻¹ com densidades de plantio de 10.000 a 30.000 estacas ha⁻¹, respectivamente (ROBERTSON, 1986; VOLK et al. 2006; BREDEMEIER et al., 2015).

1.4.3 IAF e APAR

A queda do IAF nos clones de eucalipto e bambu (Figura 4), após atingir seu pico máximo, ocorreu devido ao auto sombreamento, resultando assim em uma menor

capacidade fotossintética das folhas, as quais ainda realizam a respiração dos fotoassimilados produzidos no dossel para as células vivas (SOUZA et al. 2009).

Com relação ao IAF e APAR, mesmo que tenha ocorrido um IAF elevado para todas as espécies, com exceção do salgueiro, a correlação do deste foi muito mais estreita com a APAR nas plantas C3 devido a maior densidade do plantio. Le Maire et al. (2013) e Trautenmüller et al. (2017) relataram que o IAF em *Acacia mangium* e *Cordia americana*, respectivamente, aumentou com o maior número de indivíduos por unidade de superfície, e tais diferenças observadas no IAF médio entre as espécies, podem ser explicados pela variação no APAR.

Embora, a produção e a produtividade do bambu tenha sido maior por planta, segundo Kleinhenz e Midmore (2001) e Mendes et al. (2010) devido a maior disponibilidade de recursos do ambiente por unidade de superfície, o IAF só aumenta conforme a densidade do plantio, sendo maior o IAF nos plantios mais adensados, com exceção do salgueiro, o que permite maior interceptação de radiação e conseqüentemente maior conversão de biomassa por área. Resultados similares foram observados por Pangle et al. (2009), onde maiores IAF resultaram em 91% de interceptação da radiação nos plantios de pinus contra o 81% da captura de luz em uma floresta decídua.

1.4.4 Eficiência no uso da luz (EUL)

A EUL foi definida nesse estudo como o crescimento da biomassa do tronco pela quantidade de luz absorvida e foi estimada em 1,80 e 1,57 MJ⁻¹ em média, para plantios adensados de eucalipto clones AEC-144 e LW07, respectivamente. Tais valores obtidos, apesar de não levarem em consideração o crescimento da biomassa de folhas e galhos no cálculo da PPL e, conseqüentemente, na EUL, foram superiores aos obtidos por Stape et al. (2004) (1,14 g MJ⁻¹) e similares aos observados por Whitehead e Beadle (2004) (1,7 MJ⁻¹), que consideraram a produtividade primária líquida aérea para o cálculo da EUL em plantios de eucalipto. Os resultados obtidos também foram superiores aos encontrados por Marsden et al. (2010), Le Maire et al. (2013) e Da Silva et al. (2016), que observaram uma EUL média de 1,18 g MJ⁻¹, 1,05 MJ⁻¹ e 0,61 MJ⁻¹, respectivamente, em plantações de eucaliptos no Brasil utilizando no cálculo de PPL, somente o crescimento do tronco. Os resultados encontrados podem estar relacionados com a disponibilidade de

recursos obtidos para a plantação. Stape et al. (2004) mencionam que valores com médias próximas a 2 g MJ^{-1} podem ser associado a regiões altamente produtivas, ao passo que valores abaixo de $0,50 \text{ g MJ}^{-1}$ estão relacionadas com zonas climáticas limitadas pela disponibilidade de água.

Com relação ao bambu, estimou-se um valor médio de EUL de $1,28 \text{ g MJ}^{-1}$ aos 18 meses. Esse valor é inferior aos obtidos nos clones de eucalipto (plantas C3), descritos neste estudo, plantados a uma densidade de 3.333 pl ha^{-1} . Esse valor na EUL para bambu encontra-se no abaixo do intervalo quando comparado com plantas C4, como cana-de-açúcar ($1,29 \text{ g MJ}^{-1}$ e $2,67 \text{ g MJ}^{-1}$) plantada a uma densidade de 13.300 plântulas ha^{-1} na Bahia, Brasil (DA SILVA et al., 2014). O valor encontrado também é menor, ao ser comparado com a EUL de pastagens perenes de *Miscanthus x giganteus* ($2,70 \text{ g MJ}^{-1}$) plantadas a uma densidade de 15.000 rizomas ha^{-1} (ALEXOUPOULOU, 2018). A diferença observada na EUL no bambu pode estar relacionada à menor densidade do plantio (1.666 pl ha^{-1}) realizada no experimento, uma vez que, gramíneas C4, apresentam elevada capacidade fotossintética e conseqüentemente uma alta produtividade, segundo relatado por Ceotto et al. (2013), associado ainda a um maior número de indivíduos por área, aumentando a eficiência de interceptação da radiação solar (TOLLENAAR et al., 1997) e, portanto, ocorre maior conversão de biomassa por unidade de luz absorvida.

Além da densidade do plantio, as variações na EUL entre os clones de eucalipto e o bambu podem estar relacionadas a idade do plantio. Le Maire et al. (2013) reportaram valores baixos de EUL para plantios de eucalipto nos primeiros dois anos após o plantio e depois um aumento nos anos quatro e cinco. Tais autores mencionam que a baixa EUL ocorrida durante o início da fase de crescimento, pode ser originada pela maior metabolização de fotossintatos para construir órgãos de captação de recursos (folhas e raízes), destinando um valor mais baixo para o tronco.

O salgueiro apresentou valor médio abaixo do normal por consequência do baixo valor de IAF e, portanto, baixa absorção de luz, refletindo assim, na baixa produção e produtividade da biomassa observada. Cerasuolo et al. (2016) observaram valores para *Salix* spp., em condições ambientais favoráveis (regiões temperadas) entre $0,6$ e $1,8 \text{ g MJ}^{-1}$.

1.4.4.1 Relação entre área foliar, nutrientes no dossel e EUL

Os clones de eucalipto e o bambu apresentaram maior área foliar (Tabela 4), produzindo dessa forma maior quantidade de biomassa no tronco, ao ser comparado com o salgueiro (Tabela 3 e 5). Resultados similares foram obtidos por Wink et al. (2012) e Le Maire et al. (2013) em plantios de *Eucalyptus* spp. com diferentes espaçamentos e *E. grandis* comparado com plantios de *Acacia mangium*, respectivamente. Segundo esses autores, isso ocorre porque as plantas absorveram aproximadamente a mesma quantidade de PAR, por apresentarem maior área foliar e APAR.

A correlação positiva entre EUL e os índices de nutrientes, com exceção de ferro no dossel no plantio de bambu, denota tempos diferentes no desenvolvimento da cultura, em relação as outras espécies possivelmente pela demora no estabelecimento das plantas de bambu em campo, quando comparado aos clones de eucalipto e o salgueiro.

Green et al. (2003) explicam que a diferença entre resultados pode surgir por causa de diferenças existentes em relação a alocação do carbono. Dessa forma, a produtividade do tronco por área foi consideravelmente maior desde o primeiro ano para os clones de eucaliptos, quando comparado ao bambu. Por outro lado, o bambu ainda está em um gradiente de ascensão, adaptação, aclimatação, mudanças na morfologia e alocação de recursos, o que justifica o valor alto de correlação. A produtividade e EUL no bambu pode seguir aumentando nos seguintes meses, assim como observado por Green et al. (2003) e Piouceau et al. (2014), que relataram um maior conteúdo de nutrientes no dossel, aumenta a atividade fotossintética, fazendo aumentar a quantidade de fotossintatos alocados para o tronco, uma vez que os órgãos de captura de luz já foram estabelecidos.

Essa forte relação entre EUL e índice de nutrientes no dossel do bambu também pode estar relacionada com a densidade do plantio, pois Campoe (2008) em estudos observou alta correlação positiva entre EUL e o índice de nitrogênio, nos plantios com espaçamento 3 m x 2 m, ao contrário do espaçamento 3 m x 1 m. O autor atribuiu essa diferença, ao déficit hídrico o que comprometeu a EUL.

1.4.5 Assimilação líquida do CO₂ e eficiência no uso da água

A diminuição da condutância estomática e a queda mais rápida da taxa de transpiração do que a queda na fotossíntese nos clones de eucalipto, quando comparado ao bambu e o salgueiro (Tabela 6) indicam a existência de mecanismos de aclimatação. Os clones de eucalipto estão mais aclimatados às condições ambientais locais, conseguindo reduzir de forma mais eficiente as perdas de água, sob condição de déficit hídrico moderado do que o bambu e o salgueiro.

No caso do AEC-144, este estudo reafirma o uso do material vegetal, assim como confirma o uso do clone LW07 para ser plantados sob as condições edafoclimáticas testadas. O comportamento das variáveis: condutância estomática, taxas de transpiração e fotossintética foram similares aos resultados reportados por Oliveira et al. (2002) em plantas de pupunheira (*Bactris gasipaes*) sob deficiência hídrica.

Embora, o bambu tenha apresentado uma taxa fotossintética média menor, ao ser comparado aos clones de eucalipto (Tabela 6), a taxa fotossintética neste estudo foi similar às obtidas por Gratani et al. (2008), ao compararem espécies *Bambusa ventricosa*, *Phyllostachys pubescens* e *Phyllostachys bambusoides*, relataram valores médios de assimilação líquida de CO₂ de 12,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no inverno e 16,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no verão. O experimento foi realizado com temperaturas entre 16 e 26 °C, similares a registradas neste estudo (Figura 2).

As diferenças na taxa fotossintética entre o bambu e os clones podem ter ocorrido devido ao déficit de pressão de vapor da água (DPV) apresentado na folha, no momento da medição. No período da realização de 8h30 a 11h30, pode ter ocorrido variação no vapor da água, uma vez que foi registrado principalmente no final da manhã, valores de DPV maiores a 1,2 kPa, supondo que o menor potencial hídrico da planta e o déficit hídrico, ocasionaram o fechamento estomático e, conseqüentemente, a redução na taxa fotossintética. Tardieu e Davies (1992) e Tatagiba et al. (2009) relataram que a deficiência hídrica é suficiente para diminuir o teor de água nos tecidos vegetais provocando uma redução da abertura estomática, ocasionando uma queda na assimilação de carbono pela fotossíntese, diminuindo a produtividade primária da planta.

Os resultados indicam reduções da taxa fotossintética devido a deficiência hídrica, corroborando com afirmações de Cooper e Wilson (1970). Alguns estudos

mostram a relação entre a diminuição da quantidade de água no solo e a redução na assimilação de CO₂ pelas plantas (EPRON; DREYER, 1993; KUBISKE; ABRAMS, 1994). A redução nas taxas de assimilação de CO₂ e da condutância estomática podem estar associadas menor conteúdo de água no solo, dessa forma, o bambu e o salgueiro apresentaram um déficit hídrico quatro vezes maior do que os clones de eucalipto. Associado a isso houve uma correlação positiva entre taxa fotossintética e condutância estomática neste estudo assim como foi observada por Gratani et al. (2008).

A deficiência hídrica e a menor atividade fotossintética no bambu podem estar associadas com a arquitetura da copa e com os menores valores obtidos de IAF (Tabela 5). Plantas que apresentam uma copa esférica estendida, com poucas folhas fotossinteticamente ativas e decumbentes ou com orientação vertical como as de bambu, proporcionam menor captação de luz e taxas de crescimento inferiores. Os menores valores de IAF, são consequência de uma maior área de projeção de copa e menor área foliar por planta, maiores densidades de plantas por área podem reduzir a área de projeção de copa no solo pois podem modificar a forma de copa esférica estendida para formas mais cônicas ou colunares aumentando dessa maneira o IAF (LARCHER, 2006; SOUZA et al. 2009).

Os maiores valores de IAF nos clones de eucalipto aumentaram a eficiência na captação de luz e, portanto, maiores taxas fotossintéticas (Tabela 5 e 6). Inoue e Ribeiro (1998) mencionam que a produção fotossintética nos híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *E. grandis* × *E. urophylla*, não é resultante do efeito de maior potencial fotossintético e sim pelo fato de apresentarem maior IAF.

Com relação ao salgueiro, os resultados neste estudo são menores aos registrados na literatura. O salgueiro em condições ambientais adequadas de clima temperado apresenta taxas fotossintéticas entre 18,9 e 23,3 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (CERASUOLO et al. 2016). Os resultados obtidos no presente estudo mostram ainda discrepâncias nos resultados, justificado pelo fato de ter um valor intermediário de fotossíntese, o qual pode dever-se a escala de avaliação, pois a taxa fotossintética foi medida a escala de folha e a produção e produtividade de biomassa foram medidas a nível da planta. Outro fator, que pode ter influenciado nos resultados da taxa fotossintética do salgueiro, foram os contínuos ataques de desfolha da vaquinha da *Salix* (besouro desfolhador da ordem Coleóptera, família Chrysomelidae), seguidos por contínuos controles, originando a renovação

permanente de folhas, podendo resultar em um material mais ativo fotossinteticamente, no terço superior da copa, no momento da medição, gerando valores mais altos e mesmo sem produzir a quantidade de biomassa esperada.

1.4.5.1 *Eficiência no uso da água e eficiência intrínseca no uso da água*

A EUA foi maior em plantios adensados do bambu quando comparado a uma floresta de bambu mossô na China (WANG et al. 2016) e ao comparar com os resultados reportados por Medrano et al. (2007) para plantas C4 ($2,76 - 3,75 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$). A EUA no bambu foi próxima aos resultados encontrados por Stape et al. (2004), em parcelas não irrigadas de *Eucalyptus* com uma precipitação de 1.770 mm e menores do que as reportadas neste mesmo estudo para os clones de eucalipto.

A EUA no bambu e no salgueiro reduz de acordo com às condições ambientais. Nos clones de eucalipto segundo estudos, a ocorrência da discrepância na resposta da EUA entre espécies pode ter sido devido a maior ou menor capacidade de adaptação das espécies (REICHSTEIN et al. 2002; KOTANI et al. 2014; MI et al. 2014). Tais resultados mostram que a melhor adaptação dos clones de eucalipto ao local, fez com que este se torne menos susceptível ao déficit hídrico ao ser comparado com o bambu e o salgueiro. Segundo Lu e Zhuang (2010) a EUA aumenta quando o déficit hídrico é moderado, a passo que tende a diminuir sob condições severas períodos de seca. É importante salientar que durante o ano de condução e avaliação do experimento, ocorreram dois meses com secos. A diminuição do EUA durante os meses secos foi provavelmente ocasionada devido ao fechamento estomático, mudanças na capacidade fisiológica da fotossíntese, redução da condutância do mesófilo para o CO_2 e fotoinibição (REICHSTEIN et al., 2002).

No caso específico do bambu, houve alta correlação positiva encontrada entre condutância estomática e transpiração e uma correlação negativa entre produção de biomassa e eficiência no uso da água, demonstrando que o aumento nas taxas de transpiração reduz a EUA na conversão em biomassa em espécies que apresentam problemas no desenvolvimento da planta ocasionado por condições ambientais locais.

A menor EUA no bambu em relação aos clones de eucalipto pode ser associada ao fato de que espécies do gênero *Eucalyptus*, apresentam mecanismos de economia de água (SILVA et al., 2004; STAPE et al., 2004). Alguns desses mecanismos envolvem a presença de tecido foliar coriáceo espessado, alinhamento vertical das folhas, fechamento rápido dos estômatos, baixas taxas de transpiração e elevada razão raiz/parte aérea (SILVA et al., 2004).

Com relação à EUAI, os resultados obtidos no presente experimento, para os clones de eucalipto estão na faixa de resultados reportados por Medrano et al. (2007) sendo de alta eficiência apresentando valores entre 60 e 68 A/g. Entretanto, o bambu e o salgueiro, obtiveram menores valores, sugerindo que os clones de eucalipto podem atingir elevadas taxas de crescimento em condições de seca moderada, uma vez que o bambu pode alcançar taxas de crescimento intermediárias e conforme seja sua aclimatação pode atingir valores maiores. No caso do salgueiro, a pouca eficiência no uso da água, pode ser associada a fatores como tipo de solo, quantidade de radiação solar, necessidade nutricionais, susceptibilidade ao ataque frequente da vaquinha da *Salix*, dificultando sua aclimatação e adaptação ao local do estudo e conseqüentemente proporcionam redução na área foliar e produção de biomassa. Além disso, a escala de avaliação pode ter influenciado nos resultados, pois o salgueiro apresenta uma alta eficiência no uso da água a escala de folha, porém tem pouca produtividade a escala de planta.

1.5 Conclusões

Os clones de eucalipto responderam bem a intensificação do manejo (altas densidades e altas doses de adubação), apresentaram maiores IAF, maior produção fotossintética por unidade de luz interceptada, altas taxas de crescimento e, uma alta eficiência no uso dos recursos luz e água, valores estes que são consistentes com aqueles analisados em outros estudos. Ambos os clones de eucalipto podem atingir elevadas taxas de produtividade em condições de seca moderada, confirmando seu potencial para fornecer matéria prima para geração de energia.

No entanto, o bambu também se mostra com um alto potencial para o fornecimento de biomassa para energia. Apesar de que, nesta idade (18 meses), atingiu valores intermediários de fotossínteses, produtividade e eficiência no uso dos

recursos luz e água, condicionados pelo déficit hídrico, arquitetura de copa e por apresentar menor adensamento, a espécie proporcionou uma maior produção de biomassa ao ser comparada com outras espécies de bambu e então se torna, aceitável para o mercado como forma de complementar mercado de eucalipto, além de apresentar vários benefícios, como:

1) Custo zero no controle de pragas e doenças, uma vez que foi observado que desde o estabelecimento da plantação até o fim das avaliações desse estudo não foi registrada nenhuma ocorrência de pragas ou doenças;

2) Em termo de sustentabilidade, plantios menos espaçados podem ser mais interessantes devido à crescente crise hídrica, e pelo fato de ter sido demonstrado que embora, nos primeiros dois anos os plantios mais adensados apresentem altas taxas de produtividade ao serem comparados aos plantios menos adensados, no período de 3,5 anos as taxas de produtividade entre os plantios menos adensados ou mais adensados se igualam devido a necessidade de redistribuição de recursos;

3) As melhoras na atividade fotossintética deverão ocorrer conforme avance a aclimação da espécie. Como foi observado nesse estudo, as plantas de bambu encontram-se no processo de ajuste às condições do local de estudo, modificando-se morfológicamente e alocando cada vez mais carbono no tronco, recebendo o adequado suprimento de água e nutrientes a produção de biomassa seca é controlada pela radiação disponível.

Até o momento, os resultados sugerem a utilização de maior densidade de plantio para aumentar o IAF, permitindo assim maior interceptação de radiação, maiores taxas fotossintéticas e conseqüentemente, maiores taxas de conversão de biomassa por área de bambu.

O tempo de avaliação do bambu deve ser estendido em função do seu crescimento mais lento, requerendo a continuidade do monitoramento da espécie até o ciclo de corte.

O salgueiro não se adaptou às condições locais do experimento.

O presente estudo mostra que a produtividade dos SFCR (altas densidades de plantio e altas doses de adubação) em ambientes tropicais está mais associada à disponibilidade de água, sendo que as limitações deste recurso podem afetar a eficiência no uso de luz e água, assim como a alocação de biomassa nos diferentes componentes da planta.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Apoio a Estudantes Estrangeiros de Doutorado (PAEDEX), pela bolsa concedida a primeira autora, o Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) e a Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa concedida ao quarto autor.

Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. 2003. Madeira - determinação da densidade básica, NBR 11941. Rio de Janeiro. Brasil.

BREDEMELER, M. et al. Fast growing plantations for wood production – integration of ecological effects and economic perspectives. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 3, p. 1–14, 2015.

BRITO, J.O.: TOMAZELLO, F.M.: SALGADO, A.L.B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **IPEF**, v. 36, p. 13–17, 1987.

CARDINALE, B. J. et al. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 46, p. 18123–18128, 2007.

CALDATO, S.L: SCHUMACHER, M.W. O uso de água pelas plantações florestais – uma revisão. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 507–516, 2013.

CAMPOE, O. **Efeito de práticas silviculturais sobre a produtividade primária líquida de madeira, o índice de área foliar e a eficiência do uso da luz em plantios de restauração da Mata Atlântica.** 121f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

CAMPOE, O. C.; STAPE, J.L.; MENDES, J.C.T. Can intensive management accelerate the restoration of Brazil' s Atlantic forests? **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1808–1814, 2010.

CEOTTO, E. et al. Comparing solar radiation interception and use efficiency for the energy crops giant reed (*Arundo donax* L) and sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Field Crops Research**, v. 149, p. 159–166, 2013.

CERASUOLO, M. et al. Development of a sink – source interaction model for the growth of short-rotation coppice willow and in silico exploration of genotype x environment effects. **Journal of experimental Botany**, v. 67, n. 3, p. 961–977, 2016.

COOPER, J.P.; WILSON, D. **Variation in photosynthetic rate in Lolium**. In: INTERNATIONAL GRASSLANDS CONGRESS, 11., 1970, Surfers Paradise. Proceedings... Surfers Paradise: University of Queensland Press, 1970. p.522-527.

CUNHA, A.R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP., **Irriga**, v. 14, p.1-11, 2009.

DAL PAI, A.; CALÇA, M. V. C. **Estimativa da radiação solar fotossinteticamente ativa**. In: Book of Abstracts and Posters of I Workshop of Institute of Bioenergy Research – IPBEN Botucatu, 1, 2016, Botucatu – SP, *Resumos...* Botucatu: Institute of Bioenergy Research (IPBEN/UNESP) and College of Agricultural Sciences (FCA/UNESP), Botucatu, São Paulo, Brazil, 2016. p. 105.

DA SILVA, R.M.L et al. Fertilization Response, Light Use, and Growth Efficiency in Eucalyptus Plantations across Soil and Climate Gradients in Brazil. **Forest**, v. 117, p. 2–13, 2016.

DIGGLE, P. J.; HEAGERTY, P. J.; LIANG, K.Y.; ZEGER, S. L. **Analysis of Longitudinal Data**. 2º ed. Oxford: Oxford University Press. 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2016 (ano base 2015)**. Brasília, 2016. 294 p.

EPRON, D.; DREYER, E. Photosynthesis of oak leaves under water stress: maintenance of high photochemical efficiency of photosystem II and occurrence of non-uniform CO₂ assimilation. **Tree Physiology**, v. 13, p. 107–117, 1993.

FISCHER, M. et al. Biomass productivity and water use relation in short rotation poplar coppice (*Populus nigra* x *P. maximowiczii*) in the conditions of Czech Moravian Highlands. **Acta univ. agric. et silvic.** v. 19, n. 6, p. 141–152, 2011.

FISCHER, G.; PRIELER, S.; VAN VELTHUIZEN, H.; BERNDES, G.; FAAIJ, A.; LONDO, M.; WIT M. Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land pastures, Part II: Land use scenarios. **Biomass and Bioenergy**, v.34, p. 173-187. 2012

FRANCIS, J. K. **Bambusa vulgaris Schrad ex Wendl**. Common bamboo. SO-ITF-SM-65. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 1993. 6 p.

GBUR, E.; WALTER, W. **Stroup. Analysis of Generalized Linear Mixed Models in the Agricultural and Natural Resources Science**. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Crop Science Society of America. Madison, Wisconsin-USA. 2012. 283 p.

GIUNTI NETO, C. **Calibração do uso de fotos hemisféricas, do LAI-2000 e do Ceptômetro para estimativa do Índice de Área Foliar em plantações de Eucalyptus**. Relatório de Estágio Profissionalizante em Eng. Florestal. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007. 62 p

GRATANI L. et al. Growth pattern and photosynthetic activity of different bamboo species growing in the Botanical Garden of Rome. **Flora**, v. 203, p. 77–84, 2008.

GUERRA, S.P.S.; GARCIA, E.A.; LANÇAS, K.P.; REZENDE, M.A.; SPINELLI, R. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. **Fuel**, v.137, p. 360-363, 2014.

GREEN, D. S.; ERICKSON, J. E.; KRUGER, E. L. Foliar morphology and canopy nitrogen as predictors of light-use efficiency in terrestrial vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, n. 3-4, p. 163-171. 2003.

INOUE, M.K.; RIBEIRO, F.A. Fotossíntese e transpiração de clones de Eucalyptus grandis e E. saligna. **IPEF**, v.40, p. 15-20, 1998.

KLEINHENZ, V.; MIDMORE, D.J. Aspects of bamboo agronomy. **Advances in Agronomy**, v. 74, p.99-149, 2001.

KOTANI, A. et al. Temporal variations in the linkage between the net ecosystem exchange of water vapour and CO₂ over boreal forests in eastern Siberia. **Ecohydrology**, v. 7, p. 209–225, 2014.

KUBISKE, M. E.; ABRAMS, M. D. Ecophysiological analysis of woody species in contrasting temperate communities during wet and dry years. **Oecologia**, v. 98, p. 303–304, 1994.

LABRECQUE, M. et al. Growth patterns and biomass productivity of two Salix species grown under short-rotation intensive culture in Southern Quebec. **Biomass and Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 419–425, 1993.

LANDSBERG, J.; SANDS, P. Physiological ecology of forest production: principles, processes, and models. **Tree Physiology**, v. 31, p. 680–681, 2011.
LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2006. 531p.

- LE MAIRE, G. et al. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 31–42, 2013.
- LEITE, F.P.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SANS, L. M. A; FABRES, A. S. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, v. 21, p. 313-321.1997.
- Liese W. **Bamboos: Biology, silvics, properties, utilization**. Eschborn, Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ), p. 51-74. 1985.
- LU, X.; ZHUANG, Q. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1924–1939, 2010.
- MARSDEN, C.; LE MAIRE, G.; STAPE, J. L.; SEEN, D. L.; ROUPSARD, O.; CABRAL, O.; EPRON, D.; LIMA, A. M. N.; NOUVELLON, Y. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1741-1753, 2010
- MENDES, S.C. et al. Absorção e distribuição de nutrientes em plantios comerciais de bambu (*Bambusa vulgaris*) no nordeste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p. 991–999, 2010.
- MEDRANO, H. et al. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. **Investigaciones Geográficas**, v. 43, p. 63–84, 2007.
- MI, N.; WEN, X.; CAI, F.; WANG, Y.; ZHANG, Y. Effects of seasonal drought on the water use efficiency of Qianyanzhou plantation. **Scientia Silvae Sinicae**, v. 50, pp. 24-31. 2014.
- NELDER, A. J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. Generalized Linear Models. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 135, n. 3, p. 370–384, 1972.
- PANGLE, L.; VOSE, J. M.; TESKEY, R. O. Forest Ecology and Management Radiation use efficiency in adjacent hardwood and pine forests in the southern Appalachians. **Forest Ecology and Management**, v. 257, p. 1034–1042, 2009.
- PIOUCEAU, J. et al. Effects of High Nutrient Supply on the Growth of Seven Bamboo Species. **International Journal of Phytoremediation**, n. 16, p. 1042=1057, 2014.
- REICHSTEIN, M. J. D.; TENHUNEN, O.; ROUPSARD, J. M.; OURCIVAL, S.; RAMBAL, F.; MIGLIETTA, A.; PERESSOTTI, M.; PECCHIARI, G.; TIRONE, G.;

VALENTINI, R. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: Revision of current hypotheses? **Global Change Biol.**, v. 8, p. 999-1017. 2002.

RIBEIRO, V. R.; DE ALMEIDA, C. T.; SANTANA, M. F.; DELGADO, R, C.
Estimativa da produtividade primária líquida na região do reservatório Funil-SP por meio do produto MOD17A3. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 17, 2015, João Pessoa - PB, *Anais...* João Pessoa: INPE, 2015. p. 721-726.

ROBERTSON, A. **Boreal energy plantation R & D with *Salix* species.** Conference paper; Journal article: General Technical Report, Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service 1986. n. PNW-194 p. 27-30, ref. 5.

SANTOS, D. R.S. et al. Potencial de espécies de Bambu como fonte energética Bamboo species potential as energy source. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 751–758, 2016.

SCURLOCK, J.M.O: DAYTON, D.C: HAME, S.B. Bamboo: an overlooked biomass resource? **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 229–244, 2000.

SOHEL, Md. et al. Carbon storage in a bamboo (*Bambusa vulgaris*) plantation in the degraded tropical forests : Implications for policy development. **Land Use Policy**, v. 49, p. 142–151, 2015.

SOUZA, G. M. et al. Estratégias de utilização de luz e estabilidade do desenvolvimento de plântulas de *Cordia superba* Cham . (Boraginaceae) crescidas em diferentes ambientes luminosos. **Acta bot.bras.**, v. 23, n. 2, p. 474–485, 2009.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply , use and efficiency of use of water , light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 17–31, 2004.

TARDIEU, F.; DAVIES, W. J. Stomatal Response to Abscisic Acid Is a Function of Current Plant Water Status. **Plant Physiol**, v. 98, p. 540–545, 1992.

TATAGIBA, S.D. et al. Desempenho de clones de eucalipto em resposta a disponibilidade de água no substrato. **Engenharia na Agricultura**, v. 17, p. 179-189. 2009.

TRAUTENMULLER, J.W. et al. Crescimento de área foliar de índice de área foliar de mudas de *Cordia americana* em diferentes formas de manejo. **Biofix**, v. 2, n. 2, p. 60–64, 2017.

TOLLENAAR, M.; AGUILERA, A.; NISSANKA, S. P. Grain Yield is Reduced More by Weed Interference in an Old than in a New Maize Hybrid. **Agronomy Journal**, v. 89, p. 239–246, 1997.

THORNTHWAITE, C.; MATHER, J. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

VALE, A.T.; MOREIRA, A.C.O.; MARTINS, I.S. Avaliação do potencial energético de *Bambusa vulgaris* em função da Idade. **Floresta Ambiente**, v. 24, p. 1-9, 2017.

VARANDA, L. D.; CARASCHI, J.C.; ALMEIDA FILHO, F. 2010. Potencial energético do carvão vegetal de bambu. In: Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, 12., 2010, Lavras. Anais... Lavras: UFLA.

VETTORATO, J. A. **Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistemas de informação geográfica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2003. 97 p.

VITAL, B. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. Sociedade de Investigações Florestais. **Boletim Técnico SIF**, Viçosa, N. 1, P. 1-21, 1984.

VOLK, T. A.; ABRAHAMSONA, L. P.; NOWAKA, C. A.; SMARTB, L. B.; THARAKANC, P. J.; WHITEA, E. H. The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 715-727, 2006

YEN, T. M. Culm height development, biomass accumulation and carbon storage in an initial growth stage for a fast - growing moso bamboo (*Phyllostachy pubescens*). **Botanical Studies**, v. 57, n. 10, p. 1–9, 2016.

WANG, D. H.; CHEN, T. H. **Bamboo Resources and Carbon storage in Taiwan**. In: 10th World Bamboo Congress: Ecology and Environmental Concerns, Korea. 2015, p. 1-18.

WANG, F. et al. Bamboo Forest Water Use Efficiency in the Yangtze River Delta Region, China. **Terr Atmos Ocean**, v. 27, n. 6, p. 981–989, 2016.

WESTFALL, P.H.; TOBIAS, R. D.; ROM, D.; WOLFINGER, R. D.; HOCHBERG, Y. **Multiple Comparisons and Multiple Tests Using the SAS System**, Cary, NC: SAS Institute Inc. 1999.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 113–140, 2004.

WINK, C.; MONTEIRO, J. S.; REINERT, D. J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Florestalis**, v. 40, n. 93, pp. 57-67. 2012.

Apêndice 1. Correlação entre EUL e os índices de nutrientes calculados.

Especie	Variáveis		r	p-valor	Especie	Variáveis		r	p-valor
Bambu	EUL	IN	0,8112	0,0014	AEC-144	EUL	IN	-0,0490	0,8799
Bambu	EUL	IP	0,7343	0,0065	AEC-144	EUL	IP	0,0350	0,9141
Bambu	EUL	IK	0,7902	0,0022	AEC-144	EUL	IK	0,1818	0,5717
Bambu	EUL	ICa	0,7483	0,0051	AEC-144	EUL	ICa	0,3217	0,3079
Bambu	EUL	IMg	0,8322	0,0008	AEC-144	EUL	IMg	0,1119	0,7292
Bambu	EUL	IS	0,8322	0,0008	AEC-144	EUL	IS	-0,0979	0,7621
Bambu	EUL	IB	0,6713	0,0168	AEC-144	EUL	IB	0,3916	0,2081
Bambu	EUL	ICu	0,7692	0,0034	AEC-144	EUL	ICu	-0,0559	0,8629
Bambu	EUL	IFe	0,1049	0,7456	AEC-144	EUL	IFe	0,2308	0,4705
Bambu	EUL	IMn	0,7832	0,0026	AEC-144	EUL	IMn	0,4126	0,1826
Bambu	EUL	IZn	0,7063	0,0102	AEC-144	EUL	IZn	-0,0490	0,8799
LW07	EUL	IN	-0,2587	0,4168	Salgueiro	EUL	IN	0,0490	0,8799
LW07	EUL	IP	-0,3007	0,3423	Salgueiro	EUL	IP	0,0839	0,7954
LW07	EUL	IK	-0,1259	0,6967	Salgueiro	EUL	IK	0,2937	0,3541
LW07	EUL	ICa	0,4476	0,1446	Salgueiro	EUL	ICa	0,3287	0,2969
LW07	EUL	IMg	0,021	0,9484	Salgueiro	EUL	IMg	0,3287	0,2969
LW07	EUL	IS	-0,0839	0,7954	Salgueiro	EUL	IS	0,3776	0,2262
LW07	EUL	IB	0,5385	0,0709	Salgueiro	EUL	IB	0,4056	0,1908
LW07	EUL	ICu	0,0420	0,897	Salgueiro	EUL	ICu	0,3916	0,2081
LW07	EUL	IFe	-0,2517	0,4299	Salgueiro	EUL	IFe	-0,0280	0,9312
LW07	EUL	IMn	0,1538	0,6331	Salgueiro	EUL	IMn	0,4476	0,1446
LW07	EUL	IZn	-0,1259	0,6967	Salgueiro	EUL	IZn	0,3497	0,2652

CAPÍTULO 2 - ACUMULACIÓN DE BIOMASSA E NUTRIENTES DE *Bambusa*, *Eucalyptus* e *Salix* EN SISTEMAS FORESTALES DE ROTACIÓN CORTA²

BIOMASS AND NUTRIENT ACCUMULATION OF *Bambusa*, *Eucalyptus* and *Salix*
IN SHORT ROTATION WOODY CROPS

Gabriela Carolina Villamagua Vergara, Mariana Bonacelli Montelatto,
José Raimundo de Souza Passos, Kléber Pereiral Lanças,
Saulo Philipe Sebastião Guerra

Faculdade de Ciências Agrônômicas / Universidade Estadual Paulista
Rua José Barbosa de Barros, 1780 Botucatu – SP

RESUMO: O conhecimento das necessidades nutricionais de uma cultura é fundamental para a elaboração de recomendações de adubação. O objetivo deste trabalho foi quantificar a produção de biomassa aérea e o conteúdo de nutrientes em quatro espécies florestais energéticas: *Bambusa vulgaris*, híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla* – clone AEC-144, híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* - clone LW07 e *Salix nigra*. O experimento foi conduzido no município de Botucatu, estado de São Paulo, Brasil. Três plantas de cada tratamento foram colhidas aos 22 meses para *B. vulgaris* e clone AEC-144 e aos 18 meses para o clone LW07 e *S. nigra*. Foram determinadas a biomassa aérea, teores e os conteúdos de macro e micronutrientes dos compartimentos folhas, galhos e tronco. O acúmulo de biomassa no tronco foi similar entre os clones de eucalipto e o bambu, na escala de planta, porém, houve diferença por área, sendo maior o acúmulo de biomassa no tronco dos clones de eucalipto. O bambu apresentou os maiores conteúdos de N, P, S, Mg, B, Cu, Fe e Zn nos galhos e tronco. Potássio apresentou maior acúmulo nos galhos e tronco, tanto para bambu quanto para o clone AEC-144, enquanto que, o cálcio, independentemente da espécie, apresentou o maior acúmulo no tronco.

Palavras chave: bambu, eucalipto, salgueiro, alocação de biomassa, conteúdo nutricional

RESUMEN: El conocimiento de los requerimientos nutricionales de una cultura é fundamental para la elaboración de recomendaciones de fertilización. El objetivo de

² Capítulo submetido para o periódico Bosque (ISSN: 0717-9200).

este estudio fue cuantificar la producción de biomasa aérea y el contenido de nutrientes de cuatro especies dendroenergéticas: *Bambusa vulgaris*, híbrido espontáneo de *Eucalyptus urophylla* – clon AEC-144, híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* – clon LW07 y de *Salix nigra*. El experimento fue desarrollado en el municipio de Botucatu, estado de San Pablo, Brasil. Tres plantas de cada tratamiento fueron seleccionadas y apeadas a los 22 meses para *B. vulgaris* y clon AEC-144 y a los 18 meses para el clon LW07 y *S. nigra* y fueron determinadas biomasa aérea, concentraciones y contenidos de macro y micronutrientes de las fracciones hojas, ramas y tronco. La acumulación de biomasa en el tronco fue similar entre los clones de eucalipto y el bambú a nivel de planta, sin embargo, hubo diferencia por área; siendo mayor la acumulación de biomasa en el tronco en los clones de eucalipto. El bambú presentó los mayores contenidos de N, P, S, Mg, B, Cu, Fe y Zn en ramas y tronco. Potasio presentó mayor acúmulo en ramas y tronco, tanto para bambú como clon AEC-114; y calcio, independientemente de la especie, presentó mayor acúmulo en el tronco.

Palabras claves: bambú, eucalipto, sauce, traslocación de biomasa, contenido nutricional

ABSTRACT: The knowledge of the nutritional requirements of a culture is fundamental for the elaboration of fertilization recommendations. The objective of this study was to quantify the production of aboveground biomass and the nutritional content of four dendroenergy species: *Bambusa vulgaris*, the spontaneous hybrid of *Eucalyptus urophylla* - clone I144, interspecific hybrid of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* - clone LW07 and *Salix nigra*. The experiment was carried out in the in southern Brazil. Three plants of each treatment were harvested at 22 months for bamboo and Eucalyptus clone AEC-144 and at 18 months for clone LW07 and *Salix nigra*. Aboveground biomass, concentrations and contents of macro and micronutrients of leaves, branches and trunk were determined. Biomass allocation in the trunk was similar between individual eucalyptus clones and bamboo but differed by area, being higher accumulation of biomass in the trunk in the eucalyptus clones. Bamboo presented the highest contents of N, P, S, Mg, B, Cu, Fe y Zn in the branches and trunk. Potassium showed higher accumulation in branches and trunk

for bamboo and clone AEC-114; and calcium, independently of the species, showed higher accumulation in the trunk.

Keywords: bamboo, eucalyptus, willow, biomass allocation, nutrient content

2.1 Introducción

Las áreas de plantío destinadas a plantaciones forestales generalmente son áreas marginales, que no sirven para culturas agrícolas que son localizadas en suelos de baja fertilidad y en áreas inclinadas. De esta forma, el mantenimiento de la productividad del suelo para un plantío forestal depende de la selección de la especie, de la densidad de plantación, tiempo de rotación, los contenidos de nutrientes susceptibles de ser exportados y su reposición (Barros *et al.* 1990, Merino *et al.* 2005).

La colecta de árboles enteros en sistemas forestales de rotación corta (SFRC) tiene implicaciones sobre el uso sustentable del suelo, pues la remoción de nutrientes por la colecta es la principal salida de nutrientes del sistema (LACLAU *et al.* 2003, SAFOU-MATONDO *et al.* 2005). El manejo de florestas de alta densidad debe concentrarse no solamente en la selección de especies de rápido crecimiento y en la producción de biomasa con fines energéticos (ADEGBIDI *et al.* 2001, GUO *et al.* 2002), sino también en el acumulo de nutrientes en las diferentes fracciones de los árboles a ser removidos en la colecta. Conocer los contenidos de nutrientes susceptibles de ser exportados de un local permite la elaboración de recomendaciones de fertilización más precisas y garantizar la fertilidad del suelo a largo plazo (Safou-Matondo *et al.* 2005, Fernandes y Soratto 2013).

El contenido de nutrientes en la biomasa producida puede diferir dentro de las especies y entre especies. Una evaluación nutricional tanto de las especies como genotipos cultivados permite la selección de aquellos más adaptados a suelos nutricionalmente deficientes (Barros *et al.* 1990, Safou-Matondo *et al.* 2005, MENDES *et al.* 2010).

Los principales géneros utilizados mundialmente en la producción de biomasa forestal para energía son: eucalipto (*Eucalyptus*), sauce (*Salix*) y álamo (*Populus*). En el Brasil, el eucalipto es ampliamente utilizado y existe actualmente un interés creciente por el bambú con fines energéticos. Un ejemplo de esto se tiene en el

Nordeste de Brasil, donde son aprovechadas 3.000 hectáreas de bambú de la especie *Bambusa vulgaris*, cuya biomasa es utilizada en la forma de astillas a ser quemadas en calderas con el objetivo de obtener vapor utilizado en el proceso de reciclaje de papel. Su uso, se presenta como una opción de generación de energía, pues es una planta perenne, por tanto, no necesita de replantio, produce en media 30 Mg MS ha⁻¹ (Colares *et al.* 2017), siendo su poder calorífico próximo o superior al del eucalipto, indicando su potencial como fuente bioenergética (Brito *et al.* 1987, Scurlock *et al.* 2000, Varanda *et al.* 2010, Santos *et al.* 2016, Vale *et al.* 2017).

Sin embargo, por ser una cultura emergente, aun no se tiene las recomendaciones específicas de fertilización, al contrario del eucalipto, debido a la falta de mayores informaciones sobre el acumulo de nutrientes en las diferentes fracciones de la planta. De esta forma, una constatación de diferencias en el contenido de nutrientes entre el bambú y otras especies dendroenergéticas permite, además de seleccionar especies más adaptadas a suelos deficientes, la adopción de diferentes regímenes de fertilización de acuerdo con los requerimientos de la cultura.

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue cuantificar la producción de biomasa aérea y el contenido de nutrientes de cuatro especies dendroenergéticas: *Bambusa vulgaris*, híbrido espontáneo de *Eucalyptus urophylla* – clon AEC-144, híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* – clon LW07 y de *Salix nigra*, con la finalidad de determinar cual de estas especies forestales presenta menores requerimientos nutricionales sobre condiciones semejantes de suelo, altitud y manejo.

2.2 Material y métodos

El experimento fue realizado en el municipio de Botucatu (22° 50' 55" S e 48° 26' 09" O), estado de San Pablo, Brasil. Localizado a 826 metros de altitud, con precipitación media anual de 1.500 mm y temperatura media anual de 22°C. Las características químicas del suelo del área experimental se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Características químicas del suelo del área experimental.

Camada cm	pH	M.O.	P _{resina}	S	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----	-----	-----	mmol _c dm ⁻³	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0-20	4,3	14	3	9	3	32	0,7	5	1	7	39	19	0,31	0,9	56	3,2	0,4
20-40	3,9	12	2	5	2	38	0,5	4	1	5	44	12	0,29	0,9	45	2,1	0,2

Fueron utilizadas cuatro especies dendroenergéticas: *Bambusa vulgaris* (bambú), híbrido espontáneo de *Eucalyptus urophylla* – clon AEC-144, híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* – clon LW07 y *Salix nigra* (sauce negro). Bambú y clon AEC-144 fueron plantados en enero de 2016, y los plantíos del clon LW07 e sauce negro fueron establecidos en abril de 2016, todos en parcelas continuas de 500 m², con espaciamento 3 m x 2 m para bambú y 3 m x 1 m para las otras especies (figura 1).



Figura 1. Localização das parcelas experimentais na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu- SP. Da esquerda para a direita: plantios de salgueiro, clone LW07, clone AEC-144 e bambu. Fuente: Denadai (2017).

La preparación del suelo consistió en la roturación del terreno y surcado en línea, posteriormente se aplicó 5 Mg ha⁻¹ de cal (PRNT³ 85%) corregido de 0 a 40 cm, con plantío manual. Hubo deshierbe manual y las aplicaciones de herbicida fueron realizadas con la finalidad de disminuir la competición por nutrientes y agua entre plantas cultivadas y las invasoras. Fue realizada una fertilización inicial en el plantío y fertilizaciones de mantenimiento a los 3, 6 y 12 meses después de la plantación. El detalle de las dosis de fertilización se presenta en el cuadro 2.

³ Poder Relativo de Neutralización Total

Cuadro 2. Descripción de los regímenes de fertilización en el experimento.

Fertilizantes	Días	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	Dosis 4
		g planta ⁻¹			
NPK (8-27-10)	0	*			
NPK (20-05-20)	90		110		
NPK (20-05-20) + B (8%)	180			110 + 20	
NPK (20-00-20) + B (8%)	360				110 + 20

*75 g planta⁻¹ en espaciamiento 3 m x 1 m e 150 g planta⁻¹ en espaciamiento 3 m x 2 m

Para este estudio fueron apeadas tres plantas de desarrollo medio de cada tratamiento en función del inventario forestal realizado a los 22 meses para bambú y clon AEC-144 y 18 meses para clon LW07 y sauce negro.

Las plantas muestreadas fueron separadas en hojas, ramas y tronco, siendo colectadas cuatro submuestras compuestas de las fracciones hojas y ramas, respectivamente. El peso fresco total de todas las fracciones de biomasa fue determinado en campo. En el caso del tronco fueron retirados y pesados cinco discos por cada planta a los 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de altura total de la planta, según la metodología de Vital (1984). Posteriormente, las submuestras de todas las fracciones fueron colocadas en la estufa con circulación de aire forzado (65 °C ±2), hasta alcanzar masa constante determinando así los pesos secos.

Después de la determinación del peso seco de las submuestras de hojas, estas fueron molidas directamente en el molino tipo Wiley, mientras las ramas y troncos fueron primero picados y pasados por la trituradora de ramas y troncos para posteriormente ser molidos en el molino tipo Wiley. De cada una de las plantas colectadas fueron retiradas cuatro submuestras de cada fracción para la determinación de concentraciones de macro y micronutrientes en laboratorio.

Las concentraciones de nutrientes en la planta fueron obtenidas a través de la media de medias resultante de las cuatro réplicas de concentraciones colectadas por fracción de cada planta (repetición) por tratamiento. Las concentraciones medias de nutrientes por fracción fueron multiplicadas por los valores de biomasa de la respectiva fracción para obtener el contenido de nutrientes o cantidad total de nutriente absorbido (Santana *et al.* 2002). Para efectos de análisis, el contenido de cada nutriente en la biomasa aérea total fue considerado como la eficiencia de absorción (Mendes *et al.* 2010).

Para el análisis estadístico de las variables referentes a contenidos de nutrientes por planta y hectárea, contenidos de nitrógeno, fosforo, potasio, calcio, azufre, magnesio, boro, cobre, hierro, manganeso y zinc fueron ajustados modelos lineales generalizados con a distribución gama y función de conexión logarítmica teniendo como factores las especies y las fracciones (Nelder y Wedderburn 1972, Diggle *et al.* 2002). La calidad de los ajustes de todos los modelos lineales generalizados ajustados fue realizada a través del análisis de desvíos (deviance), gráficos de residuos de Pearson estandarizados. Para comparaciones entre tratamientos fue utilizado la prueba de Tukey-Kramer (Westfall *et al.* 1999), del procedimiento Genmod del programa estadístico SAS – Free Statistical Software, SAS University Edition.

2.3 Resultados

2.3.1 Producción y distribución de biomasa aérea

La biomasa aérea fue principalmente traslocada al tronco seguido por las ramas y hojas, siendo mayor el acumulo de biomasa en el tronco para los clones de eucalipto y el bambú, con relación al sauce negro; y no diferenciando entre sí. (cuadro 3). En la fracción ramas, el bambú obtuvo el mayor aporte de materia seca seguido por los clones de eucalipto y sauce negro. A nivel de hojas, la cantidad de biomasa acumulada en el bambú y los clones de eucalipto fue mayor, con relación al sauce negro. La distribución de la biomasa, dentro de cada especie presentó mayor acumulo de biomasa en el tronco para los clones de eucalipto, sin embargo, el bambú y el sauce negro mostraron aportes similares de materia seca en las ramas y troncos.

Cuadro 3. Valores medios de biomasa seca (kg planta⁻¹) de hojas, ramas, tronco de bambu, eucalipto y sauce negro, respectivamente.

Edad (meses)	Especie	Hojas	Ramas	Tronco
22	Bambú	1,86 Ab	6,04 Aa	9,29 Aa
22	I144	1,81 Ab	2,42 Bb	11,23 Aa
18	LW07	1,55 Ab	2,29 Bb	7,42 Aa
18	Sauce	0,02 Bb	0,04 Ca	0,08 Ba

Medias seguidas de letras distintas, mayúsculas en la columna (especie) y minúsculas en la línea (fracciones), difieren entre sí por la prueba de Tukey-Kramer ($p \leq 0,05$).

2.3.2 Biomasa y contenido de nutrientes

Entre las especies, la mayor cantidad de biomasa por hectárea fue acumulada también en el tronco por los clones de eucalipto (cuadro 4). En la fracción hojas y ramas, el bambú y los clones de eucalipto presenta mayor biomasa acumulada, con relación al sauce negro. Analizando dentro de cada especie el factor fracción, los clones de eucalipto presentaron también mayor acumulo de biomasa en el tronco, siendo similares los valores de materia seca en las hojas y ramas. El bambú y el sauce negro internamente presentaron mayor acumulo de biomasa en ramas y tronco y menor acumulo de biomasa en las hojas.

Con relación al acumulo de macronutrientes, el bambú presentó los mayores contenidos de nitrógeno, fosforo, potasio, azufre y magnesio en ramas y tronco, con relación a las otras especies. Estos mismos elementos fueron encontrados en altas cantidades y de forma similar en las hojas de bambú y clones de eucalipto, y en bajas cantidades en el sauce negro (cuadro 4).

Cuadro 4. Biomasa (Mg MS ha⁻¹) y contenidos medios de macronutrientes (kg ha⁻¹) en hojas, ramas y tronco de bambú, eucalipto y sauce negro.

Edad (meses)	Arreglo		Fracción		
			Hojas	Ramas	Tronco
22	Bambú 3 m x 2 m	Biomassa	3,10 Ab	10,07 Aa	15,47 Ba
		N	169,10 Aa	418,59 Aa	555,71 Aa
		P	6,37 Aa	11,10 Aa	14,07 Aa
		K	62,51 Ab	452,62 Aa	448,04 Aa
		Mg	20,17 Ab	49,62 Aa	87,98 Aa
		S	7,28 Ab	44,44 Aa	91,39 Aa
22	AEC-144 3 m x 1 m	Biomassa	6,03 Ab	8,07 Ab	37,42 Aa
		N	110,15 Aa	29,05 Ba	41,31 Ba
		P	4,93 Aa	2,26 Ba	2,50 Ba
		K	47,30 Ab	45,65 Ba	112,86 Ba
		Mg	14,62 Aa	9,22 Ba	22,80 Ba
		S	4,67 Bb	5,13 Bb	21,63 Ba
18	LW07 3 m x 1 m	Biomassa	5,17 Ab	7,64 Ab	24,73 Aa
		N	106,71 Aa	24,91 Bb	36,47 Bb
		P	3,87 Aa	1,09 Ba	1,82 Ba
		K	46,74 Aa	31,63 Ba	53,12 Ba
		Mg	9,67 Aa	4,96 Bb	16,11 Ba
		S	4,3 Bb	4,09 Bb	14,46 Ba
18	Sauce 3 m x 1 m	Biomassa	0,06 Bb	0,14 Ba	0,26 Ca
		N	1,77 Ba	3,32 Ca	2,76 Ca
		P	0,09 Ba	0,10 Ca	0,16 Ca
		K	0,92 Ba	1,00 Ca	1,49 Ca
		Mg	0,13 Bb	0,14 Ca	0,22 Ca
		S	0,07 Ca	0,12 Ca	0,19 Ca

Medias seguidas de letras distintas, mayúsculas en la columna (especie) y minúsculas en la línea (fracción), difieren entre sí por la prueba de Tukey-Kramer ($p \leq 0,05$).

Comparando el factor fracción, dentro de cada especie, se observó que el bambú, clon AEC-144 y el sauce negro no tuvieron diferencias en el contenido de nitrógeno entre las fracciones (hojas, ramas y tronco). El clon LW07 presentó mayor acumulo de nitrógeno en las hojas y valores similares de ese nutriente en las fracciones ramas y tronco. Con relación al fósforo, los contenidos de este elemento fueron similares entre fracciones para todas las especies.

Los contenidos de potasio, magnesio y azufre en el bambú fueron mayores en las ramas y tronco y menores en las hojas. El clon LW07 y el sauce negro presentaron valores similares de potasio en todas las fracciones. El clon AEC-144 presentó mayor contenido de potasio en las ramas y tronco y menor acumulo en las hojas. El contenido de magnesio fue igual para todas las fracciones en el clon AEC-144. En el clon LW07, el acumulo de magnesio fue mayor en las hojas y tronco y menor en las ramas. El sauce negro presentó mayor contenido de magnesio en las ramas y tronco y menor acumulo en las hojas.

Con relación al azufre, los clones de eucalipto presentaron mayor contenido de ese elemento en el tronco y menor acumulo en ramas y hojas. Estas dos últimas fracciones no difiriendo entre sí en el contenido de azufre. En cambio, el sauce negro no presentó diferencias en los contenidos de azufre entre fracciones.

En el caso del calcio, no hubo interacción entre especies y fracciones, ni diferencias entre especies. Fue significativo únicamente para el factor fracción (cuadro 5), indicando que el mayor contenido de calcio se acumula en el tronco, independientemente de la especie. El contenido de calcio entre hojas y ramas fue similar.

Cuadro 5. Acumulo del calcio (kg ha^{-1}) en las diferentes fracciones.

Fracción	Media
Hojas	24,39 b
Ramas	44,70 b
Troncos	76,38 a

Medias con una letra en común no difieren por la prueba de Tukey-Kramer ($p \leq 0,05$).

Con relación a los contenidos de micronutrientes, a nivel de ramas y tronco, el bambú también presentó mayor acumulo de boro, cobre, hierro y zinc, al compararlo con las otras especies (cuadro 6). A nivel de hojas, los contenidos de boro, cobre, hierro y zinc fueron similares entre el bambú y los clones de eucalipto. El sauce negro presentó menor acumulo de estos nutrientes en las hojas, cuando comparado con las otras especies.

Cuadro 6. Biomasa (Mg MS ha⁻¹) y contenidos medios de micronutrientes (g ha⁻¹) en hojas, ramas y tronco de bambú, eucalipto y sauce respectivamente.

Edad (meses)	Arreglo		Fracción					
			Hojas		Ramas		Tronco	
22	Bambú 3 m x 2 m	Biomassa	3,10	Ab	10,07	Aa	15,47	Ba
		B	102,34	Ab	461,83	Aa	1025,38	Aa
		Cu	64,30	Ab	587,57	Aa	460,09	Aa
		Fe	2069,63	Aa	3654,88	Aa	4343,79	Aa
		Zn	124,84	Ab	864,89	Aa	1034,24	Aa
22	AEC-144 3 m x 1 m	Biomassa	6,03	Ab	8,07	Ab	37,42	Aa
		B	218,93	Aa	107,54	Ba	343,68	Ba
		Cu	42,59	Ab	73,45	Bb	112,21	Ba
		Fe	2152,55	Aa	363,99	Bb	542,85	Bb
		Zn	74,72	Aa	62,59	Ba	159,02	Ba
18	LW07 3 m x 1 m	Biomassa	5,17	Ab	7,64	Ab	24,73	Aa
		B	275,92	Aa	109,86	Bb	321,43	Ba
		Cu	48,06	Aa	67,23	Ba	82,61	Ba
		Fe	2378,17	Aa	322,46	Bb	615,07	Bb
		Zn	186,69	Aa	64,57	Ba	133,89	Ba
18	Salgueiro 3 m x 1 m	Biomassa	0,06	Bb	0,14	Ba	0,26	Ca
		B	4,70	Ba	3,17	Ca	4,11	Ca
		Cu	0,91	Bb	2,41	Ca	3,25	Ca
		Fe	12,74	Ba	11,78	Ca	20,06	Ca
		Zn	2,29	Ba	1,22	Ca	4,19	Ca

Medias seguidas de letras distintas, mayúsculas en la columna (especie) y minúsculas en la línea (fracciones), difieren entre sí por la prueba de Tukey-Kramer ($p \leq 0,05$).

Comparando dentro de cada especie el factor fracción, se observó en el bambú, que los contenidos de boro, cobre y zinc, no fueron diferentes entre las fracciones ramas y tronco, siendo menor el contenido de estos elementos en las hojas. Los valores de hierro en el bambú fueron similares entre fracciones. El clon AEC-144 y el sauce negro, no presentaron diferencias en el contenido de boro entre las fracciones; sin embargo, el clon LW07 mostró mayor acumulo de boro en hojas y tronco y menor acumulo en ramas. El cobre presentó diferencias entre los clones de eucalipto y el sauce negro, así los contenidos de cobre en el clon LW07 fueron iguales en todas las fracciones, mientras en el clone AEC-144 el mayor acumulo de este nutriente fue en el tronco, siendo menor en hojas y ramas. El sauce negro presentó mayor acumulo de cobre en ramas y tronco y menor acumulo en hojas.

Los clones de eucalipto presentaron mayor acumulo de hierro en las hojas y menor contenido de este mineral en ramas y tronco; mientras que, en el sauce negro, no hubo diferencias en el contenido de hierro entre fracciones. El contenido de zinc fue similar en todas las fracciones, tanto en los clones de eucalipto, como en el sauce negro.

En el caso del manganeso, no hubo interacción entre especies y fracciones, ni diferencias a nivel de fracciones. Fue significativo únicamente entre especies (Cuadro 7), indicando que el contenido de manganeso fue similar entre los clones de eucalipto y el bambú y difiero para el sauce negro; presentando este último menor contenido de manganeso.

Cuadro 7. Contenidos medios de manganeso (g ha^{-1}) entre especies

Arreglo		Media
Bambú	3 m x 2 m	2586,81 A
AEC-144	3 m x 1 m	2423,16 A
LW07	3 m x 1 m	2297,73 A
Sauce	3 m x 1 m	27,74 B

Medias com uma letra em común no difieren por la prueba de Tukey-Kramer ($p \leq 0,05$).

2.4 Discussão

2.4.1 Producción y distribución de biomassa

Hubo diferencia em la producción y traslocación de biomasa en función de la escala. Así a escala de planta, los mayores valores de biomasa fueron acumulados en el tronco de los clones de eucalipto y bambú; mientras los menores valores fueron registrados para el sauce negro. Sin embargo, a nivel de área, los clones de eucalipto acumularon mayor cantidad de biomasa en el tronco, cuando comparado con el bambú y el sauce negro. Según Schonau y Coetzee (1989), Neto et al. (2013) y Junior et al. (2016), el aumento en la producción de madera en los clones de eucalipto por área puede ser atribuido al mayor número de individuos por unidad de superficie.

La producción de materia seca por hectárea, para los clones de eucalipto y bambú se encuentra en el rango de producción (entre 17 y 49 Mg MS ha⁻¹) informado por Guerra et al. (2016a) y Junior et al. (2016) para SFRC de eucalipto con edades comprendidas entre dos y tres años. Los resultados para bambú fueron mayores a los registrados para *Bambusa tuldooides* (25,1 Mg MS ha⁻¹), en un plantío de 3,5 años con espaciamiento a 3 m x 2 m (Guerra et al. 2016b).

En general, los valores de biomasa seca por hectárea de las especies en estudio fueron superiores a los registrados en SFRC de eucalipto, álamo y sauce de Europa, Estados Unidos y Australia (Paris et al. 2011, Navarro et al. 2012, Rockford et al. 2013, Rosso et al. 2013, Sochacki et al. 2013) demostrando un elevado potencial para la captura y fijación del carbono de estos plantíos (Silva et al. 2015, Soheli et al. 2015). A única excepción fue el sauce negro que presentó valores inferiores a los citados.

2.4.2 Contenido de nutrientes

De manera general, el bambú presentó mayor contenido de nutrientes en ramas y tronco, con relación a las otras especies estudiadas, resultado de las mayores concentraciones de nutrientes en esta especie (Apéndice 1). Tales resultados pueden ser explicados, por el hecho de que el bambú presenta alta eficiencia de absorción de nutrientes, acumulo de biomasa y disposición de hojarasca (Chistanty et al. 1996, Arunachalam y Arunachalam 2002, Embaye et al. 2005).

La alta eficiencia de absorción de nutrientes del bambú, sumado a la elevada oferta de nutrientes proporcionada por las altas dosis de fertilizante (clasificadas como tal por Junior et al. 2016) aplicadas en el plantío, resultó en el aumento de nutrientes absorbidos por el bambú y, consecuentemente, en mayores contenidos de nutrientes por planta, con relación a las otras especies. Estos resultados sugieren la necesidad de nuevas investigaciones para probar diferentes dosis de fertilización y determinar sus efectos en el incremento de la producción de biomasa, concentraciones adecuadas de nutrientes para el bambú.

Estos resultados, también confirman los estudios realizados por Barros et al. (1990), en que el contenido de nutrientes en la planta depende de las concentraciones de nutrientes en los tejidos y de la producción de biomasa. Mayores

concentraciones de nutrientes en las plantas presuponen mayor contenido de nutrientes.

Sin embargo, el mayor acumulo de nitrógeno, fosforo y magnesio en las fracciones ramos y troncos del bambú, en este estudio difieren de las obtenidas por Mendes *et al.* (2010), quienes trabajaron con diferentes poblaciones y espaciamientos de *Bambusa vulgaris* en el norte de Brasil y encontraron menores contenidos de estos nutrientes a nivel de los colmos. También presenta diferencias a nivel de fosforo, mientras este estudio reporta valores mayores y similares de fosforo para las diferentes fracciones, Mendes *et al.* (2010) encontraron valores similares de fosforo a nivel de ramas y colmos, en tanto que, para hojas presentó valores menores. Estas discrepancias en los resultados pueden deberse a las elevadas concentraciones de nutrientes presente en este estudio por efecto de las altas dosis de fertilización aplicadas, así como de las diferentes condiciones de los locales, la antigüedad del otro plantío (22 años), los sucesivos cortes a lo largo del tiempo que han sido sometidos esas poblaciones, diferentes dosis de fertilización y material evaluado (plantas de rebrota, cuyo último corte fue un año antes).

De manera general, los contenidos de nutrientes fueron menores en los clones de eucalipto, lo que sugiere que, a pesar de presentar contenidos menores de nutrientes en los tejidos, cuando comparado con el bambú, al parecer, los clones de eucalipto consiguen mantener los procesos de división celular y expansión celular y consecuentemente la producción de biomasa (Kavanova *et al.* 2006). El sauce negro, también presentó de manera general, menores contenidos de nutrientes.

Analizando a nivel de fracciones, el tronco es la principal fracción donde se acumula el calcio, independiente de la especie; y ramas y tronco presentaron el mayor acumulo de potasio en el bambú y clon AEC-144. En el caso de potasio para bambú, estos resultados corroboran los citados por Kleinkhenz e Midmore (2001) e Mendes *et al.* (2010), donde mencionan que el potasio es el mayor elemento requerido y contenido en la biomasa de bambú. Neto *et al.* (2010) mencionan también que los cavacos de *B. vulgaris* contienen aproximadamente dos veces más potasio que nitrógeno, siendo fosforo y azufre, los macronutrientes con menores contenidos. El elevado contenido de potasio en el plantío también puede estar asociado a la mayor absorción de este elemento ocurrido por las bajas concentraciones de potasio en el suelo, según el análisis químico (cuadro 1). En el caso del eucalipto, Santana *et al.* (2002) encontró mayores contenidos de calcio y

potasio en el tronco de *Eucalyptus grandis* y *E. saligna*. Estos autores, también mencionan que estos dos nutrientes pueden limitar la productividad del próximo ciclo, considerando que va a ser retirado del área los troncos, sin embargo, esta limitación puede ser reducida si se colecta solo el leño y se deja la corteza en campo, puesto que estos elementos están mayoritariamente acumulados en la corteza.

A nivel de fracción también, el clon LW07 presentó mayor acumulo de nitrógeno en las hojas y mayores contenidos de magnesio y boro en hojas y tronco; y mayor acumulo de hierro en las hojas en ambos clones de eucalipto. Los mayores contenidos de nutrientes con relación al tronco, ocurre porque en esta fracción se encuentra la mayor parte de las células vivas, las cuales tienden a acumular las mayores cantidades de nutrientes para los procesos de transpiración y fotosíntesis. Haag (1985) menciona que la cantidad de nutrientes en el tronco tiende ser menor que el acumulado en la copa, a pesar de que las hojas representan un pequeño porcentaje de la biomasa aérea.

Estos resultados sugieren que, si la colecta de eucalipto fuera en esta edad debería ser restringida al leño, pues en plantaciones de eucalipto, dejando en campo hojas y ramas, estas fracciones contribuyen con el 62% de los macronutrientes y 59,9% de los micronutrientes (Londero *et al.* 2011). En el caso del bambú por lo menos deberían dejarse en campo hojas y ramas. Según Mendes *et al.* (2010), la cantidad repuesta al suelo (hojas), no supera los contenidos de nutrientes exportados por ramas y colmos, al momento de la colecta, siendo necesaria la reposición por medio de futuras fertilizaciones.

2.5 Conclusiones

Los clones de eucalipto fueron las especies que presentaron mayor acumulo de biomasa seca por área por cuenta del mayor adensamiento, sin embargo, presente menor acumulo de nutrientes, cuando comparado con el bambú menos adensado.

De manera general, el mayor acumulo de biomasa ocurrió en el tronco seguido por ramas y hojas. Los clones de eucalipto presentaron valores mayores en el aporte de biomasa en el tronco por área, cuando comparado con bambú y sauce negro; los cuales presentaron un mayor acumulo en ramas y troncos, no difiriendo estas fracciones entre sí para bambú y sauce negro, respectivamente.

El bambú, cuando comparado con las otras especies, presentó el mayor acumulo de macronutrientes como nitrógeno, fósforo, azufre y magnesio, así como de micronutrientes como boro, cobre, hierro y zinc en ramas y troncos debido a las altas concentraciones de estos nutrientes en las plantas como resultado de la alta eficiencia de absorción de la especie junto a las elevadas dosis de fertilización.

Potasio y calcio son los nutrientes con un mayor acumulo en el tronco, pudiendo comprometer la productividad del próximo ciclo de la plantación, puesto que el tronco es la principal fracción para retirada del campo, por lo que es importante considerar la reposición de estos nutrientes al momento de calcular las dosis de fertilización para bambú y eucalipto e implementar medidas que reduzcan la pérdida de estos nutrientes. Para bambú, si las plantaciones fueran colectadas a esta edad, las fracciones hojas y ramas deben permanecer en el local y en el caso de los eucaliptos, además de dejar las hojas y ramas es recomendable la remoción únicamente del leño y dejar la corteza en campo.

Agradecimientos

Los autores agradecemos al Programa de Apoyo a Estudiantes Extranjeros de Doctorado (PAEDEX), por la beca concedida a la primera autora, al Instituto de Investigación en Bioenergía (IPBEN por sus siglas en portugués) y a la Facultad de Ciencias Agronómicas (FCA) de la Universidad Estatal Paulista (UNESP).

Referencias

Adegbidi, H.G, Volk, T.A., White, E.H., Abrahamson, L.P., Briggs, R.D., Bickelhaupt, D.H. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass Bioenergy* 20, 399-411.

Arunachalam, A., Arunachalam, K. 2002. Evaluation of bamboos in eco-restoration of "jhum" fallows in Arunachal Pradesh: ground vegetation, soil and microbial biomass. *Forest Ecology and Management* 159, 231-239.

Barros, N.F., Novais, R.F., Neves, J.C.L. 1990. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: Barros, N. F., Novais, R. F. (Eds.). *Relação solo-eucalipto*. Folha de Viçosa, 1-24.

Brito, J.O., Tomazello, F.M., Salgado, A.L.B. 1987. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. IPEF 6, 13-17.

Colares, D.S., De Oliveira, D.G., Júnior, P. P. A., Pulz, F.A. 2017. Produção de matéria seca de bambu irrigado e estimativa de rentabilidade bruta em três espaçamentos de plantio. Instituto Federal de Tocantins, 1-7.

Fernandes, A.M., Soratto, R.P. 2013. Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de batata. Biosci. J. 29, 91-100.

Christanty, L., Maily, D., Kimmins, J.P. 1996. "Without bamboo, the land dies": Biomass, litterfall, and soil organic matter dynamics of a Javanese bamboo talon-kebun system. Forest Ecology and Management 87, 75-88,

Diggle, P.J., Heagerty, P.J., Liang, K.Y. and Zeger, S.L. 2002. Analysis of Longitudinal Data. (2nd edition). Oxford: Oxford University Press.

Embaye, K. et al. 2005. Biomass and nutrient distribution in a highland bamboo forest in southwest Ethiopia: implications for management. Forest Ecology and Management 204, 159-169.

Eufrade Junior, H.J.; Melo, R.X.; Sartori, M.M.P.; Guerra, S.P.S.; Ballarin, A.W. 2016. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. Biomass and Bioenergy 90, 15-21.

Guerra, S., Oguri, G., Spinelli, R. 2016a. Cut-and-chip harvesting of eucalypt energy plantations in Brazil. Biomass Bioenergy 86, p. 21-7.

Guerra, S., Oguri, G., Junior, H.J.E., Melo, R.X., Spinelli, R. 2016b. Mechanized harvesting of bamboo plantations for energy production: Preliminary tests with a cut-and-shred harvester. Energy for Sustainable Development 34, 62-66.

Guo, L.B., Sims, R.E.H., Horne, D.J. 2002. Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand. I: biomass and nutrient accumulation, Bioresour. Technol. 85, 273-283.

Haag, H.P. 1985. Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais. Campinas: Cargill. 114 p.

Kavanova, M., Lattanzi, F. A., Grimoldi, A. A., Schnyder, H. 2006. Phosphorus deficiency decreases cell division and elongation in grass leaves. Plant Physiology, Rockville 141, 766-775.

Laclau, J.P., Ranger, J., Nzila, J.D., Bouillet, J.P., Gelhaye, D., Deleporte, P. 2003. *Eucalyptus* et fertilité des sols au Congo. Bois et Forêt des Tropiques 277, 69-84.

- Londero, E.K., Schumacher, M.V., Szymczak, D.A., Viera, M. 2011. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em área de segunda rotação. *Ciência Florestal* 21, 487-497.
- Mendes, S. de C., Molica, S.G., Caraciolo Ferreira, R. L. C., Gutierrez E., Céspedes, G. H. 2010. Absorção e distribuição de nutrientes em plantios comerciais de bambu (*Bambusa vulgaris*) no nordeste do Brasil. *Revista Árvore* 34, 991-999.
- Merino, A., Balboa, M.A., Soalleiro, González, R.R., J.G.Á. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe, *Forest Ecology and Management* 207, 325-339.
- Navarro, A., Mastroilli, M., Campi, P., Palumbo, A.D., Facciotto, G. 2012. Biomass production of fast growing woody species in a short rotation coppice in Apulia (Italy), in: 20th European Biomass Conference and Exhibition, Annals, Milan, 422-426.
- Nelder, J.A., Wedderburn, R.W. 1972. Generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society Series A* 135, 370–384.
- Neto, S.N.O., Dos Reis, G.G., Reis, M.G.F. Neves, J.C.L. 2003. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento *Revista Árvore* 27, 15-23.
- Paris, P., Mareschi, L., Sabatti, M., Pisanelli, A., Ecosse, A., Nardin, F. 2011. Comparing hybrid *Populus* clones for SRF across northern Italy after two biennial rotations: survival, growth and yield. *Biomass Bioenergy* 35, 1524-1532.
- Ramos, S. J., Faquin, V., Rodrigues, C.R., Silva, C.A., Boldrin, P.F. 2009. Biomass production and phosphorus use of forage grasses fertilized with two phosphorus sources. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 335-343.
- Rockford, D.L., Carter, D.R., Stricker, J.A. 2008. Commercial tree crops for phosphate mined lands, Final Report. Publication No. 03-141-225, FIPR, Florida.
- Rosso, L., Facciotto, G., Bergante, S., Vietto, L., Nervo, G. 2013. Selection and testing of *Populus alba* and *Salix* spp. as bioenergy feedstock: Preliminary results. *Appl. Energy* 102, 87-92.
- Safou-Matondo, R., P. Deleporte, P., Laclau, J.P., Bouillet, J.P. 2005. Hybrid and clonal variability of nutrient content and nutrient use efficiency in Eucalyptus stands in Congo. *Forest Ecology and Management* 210, 193-204.
- Santana, R.C., De Barros, N.F. Neves, J.C.L. 2002. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. *Revista Árvore*, 26, 447-457.

- Santos, D.R., Junior, C.R.S., Da Silva, M.F., Yamaji, F.M.; Almeida, R. de A. 2016. Potencial de espécies de bambu como fonte energética. *Scientia Forestalis* 44, 751-758.
- Schonau, A.P.G., Coetzee, J. 1989. Initial spacing, stand density and thinning in *Eucalyptus* plantations, *Forest Ecology Management* 29, 245-266.
- Scurlock, J.M.O., Dayton, D.C., Hame, S.B. 2000. Bamboo: an overlooked biomass resource? *Biomass and Bioenergy* 19, 229-244.
- Sochacki, S.J., Harper, R.J., Smettem, K.R.J., Dell, B., Wu, H. 2013. Evaluating a sustainability index for nutrients in a short rotation energy cropping system. *Glob. Ch. Biol. Bioenergy* 5, 315-326.
- Silva, C.A., Klauberg, C., Carvalho, S.P.C., Piccolo, M.C., Rodriguez, L.C.E. 2015. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* spp. *Scientia Forestalis* 43, 135-146.
- Sohel, M.D., Alamgir, M., Akhter, S., Rahman, M. 2015. Carbon Storage in bamboo (*Bambusa vulgaris*) plantation in the degraded tropical forest: Implications for policy development. *Land Use policy* 49, 142-151.
- Vale, A.T., Moreira, A.C.O., Martins, I.S. 2017. Avaliação do potencial energético de *Bambusa vulgaris* em função da idade. *Floresta e Ambiente* 24, 1-9.
- Varanda, L.D., Caraschi, J.C., Almeida Filho, F. 2010. Potencial energético do carvão vegetal de bambu. In: Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, 12., 2010, Lavras. Anais... Lavras: UFLA.
- Vital, B.R. 1984. Método de determinação da densidade da madeira (in Portuguese), *Bol. Tecnico SIF* 1, 1-21.
- Westfall, P. H., Tobias, R. D., Rom, D., Wolfinger, R. D., Hochberg, Y. 1999. Multiple Comparisons and Multiple Tests Using the SAS System, Cary, NC: SAS Institute Inc.

Apéndice 1. Concentraciones medias de macro y micronutrientes de bambú, eucalipto y sauce negro, respectivamente.

Edad (meses)	Arreglo	Fracción	Concentraciones (g kg ⁻¹)					
			N	P	K	Ca	Mg	S
22	Bambú 3 m x 2 m	Hojas	49,22	1,89	19,20	8,71	5,62	2,10
		Ramas	37,84	0,99	40,62	9,31	4,59	4,13
		Tronco	34,99	0,89	28,43	11,27	5,57	5,79
22	AEC-144 3 m x 1 m	Hojas	18,14	0,82	7,88	6,64	2,41	0,77
		Ramas	3,59	0,28	5,65	6,23	1,15	0,63
		Tronco	1,11	0,07	3,01	1,99	0,61	0,58
18	LW07 3 m x 1 m	Hojas	20,69	0,74	8,95	4,74	1,87	0,82
		Ramas	3,76	0,16	4,86	4,30	0,76	0,63
		Tronco	1,48	0,07	2,10	2,07	0,65	0,58
18	Sauce 3 m x 1 m	Hojas	27,73	1,48	15,01	5,36	1,93	1,12
		Ramas	19,13	0,73	6,98	2,95	0,99	0,79
		Tronco	12,80	0,61	5,58	2,56	0,85	0,73
Edad (meses)	Arreglo	Fracción	Concentraciones (mg kg ⁻¹)					
			B	Cu	Fe	Mn	Zn	
22	Bambú 3 m x 2 m	Hojas	30,59	18,71	591,06	524,58	36,10	
		Ramas	42,12	54,57	333,96	292,55	77,50	
		Tronco	66,71	29,27	282,45	152,52	65,86	
22	AEC-144 3 m x 1 m	Hojas	36,94	7,00	355,58	465,58	12,33	
		Ramas	13,32	9,08	45,00	182,50	7,75	
		Tronco	9,10	2,92	14,25	68,25	4,25	
18	LW07 3 m x 1 m	Hojas	53,76	9,17	472,50	515,92	42,08	
		Ramas	17,03	10,33	50,17	286,33	9,92	
		Tronco	12,76	3,33	24,33	82,25	5,42	
18	Sauce 3 m x 1 m	Hojas	85,58	15,25	198,00	594,58	68,17	
		Ramas	22,89	16,58	78,33	131,33	19,50	
		Tronco	15,86	12,25	76,92	95,33	19,42	

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de biomassa para fins energéticos em sistemas florestais de curta rotação (SFCR) apresenta-se como uma forma alternativa na redução da dependência dos combustíveis fósseis. No entanto, as altas taxas de crescimento neste tipo de florestas plantadas são geralmente associadas à eficiência com a qual as plantas utilizam os recursos disponíveis no ambiente, como água e nutrientes, levantando assim questões sobre a sustentabilidade da produção da madeira. Os SFCR devem ser avaliados desde uma perspectiva mais integrada, considerando como neste estudo a eficiência dos usos de recursos como a luz, água e nutrientes.

O presente estudo mostra que a produtividade das espécies no SFCR (altas densidades de plantio e altas doses de adubação) está mais associada à adaptação das espécies a seca moderada e a disponibilidade hídrica, e que as limitações deste último fator podem afetar a eficiência no uso de luz e água, bem como a alocação de biomassa nos diferentes componentes da planta. O déficit hídrico reduz as taxas fotossintéticas, eleva as taxas de transpiração e, conseqüentemente, reduz a eficiência no uso da radiação e água.

A eficiência no uso da luz pode ser mais eficiente quando é possível controlar fatores como a arquitetura de copa, refletindo em aumento do índice de área foliar, incrementos na atividade fotossintética das plantas e conseqüentemente, altas taxas de crescimento.

O acúmulo de biomassa seca foi maior nos clones de eucalipto devido ao maior adensamento da cultura, porém observou-se maior acúmulo de nutrientes no bambu menos adensado, devido a esse fato torna-se necessário empreender em trabalhos sobre nutrição e adubação no bambu em plantios adensados, pois nas condições deste experimento demonstrou-se que altas doses de fertilização e uma maior eficiência na absorção de nutrientes do bambu levaram a altos conteúdos de nutrientes, valores que deferiram com aqueles vistos em outros estudos.

Independente da espécie, os macronutrientes cálcio e o potássio apresentaram os maiores acúmulos no tronco, situação que pode limitar a produtividade do próximo ciclo, considerando a colheita do tronco, pelo que deve considerar-se esse ponto nos cálculos da nova adubação ou pensar em outro tipo de medidas como retenção da casca.

É viável repensar a possibilidade dentro do SFCR, de trocar plantios mais adensados por plantios com espaçamentos mais amplos em função da crise hídrica e esgotamento dos elementos minerais, elementos chaves na produção e produtividade das florestas energéticas. A quantidade de matéria seca produzida trabalhando com densidades de 1.666 plantas ha⁻¹ para bioenergia associado a um período de 3,5 anos para a coleta final (período onde os diferentes adensamentos tendem a ser semelhantes pela redistribuição de recursos) são razoáveis em termos econômicos e ambientais e além de tornarem mais sustentáveis na eficiência no uso de água e nutrientes e, conseqüentemente, na manutenção da fertilidade de solo.

O monitoramento do bambu até o ciclo de corte deve ser prolongado, pois notou-se que o tempo de avaliação do bambu parece ter sido curto, em função do seu crescimento mais lento, sendo necessário um maior período para coleta de dados para avaliar eficiência na utilização de recursos com a finalidade de obter altas taxas de crescimento em curto tempo, quando comparada com outras espécies florestais energéticas e contar a médio prazo com insumos suficientes para a modelagem ecofisiológico do bambu.

Finalmente, este trabalho apresenta dados pioneiros sobre o comportamento da espécie *Bambusa vulgaris* em sistemas florestais de curta rotação para fins energéticos, contribuindo a uma melhor compreensão dos processos ecofisiológicos que governam a produtividade da espécie e sirvam de base para a elaboração das prescrições silviculturais mais adequadas para a espécie, bem como a elaboração de novas perguntas de pesquisa geradas a partir desses dados.

REFERÊNCIAS

- AHLGREN, S., BAKY, A., BERNESSON, S., NORDBERG, A., NORÉN, O., HANSSON, P.A. Ammonium nitrate fertilizer production based on biomass - environmental effects from a life cycle perspective. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 8034-8041, 2008.
- ALEXOPOULOU, E. (Ed.). **Perennial grasses for bioenergy and bioproducts. Production, uses, sustainability and markets for giant reed, *Miscanthus*, switchgrass, reed canary grass and bamboo**. London: Elsevier, 2018. 292 p.
- BINKLEY, D.; STAPE, J.; RYAN, M. Thinking about resource use efficiency in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 5-16, 2004.
- BOWMAN, W. D.; CONANT, R. T. Shoot growth dynamics and photosynthetic response to increased nitrogen availability in the alpine willow *Salix glauca*. **Oecologia**, v. 97, p. 93-99. 1994.
- BOTREL, M. C. G.; DA SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S.C.D.; FERNANDES, B. R. Ganho genético em propriedades físicas e mecânicas de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 13-19, 2007.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S.C.D.; DA SILVA, J. R. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, 2010.
- BREDA, N. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, p. 2403 - 2417, 2003.
- BREDEMEIER, M.; BUSCH, G.; HARTMANN, L.; JANSEN, M.; RICHTER, F.; LAMERSDORF, N. P. Fast growing plantations for wood production – integration of ecological effects and economic perspectives. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 3, P. 1-14, 2015.
- CAMPBELL, N. A. **Biology**, 2da. Ed. Redwood City, CA: Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. 1990.
- CAMPINHOS, E. Sustainable plantations of high-yield *Eucalyptus* trees for production of fiber: the Aracruz case. **New Forests**, Amsterdam, v.17, p.129-143, 1999.
- CAMPOE, O. **Efeito de práticas silviculturais sobre a produtividade primária líquida de madeira, o índice de área foliar e a eficiência do uso da luz em**

plantios de restauração da Mata Atlântica. 121f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

CAMPOE, O. **Ecologia da produção e da competição intraespecífica do *Eucalyptus grandis* ao longo de um gradiente de produtividade no Estado de São Paulo.** 121f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CARNEIRO, A. C. O. CASTRO A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; DOS SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P. DAMÁSIO, R. A.; VITAL, P. B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CASTRO, A. F. N. M. CASTRO, R. V. O; CARNEIRO, A. C. O.; DE LIMA, J. E.; DOS SANTOS, R. C.; Pereira, B. L. C.; Alves, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 6, p. 627-635, jun. 2013.

CEOTTO, E., DI CANDILI CASTELLI, F., BADECK, F. W., RIZZA F., SOAVE, C., VOLTA, A., VILLANI, G.; MARLETTO, V. Comparing solar interception and use efficiency for the energy crops giant reed (*Arundo donax* L.) and sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Field Crops Research**, v. 149, p. 159-166. 2013.

CERASUOLO, M.; RICHTER, G. M.; RICHARD, B.; CUNNIFF, J.; GIRBAU, S.; SHIELD, I.; PURDY, S.; KARP, A. Development of a sink–source interaction model for the growth of short-rotation coppice willow and *in silico* exploration of genotype x environment effects. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 3 p. 961–977, 2016.

CHAPIN III, F. S.; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. **Principles of terrestrial ecosystem ecology.** Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002. 436 p.

CLARK, D.A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D. W.; CHAMBERS, J. Q.; THOMLINSON, J. R.; HOLLAND, E. A. Net primary production in tropical forests: and evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, Washington, v. 11, n. 2, p. 371-384, 2001.

DA SILVA, W.; SEDIYAMA, T.; DA SILVA, A. A.; CARDOSO, A. A. índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com braquiária. **Floresta**, v. 34, n.3, p. 325-335, 2004.

DA SILVA, R. M. L.; HAKAMADA R. E; BAZANI, J. H. OTTO, M. S. G.; STAPE, J. L. Fertilization response, light use, and growth efficiency in *Eucalyptus* plantations across soil and climate gradients in Brazil. **Forests**, v. 7, n. 117, p. 1-12. 2016.

SANTOS, D. R.; JUNIOR, C. R. S.; DA SILVA, M. F.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. de A. Potencial de espécies de bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 751-758, 2016.

ELOY, E.; CARON, B. O.; DA SILVA, D. A.; DE SOUZA, V. Q.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; ELLI, E. F. Produtividade energética de espécies florestais em plantios de curta rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 8, p. 1424-1431, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Introdução de novas espécies de *Salix* (Salicaceae) no Planalto Sul de Santa Catarina, Brasil. Comunicado Técnico 71. Brasília, 2002. 3 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2016 (ano base 2015)**. Brasília, 2016. 294 p.

FANG, S, XU, X, LU, S, TANG, L. Growth dynamics and biomass production in short-rotation poplar plantations: 6-year results for three clones at four spacings. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, pp. 415-425. 1999.

FISCHER, G., PRIELER, S., VAN VELTHUIZEN, H., BERNDES, G., FAAIJ, A. LONDO, M.; WIT M. Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land pastures, Part II: Land use scenarios. **Biomass and Bioenergy**, v.34, p. 173-187. 2012.

FRANCIS, J. K. *Bambusa vulgaris* Schrad ex Wendl. Common bamboo. SO-ITF-SM-65. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 1993. 6 p.

GANGULY, S.; NEMANI, R. R.; ZHANG, G.; HASHIMOTO, H.; MILESI, C.; MICHAELIS, A.; WANG, W.; VOTAVA P.; SAMANTA, A.; MELTON, F.; DUNGAN, J.L.; VERMOTE, E.; GAO, F.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. B. Generating global Leaf Area Index from Landsat: Algorithm formulation and demonstration. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 122, p. 185-202, 2012.

GUERRA, S.P.S.; GARCIA, E.A.; LANÇAS, K.P.; REZENDE, M.A.; SPINELLI, R. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. **Fuel**, v.137, p. 360-363, 2014.

GUERRA S, OGURI G, SPINELLI R. Cut-and-chip harvesting of eucalypt energy plantations in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 86, p. 21–7, 2016.

GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ, E.; MORENO ORJUELA, R. D.; VILLOTA ECHEVERRY, N. **Guía de cubicación de la madera No. 1**. Pereira: Grafica Budas, 2013. 44 p.

JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BAREF, F. Review of methods in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 121, p. 19-35, 2004.

JOHNSON, J., M.; COLEMAN, R.; GESCH, A.; JARADAT, R.; MITCHELL, D.; WILHELM, W. Biomass-bioenergy crops in the United States: A changing paradigm. **The Americas**, v. 1, p. 1-28, 2007.

KHASANAH, N.; WIJAYA, T.; VINCENT, G.; VAN NOORDWIJK, M.; **Water status and radiation environment in rubber *Hevea brasiliensis* systems: a comparison between monoculture and mixed rubber-*Acacia mangium* plots**. Bogor: ICRAF, 2006. 9 p.

KLEINHENZ, V.; MIDMORE, D. J. Aspects of bamboo agronomy. *Advances in Agronomy*, v.74, p.99-149, 2001.

KLEINE, H. **Bambu como floresta energética**. Santa Catarina: IBIOM, 2015. 76 p. Disponível em: http://ibiom.com.br/apresentacoes/15_Hans%20Kleine%20BAMBUSC.pdf. Acesso em: 05 de abr. 2017.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F.; PONS, T. **Plant physiological ecology**. New York: Springer, 2008. 604 p.

LABRECQUE, M.; TEODORESCU, T. I.; COGLIASTRO, A.; DAIGLE, S. Growth patterns and biomass productivity of two *Salix* species grown under short-rotation intensive culture in Southern Quebec. **Biomass and Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 419-425, 1993.

LANDSBERG, J. J.; GOWER, S. T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego: Academic Press, 1997. 354 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2006. 531 p.

LE MAIRE, G. MARSDEN C., VERHOEF W., PONZONI F.J., LO SEEN D., BÉGUÉ A., STAPE J. L. AND NOUVELLON, Y. Modis NDVI time-series allow the monitoring of *Eucalyptus* plantation biomass. **Remote Sensing of Environmental**, Amsterdam, v. 115, p. 2617-2625, 2011.

LE MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; CHRISTINA, M.; PONZONIC, F. J.; GONÇALVES, J. M. L. BOUILLET, J.P.; LACLAU, J. P. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 31-42. 2013.

LINDERSON, M. L.; IRITZ, Z.; LINDROTH, A. The effect of water availability on stand level productivity, transpiration, water use efficiency and radiation use efficiency of field-grown willow clones. **Biomass and Bioenergy**, v. 3, p. 460-468. 2007.

MARSDEN, C.; LE MAIRE, G.; STAPE, J. L.; SEEN, D.L.; ROUPSARD, O.; CABRAL, O.; EPRON, D.; LIMA, A.M.N.; NOUVELLON, Y.; 2010. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, 1741–1753, 2010.

MEDRANO, H.; NA BOTA, J.; CIFRE, J.; FLEXAS, J.; RIBAS-CARBÓ, M.; Gulías, J. Eficiencia en el uso del água por las plantas. **Investigaciones Geográficas**, Alicante, n. 43, p. 63-84, 2007.

MENDES, S. de C.; MOLICA, S.G.; CARACIOLO FERREIRA, R. L. C.; E GUTIERREZ CÉSPEDES, G. H. Absorção e distribuição de nutrientes em plantios comerciais de bambu (*Bambusa vulgaris*) no nordeste do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.6, p.991-999, 2010.

MITCHELL, C.P. Ecophysiology of short rotation forest crops. **Biomass and Bioenergy**, v. 2, n. 1, pp. 25-37. 1992.

MOLL, R. H.; KRAMPRATH, E. T.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors wich contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 3, p. 562-564. 1982.

MONTEITH, J. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v.9, p. 747-766. 1972.

MORA, A.; GARCIA, C. **A Cultura do Eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura. 2000. p. 114.

MÜLLER, M.D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2005. 108 p.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. D. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F. SILVA, V. O. VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. D. P.; TRUGILHO, P. F.; VALLE, M. L. A.; DE SOUZA, L. C.; VIEIRA, C. M. M. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.

NORMAN, J. M.; CAMPBELL, G. S. CANOPY STRUCTURE. IN: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. (eds). **Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation**. London: Chapman and Hall, 1989. p. 301-326.

OLIVAS, P. C.; OBERBAUER, S. F.; CLARK, D. B.; RYAN, M. G.; O'BRIEN, J. J.; ORDONEZ, H. Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 177, p. 110 – 116, 2013.

OLIVEIRA, D. A.; NETO, E. B.; DO NASCIMENTO, C. W. A.; FERNANDES, M. B.; DA SILVA, T. C.; DE OLIVEIRA, R. A. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.9, n.2, p.139-146, 2008.

PATRICIO, M.S.; NUNES, L.; SARAIVA, A. D.; AZEVEDO, J. C. **Produção potencial de biomassa em culturas energéticas lenhosas no Norte de Portugal**. In: Congresso Florestal Nacional. Conhecimento e Inovação. 7, 2013, Vila Real, Bragança, *Resumos...* Vila Real: Sociedade Portuguesa de Ciências Florestais. 2013. p. 291.

POTIS, A. Rubisco activase - Rubisco's catalytic chaperone. **Photosynthesis Research**, Oxford, v. 75, p. 11-27, 2003.

RIBEIRO, V. R.; DE ALMEIDA, C. T.; SANTANA, M. F.; DELGADO, R, C. **Estimativa da produtividade primária líquida na região do reservatório Funil-SP por meio do produto MOD17A3**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 17, 2015, João Pessoa - PB, *Anais...* João Pessoa: INPE, 2015. p. 721-726.

ROBERTSON, A. **Boreal energy plantation R & D with *Salix* species**. Conference paper; Journal article: General Technical Report, Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service 1986. n. PNW-194 p. 27-30, ref. 5.

ROSIM, C.C.; HSING, T. Y.; DE PAULA, R. C. Nutrient use efficiency in interspecific hybrids of eucalypt. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 540-547, 2016.

ROUSSEAU, R. J. **Understanding Short-Rotation Woody Crops**. Starkville: Mississippi State University Extension Service. 2016. 4 p.

RYAN, M.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C.R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R.; 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, p. 1695-1703, 2010.

SANTANA, R. C.; DE BARROS, N. F.; NEVES, J.C.L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.4, p.447-457, 2002.

SANTANA, W. M. S. CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal Eucalyptus. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2012.

SMETHURST, P, BAILLEI, C, CHERRY, M. HOLZ, G. Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus nitens* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 176, p. 531-542. 2003.

STAPE, J. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 225 f. Thesis (Ph.D. in Forest Sciences), Colorado State University, Fort Collins, 2002.

STAPE, J.; BINKLEY, D.; RYAN, M. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management, Amsterdam**, v. 193, p. 17-31, 2004.

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

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. dos; PENCHEL, R. M. Desempenho de clones de eucalipto em resposta a disponibilidade de água no substrato. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 3, p. 179-189, 2009.

TOLLENAAR, M.; AGUILERA, A.; NISSANKA, S.P. Grain yield is reduced more by weed interference in an old than in a new maize hybrid. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, n.2, p.239-246, 1997.

TRIPATHI, A.M.; POHANKOVA, E.; POKORNY, R.; FISCHER, M. ORSÁG, M.; TORRES, C. P. J.; TRNKA, M.; MAREK, M. V. **Long term measurement of leaf area index and radiation use efficiency in short rotation coppice poplar cultures and cereal crops**. In: 24th European Biomass Conference and Exhibition, 6-9 June 2016, Amsterdam - The Netherlands. 2016. p. 83-88.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, 2009.

VOLK, T. A.; ABRAHAMSONA, L. P.; NOWAKA, C. A.; SMARTB, L. B.; THARAKANC, P. J.; WHITEA, E. H. The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 715-727, 2006.

YEN, T- M. Culm height development, biomass accumulation and carbon storage in an initial growth stage for a fast-growing moso bamboo (*Phyllostachy pubescens*). **Botanical Studies**, v. 57, n. 10, 2016.

ZANI, C. **Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo**. Tese. 172 f. Tese (Doutorado) - Programa de Recursos Florestais, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.